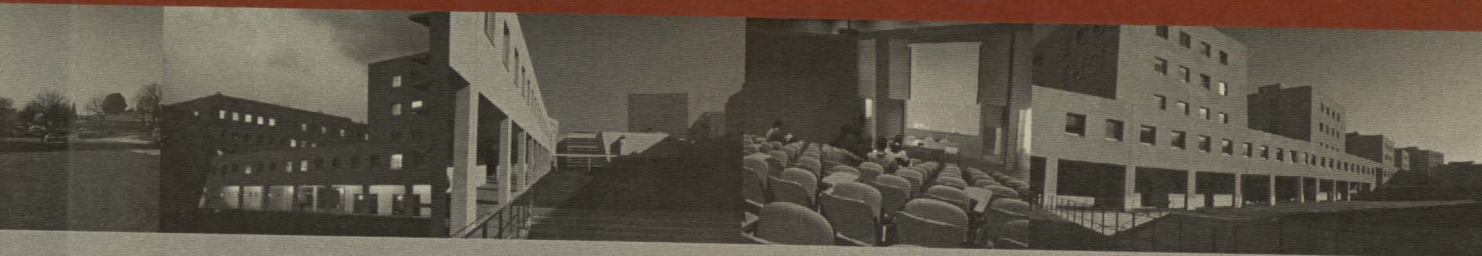




Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
FEUP



Alberto Mário Vasconcelos Tavares Moreira

Estudos sobre Caldas de Injecção das Bainhas de Pré-Esforço



UNIVERSIDADE DO PORTO
FACULDADE DE ENGENHARIA
Departamento de Engenharia Civil (DEC)

Estudos sobre Caldas de Injecção das Bainhas de Pré-Esforço

Alberto Mário Vasconcelos Tavares Moreira

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do Grau de
Doutor em Engenharia Civil

Maio de 2003

UNIVERSIDADE DO FORTO
Faculdade de Engenharia
BIBLIOTECA 14
N.º 79562
CDU _____
Data 17, 12, 20 03

Aos meus Pais

Índice Geral

ÍNDICE GERAL	V
RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
RÉSUMÉ	IX
AGRADECIMENTOS	XI
ÍNDICE DE TEXTO	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XVII
ÍNDICE DE GRÁFICOS	XXI
ÍNDICE DE QUADROS	XXVII
CONSIDERAÇÕES INICIAIS	0.1
CAPÍTULO 1 -INTRODUÇÃO	1.1
CAPÍTULO 2 - NORMALIZAÇÃO	2.1
CAPÍTULO 3 - CALDAS DE INJEÇÃO UTILIZADAS NA OBRA DE CONSTRUÇÃO DA PONTE DE S. JOÃO SOBRE O RIO DOURO E SEUS ACESSOS (DEVESAS-CAMPANHÃ)	3.1
CAPÍTULO 4 - ANÁLISE EXPERIMENTAL – ENSAIOS REALIZADOS NO L.C.P.C. (PARIS) E SUA CONCLUSÕES	4.1
CAPÍTULO 5 - ANÁLISE EXPERIMENTAL – ENSAIOS REALIZADOS NO L.E.M. – FEUP E SUAS CONCLUSÕES	5.1
CAPÍTULO 6 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DAS CALDAS DE INJEÇÃO	6.1
CONSIDERAÇÕES FINAIS	7.1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	8.1

- ANEXO A – ESTUDO COMPARATIVO DE NORMALIZAÇÃO SOBRE CALDAS DE INJECCÃO DAS BAÍNHAS DE PRÉ-ESFORÇO - QUADROS A.1
- ANEXO B – CALDAS DE INJECCÃO UTILIZADAS NA OBRA DE CONSTRUÇÃO DA PONTE DE S. JOÃO SOBRE O RIO DOURO E SEUS ACESSOS (DEVESAS – CAMPANHÃ) – BOLETINS DE RECEPÇÃO E ENSAIO E RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS B.1
- ANEXO C – RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS REALIZADOS COM O VISCOSÍMETRO BROOKFIELD C.1

RESUMO

O tema de investigação deste trabalho inscreve-se no estudo das caldas de injeção das bainhas de pré-esforço, tendo em vista o cumprimento das suas principais funções, destacando-se o enchimento completo do espaço existente entre a bainha e as armaduras de pré-esforço, a fim de protegê-las da corrosão.

No Capítulo 1 é abordada a reologia das caldas de cimento, incluindo a determinação dos parâmetros reológicos em viscosímetros, terminando com a análise do efeito da modificação de alguns factores (condições de amassadura, finura e composição do cimento, etc.) sobre os parâmetros reológicos das caldas.

Este capítulo enquadra teoricamente o trabalho realizado e dá suporte para interpretar os resultados do trabalho.

No Capítulo 2 apresenta-se a um estudo comparativo em que inicialmente é feita a comparação “normalização CEN recentemente publicada/normalização anteriormente existente em diversos países” e posteriormente entre esta normalização CEN e o conteúdo do Boletim nº 20 da FIB (grouting of tendons in prestressed concrete), publicado em Julho de 2002, considerado como “state-of-art guidelines”.

Neste capítulo são também pormenorizados os principais ensaios de caracterização das caldas de injeção, incluindo os novos ensaios propostos no referido boletim FIB.

No Capítulo 3 é apresentado o caso concreto do controlo efectuado às caldas de injeção das bainhas de pré-esforço da obra da nova ponte ferroviária sobre o rio Douro no Porto, analisando-se a evolução verificada na composição das caldas, relacionando-se com a modificação das respectivas características.

No Capítulo 4 são apresentados os ensaios realizados em França pelo autor, no L.C.P.C., que consistiram fundamentalmente na medição da fluidez de diferentes caldas por dois métodos - ensaio do cone e ensaio de imersão (improvisado) - e a comparação com a injectabilidade medida no ensaio de injectabilidade na coluna de areia, adaptado da NF P18-891. A análise dos resultados permitiu concluir que o ensaio de imersão mede melhor a injectabilidade das caldas do que o ensaio do cone, visto ser independente da composição da calda.

No Capítulo 5 apresentam-se os ensaios realizados pelo autor no LEM – FEUP (Porto), semelhantes aos realizados no L.C.P.C., mas com o ensaio de imersão normalizado. Confirmaram-se e reforçaram-se as conclusões obtidas no capítulo anterior.

No Capítulo 6 são realizados ensaios de diferentes caldas num viscosímetro Brookfield, que permitiram concluir existir uma melhor correlação entre os parâmetros reológicos de caldas com idêntica fluidez, medida pelo ensaio de imersão, do que quando medida pelo ensaio do cone, reforçando as conclusões dos capítulos precedentes.

ABSTRACT

The present research work concerns the study of grout for ducts of prestressing tendons that completely fill the space between the duct and the tendons so as to protect these from corrosion.

Chapter 1 concerns rheology of grout including determination of rheological parameters in viscosimeters and also the analysis of the effects on rheological parameters of modifying certain factors (mixing conditions, fineness and cement composition, etc.).

Chapter 2 deals with an initial study comparing recently published CEN standards with out-of-date standards of various countries and also with FIB n° 20 Bulletin (grouting of tendons in prestressed concrete), published in July 2002, and considered the state of art guidelines. In this chapter the main test methods to characterize grout are presented in detail, including new test methods proposed in FIB n° 20 Bulletin.

Chapter 3 refers to the actual case of control carried out on grout for pre-stressing tendons at the site of the new railway bridge over the Douro river. The evolution verified on the mix-design of placed grout was related to the modification of corresponding properties.

Chapter 4 comprises the description of a research programme carried out by the author, in France at the L.C.P.C.. Tests carried out, mainly consisted in measuring the fluidity of grout with two different test-methods - the Marsh Cone and a non standardized Immersion test-method - and comparing it with the injectability assessed by a test-method adapted from a french standard - NF P18-891 - Injectability into a sand column. An overview of the results led to the conclusion that the Immersion test-method assesses injectability of grout better than the Marsh Cone test-method as its results are independent of the mix ingredients.

Chapter 5 deals with a research programme carried out by the author at LEM-FEUP (Porto) similar to the programme completed at LCPC but using the standardized Immersion test method and thus confirming the conclusions of chapter 4.

Finally chapter 6 refers to testing different grouts in a Brookfield viscosimeter which led to the conclusion that rheological parameters correlate better for grouts with the same fluidity when fluidity was measured with immersion test method than with the cone test method.

This confirms results and conclusions in the previous chapter

RÉSUMÉ

Le domaine de recherche du travail présent s'inscrit dans le cadre de l'étude des coulis d'injection des gaines de précontrainte, pour bien remplir son rôle. On remarque le complet remplissage des vides existants entre la gaine et les armatures de précontrainte, pour les protéger contre l'oxydation.

Dans le chapitre 1 on présente un résumé de la rhéologie des coulis hydrauliques et on analyse l'influence de la modification de quelques facteurs (finesse et composition des ciments, conditions de malaxage, etc.) sur les paramètres rhéologiques.

Ce chapitre fait l'encadrement théorique du travail et permet l'interprétation des résultats.

Dans le chapitre 2 on présente d'abord une étude comparative de la normalisation déjà existant dans quelques pays, tenant comme référence la récente normalisation CEN. Ensuite on fait la comparaison entre cette normalisation CEN et le contenu du bulletin n° 20 de la FIB (Juillet 2002) – "Grouting of tendons in prestressed concrete", considéré comme "state-of-art guidelines".

Dans ce chapitre sont aussi détaillés les essais de caractérisation des coulis d'injection, et les nouveaux essais proposés dans cet bulletin FIB inclus.

Dans le chapitre 3 on présente le cas concret du contrôle qu'on a réalisé aux coulis d'injection des gaines de précontrainte dans l'ouvrage du nouveau pont de chemin de fer sur le fleuve Douro à Porto, et on analyse l'évolution vérifiée dans les compositions des coulis et la modification de leur caractéristiques.

Dans le chapitre 4 sont présentés les résultats des essais réalisés en France par l'auteur, dans le L.C.P.C., qui ont consisté fondamentalement dans la mesure de la fluidité de différents coulis par deux méthodes – méthode du cône et méthode d'immersion (improvisé) - et comparaison avec l'injectabilité mesurée par l'essai d'injectabilité à la colonne de sable (NF P18 – 891). L'analyse des résultats a permis de conclure que l'essai d'immersion mesure mieux l'injectabilité des coulis que l'essai du cône, parce qu'il ne dépend pas de la composition du coulis.

Dans le chapitre 5 sont présentés les essais réalisés par l'auteur, dans le LEM-FEUP (Porto), pareils avec ceux-là réalisés en France, mais avec l'essai d'immersion normalisé. On a confirmé et renforcé les conclusions obtenues dans le chapitre précédent.

Dans le chapitre 6 sont réalisés des essais avec différents coulis dans un viscosimètre Brookfield qui ont permis de conclure l'existence d'une meilleure corrélation entre les paramètres rhéologiques des coulis avec la même fluidité mesurée par l'essai d'immersion qui quand mesurée par l'essai du cône, en renforce les conclusions des chapitres précédents.

AGRADECIMENTOS

Ao terminar este trabalho, desejo expressar o meu reconhecimento às pessoas ou entidades, que das mais variadas formas contribuíram para que fosse possível a sua realização.

Em particular desejo agradecer:

- Ao Prof. Doutor Joaquim da Conceição Sampaio, sob cuja orientação decorreu a realização deste trabalho, pelos seus ensinamentos, empenho, amizade e apoio entusiástico constante.
- À Prof^a Doutora Madalena Teles, pelo apoio, estímulo permanente e colaboração.
- À Doutora Anne Marie Pailère, directora da divisão de "Surveillance et Pathologie des Ouvrages d'Art" do L.C.P.C., todo o apoio e facilidades dispensadas no estágio realizado no L.C.P.C. – Paris.
- À Prof^a Doutora Joana Sousa Coutinho pela escrita na versão em inglês do resumo.
- Ao Prof. Luis Juvandes pela orientação do Sr. Pedro Morais no apoio informático à realização de gráficos e figuras incluídas nesta dissertação.
- Ao Eng. António Bettencourt do Laboratório Nacional de Engenharia Civil pela disponibilidade para discussão deste tema e pela ajuda na pesquisa bibliográfica no LNEC.
- Ao Eng. Mário Génésio e ao Eng. Miguel Ferraz pela boa vontade demonstrada ao aceitar uma permuta de horários para as aulas de Resistência de Materiais ao curso de Engenharia de Minas nos anos lectivos de 2001/2002 e 2002/2003, respectivamente.
- Ao Eng. Pedro Costa e ao Eng. Carlos Sousa pela ajuda preciosa nas aulas de Resistência de Materiais 2 no ano lectivo de 2002/2003.
- À D. Maria Teresa Pinto pela escrita de todo o texto e quadros do presente trabalho.
- Ao Sr. Manuel da Hora, pelo apoio prestado na montagem do equipamento do ensaio de injectabilidade.
- À D. Paula Costa e ao Sr. Manuel Cardoso por toda a ajuda prestada na realização dos ensaios no LEM-FEUP.

- Ao Sr. Pedro Morais pelo apoio informático para realização dos gráficos e figuras deste trabalho.
- A todos os Colegas da Secção de Materiais de Construção pelo empenho e espírito de camaradagem.
- À Direcção do ex-Gabinete do Nó Ferroviário do Porto, actualmente integrado na Refer, EP, e ao Eng. Luis Ribeiro pela disponibilização dos elementos de controlo da obra de construção da nova ponte ferroviária sobre o rio Douro no Porto e seus acessos.
- Ao Director do Polo da Amieira do Instituto Geológico e Mineiro, Prof. Mário Rui Machado Leite e ao Dr. José Grave pela total disponibilidade e ajuda na realização dos ensaios com o viscosímetro Brookfield.
- À Administração da Secil – Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A., e à Eng^a Raquel Figueira pela disponibilização do cimento para a realização dos ensaios no LEM-FEUP.
- À Administração da Unibetão, em particular ao Eng. Juliano Barbosa, pela disponibilização dos inertes para a realização dos ensaios no LEM-FEUP.
- À Administração da SIKA – Indústria Química, S.A., e ao Eng. José David pela disponibilização dos adjuvantes para a realização dos ensaios no LEM-FEUP.
- À Administração da “Construtora do Tâmega, S.A.”, pela disponibilidade de cimento para realização de ensaios finais do Capítulo 6, na FEUP.
- Ao Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção e à sua Direcção, nas pessoas do Prof. Raimundo Delgado e Prof^a Ana Maria Sarmento toda a disponibilidade e empenho.

Índice de Texto

CONSIDERAÇÕES INICIAIS	0.1
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	
1.1 - GENERALIDADES	1.1
1.2 - REOLOGIA DAS CALDAS E PASTAS DE CIMENTO	1.3
1.2.1 – Introdução	1.3
1.2.2 – Noção de viscosidade; fluidos newtonianos	1.3
1.2.3 – Fluidos não-newtonianos	1.8
1.2.4 – Tixotropia e anti-tixotropia	1.10
1.2.5 – Determinação experimental das características reológicas	1.15
1.2.5.1 – Fluidos newtonianos	1.15
a) Viscosímetro de tubo capilar	1.15
b) Viscosímetro de cilindros coaxiais	1.17
1.2.5.2 – Fluidos plásticos (ou de Bingham)	1.20
a) Viscosímetro de tubo capilar	1.20
b) Viscosímetro de cilindros coaxiais	1.25
1.2.6 – Variação das constantes reológicas de pastas e caldas de cimento com alguns factores	1.28
1.2.6.1 – Efeito das condições de amassadura	1.28
1.2.6.2 – Efeito da concentração da mistura	1.29
1.2.6.3 – Efeito da finura do cimento	1.31
1.2.6.4 – Efeito da composição do cimento	1.32
1.2.6.5 – Efeito dos adjuvantes	1.34
1.2.6.6 – Efeito das adições	1.38
a) Adição de cinzas volantes	1.39
b) Adição de sílica de fumo	1.40
CAPÍTULO 2 - NORMALIZAÇÃO	
2.1 - INTRODUÇÃO	2.1
2.2 – ESTUDO COMPARATIVO	2.3
2.2.1 – Estudo comparativo inicial	2.3

2.2.2 - Estudo comparativo posterior	2.10
2.3 - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	2.14
2.3.1 - Ensaio de fluidez	2.14
a) Método do cone	2.14
b) Método de imersão	2.15
2.3.2 - Ensaio de exsudação	2.17
2.3.3 - Ensaio de variação de volume	2.18
a) Método da proveta cilíndrica	2.18
b) Método do recipiente	2.18
2.3.4 - Ensaio de resistência à compressão	2.19
a) Provetes prismáticos	2.19
b) Provetes cilíndricos	2.19
2.3.5 - Ensaio de injectabilidade na coluna de areia	2.20
2.3.6 – Novos ensaios de exsudação	2.21
a) Ensaio do tubo inclinado	2.22
b) Ensaio do tubo vertical	2.23
2.3.7 – Ensaio de medição da viscosidade com o “scissometre”	2.25

CAPÍTULO 3 - CALDAS DE INJECCÃO UTILIZADAS NA OBRA DE CONSTRUÇÃO DA PONTE DE S. JOÃO SOBRE O RIO DOURO E SEUS ACESSOS (DEVESAS-CAMPANHÃ)

3.1 PREÂMBULO	3.1
3.2 SISTEMA E EQUIPAMENTO DE PRÉ-ESFORÇO	3.2
3.2.1 - Sistema de pré-esforço	3.2
a) Ensaio de tracção, em regime estático, do conjunto cabo/ancoragem	3.2
b) Ensaio de tracção, em regime dinâmico, do conjunto cabo/ancoragem	3.3
c) Ensaio de transmissão da carga	3.3
3.2.2 - Equipamento de pré-esforço	3.4
3.3 – TIPOS DE CALDAS UTILIZADAS E SUAS CARACTERÍSTICAS	3.4
3.3.1 – Composição das caldas	3.4
3.3.2 – Elementos constituintes	3.6
a) Água de amassadura	3.6
b) Cimentos	3.6
c) Adjuvantes	3.9

3.3.3 – Equipamento de fabrico	3.13
3.3.4 – Características das caldas	3.13
3.3.4.1 – Quadros elaborados	3.13
3.3.4.2 – Análise dos resultados	3.17

CAPÍTULO 4 – ANÁLISE EXPERIMENTAL – ENSAIOS REALIZADOS NO L.C.P.C. (PARIS) E SUA CONCLUSÕES

4.1 – INTRODUÇÃO	4.1
4.2 - RELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MEDIÇÃO DA FLUIDEZ: ENSAIO DO CONE DE MARSH E ENSAIO DE IMERSÃO	4.2
4.2.1 - Ensaio do cone de Marsh	4.2
4.2.2 - Ensaio de imersão	4.2
4.2.3 - Relação entre os resultados dos ensaios do cone Marsh e do ensaio de imersão	4.4
4.2.4 - Comparação com o ensaio de injectabilidade na coluna de areia	4.7
4.2.4.1 - Escolha da granulometria da areia	4.8
4.2.4.2 - Afição das condições de ensaio com a granulometria escolhida	4.9
4.2.4.3 - Experimentação de diferentes caldas	4.10
4.2.4.4 - Conclusões - comparação dos ensaios	4.13

CAPÍTULO 5 - ANÁLISE EXPERIMENTAL – ENSAIOS REALIZADOS NO L.E.M. - FEUP E SUAS CONCLUSÕES

5.1 - INTRODUÇÃO	5.1
5.2 - CONDIÇÕES DE EXECUÇÃO DO ENSAIO DE INJECTABILIDADE	5.2
5.2.1 - Esquema do ensaio	5.2
5.2.2 - Amassadura da calda	5.4
5.2.3 - Areia calibrada	5.5
5.2.4 - Enchimento da coluna de areia	5.6
5.2.5 - Pressão de injeção	5.6
5.2.6 - Procedimento do ensaio	5.6
5.2.7 - Diferenças relativamente ao ensaio normalizado (NF P 18-891)	5.7
5.3 - TIPOS DE ENSAIOS REALIZADOS E SUA SEQUÊNCIA	5.8
5.4 - ENSAIOS INICIAIS	5.8

5.5 - ENSAIOS INTERMÉDIOS	5.11
5.5.1 - Ensaios de injeção em meio seco/esferas de aço com $\phi = 5,6$ mm	5.12
5.5.2 - Ensaios de injeção em meio húmido/esferas de aço com $\phi = 5,6$ mm	5.13
5.5.3 - Ensaios de injeção em meio húmido/esferas de aço com $\phi = 4$ mm	5.16
5.6 - ENSAIOS FINAIS	5.19
5.7 - ESTUDO ANALÍTICO DAS CURVAS DE CORRELAÇÃO	5.26

CAPÍTULO 6 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DAS CALDAS DE INJEÇÃO

6.1 – INTRODUÇÃO	6.1
6.2 – COMPOSIÇÕES-TIPO A UTILIZAR	6.2
6.3 – ESCOLHA DAS COMPOSIÇÕES A ESTUDAR “REOLOGICAMENTE”	6.2
6.4 – ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DA MISTURADORA	6.6
6.5 – ENSAIOS REOLÓGICOS	6.9
6.5.1 – Viscosímetro Brookfield utilizado	6.9
6.5.2 – Ensaios realizados	6.13
6.5.3 – Análise dos resultados obtidos e respectivas conclusões	6.18
CONSIDERAÇÕES FINAIS	7.1

Índice de Figuras

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Figura 1.1	- Deformação de um prisma elementar por uma força tangencial	1.4
Figura 1.2	- Leis de Hooke e de Newton	1.5
Figura 1.3	- Diagrama reológico	1.8
Figura 1.4	- Diagrama com diferentes comportamentos reológicos de materiais	1.9
Figura 1.5	- Tixotropia e antitixotropia	1.11
Figura 1.6	- Curva de histerese de um material com destruição estrutural sob a acção de corte	1.11
Figura 1.7	- Comportamento tixotrópico de uma suspensão de bentonite	1.13
Figura 1.8	- Momento tursor em função do tempo, para um material que sofre destruição estrutural sob corte	1.14
Figura 1.9	- Líquido newtoniano num tubo capilar	1.15
Figura 1.10	- Relação linear entre Q e P para um líquido newtoniano	1.17
Figura 1.11	- Esquema do viscosímetro de cilindros coaxiais	1.18
Figura 1.12	- Relação linear entre Ω e T para um líquido newtoniano	1.19
Figura 1.13	- Perfis de velocidades de escoamento de fluidos newtonianos e plásticos (binghamianos)	1.23
Figura 1.14	- Equação de Buckingham-Reiner	1.23
Figura 1.15	- Equação de Reiner-Rivlin	1.27
Figura 1.16	- Variação da tensão de cedência e da viscosidade plástica com o tempo de mistura	1.29
Figura 1.17	- Efeito da razão A/C na tensão de cedência e na viscosidade plástica de pastas e caldas de cimento	1.30
Figura 1.18	- Variação da tensão de cedência e da viscosidade plástica com a superfície específica (razão $A/C = 0,50$)	1.31

Figura 1.19 - Efeito da idade e do teor em C_3A na tensão de cedência e na viscosidade plástica	1.33
Figura 1.20 - Efeito dispersante dos plastificantes	1.35
Figura 1.21 - Efeito redutor de água dos plastificantes	1.36
Figura 1.22 - Efeito da concentração de condensado de melamina formaldeído sulfonatado na tensão de cedência e na viscosidade plástica	1.37
Figura 1.23 - Efeito da concentração de condensado de naftaleno formaldeído sulfonatado na tensão de cedência e na viscosidade plástica	1.38
Figura 1.24 - Variação da tensão de cedência e da viscosidade plástica com a substituição de cimento por cinza volante numa pasta com razão A/C inicial de 0,35	1.39
Figura 1.25 - Evolução da viscosidade em função da dosagem de superplastificante e do teor em sílica de fumo	1.40
Figura 1.26 - Dosagem de superplastificante em função do teor em sílica de fumo	1.41

CAPÍTULO 2 - NORMALIZAÇÃO

Figura 2.1 - Cone para o ensaio de fluidez	2.15
Figura 2.2 - Dispositivo para determinação do tempo de imersão	2.16
Figura 2.3 - Esquema do ensaio de injectabilidade na coluna de areia	2.21
Figura 2.4 - Esquema do ensaio do tubo inclinado	2.22
Figura 2.5 - Esquema do ensaio com o "scissometre"	2.25

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE EXPERIMENTAL - ENSAIOS REALIZADOS NO L.C.P.C. (PARIS) E SUAS CONCLUSÕES

Figura 4.1 - Geometria do imersor	4.2
-----------------------------------	-----

CAPÍTULO 5 - ANÁLISE EXPERIMENTAL - ENSAIOS REALIZADOS NO LEM - FEUP E SUAS CONCLUSÕES

Figura 5.1	- Esquema do ensaio de injectabilidade	5.3
Figura 5.2	- Curva granulométrica da “areia calibrada” utilizada	5.5

CAPÍTULO 6 - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DAS CALDAS DE INJECCÃO

Figura 6.1	- Esquema do viscosímetro Brookfield	6.10
Figura 6.2	- Geometria das hastes (rotor) dos viscosímetros Brookfield	6.11
Figura 6.3	- Viscosidade aparente	6.12
Figura 6.4	- Esquema da determinação dos valores relativos dos parâmetros reológicos	6.18
Figura 6.5	- Efeito da escolha da velocidade de deformação angular nos resultados de um ensaio com um só ponto em duas caldas A e B	6.25

-Índice de Gráficos

CAPÍTULO 3 - CALDAS DE INJEÇÃO UTILIZADAS NA OBRA DE CONSTRUÇÃO DA PONTE DE S. JOÃO SOBRE O RIO DOURO E SEUS ACESSOS (DEVESAS - CAMPANHÃ)

Gráfico 3.1 - Valores médios da fluidez das diferentes composições	3.21
Gráfico 3.2 - Valores médios da resistência à compressão das diferentes Composições	3.22
Gráfico 3.3 - Valores médios da exsudação das diferentes composições	3.23

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE EXPERIMENTAL - ENSAIOS REALIZADOS NO L.C.P.C. (PARIS) E SUAS CONCLUSÕES

Gráfico 4.1 - Comparação entre dois ensaios de medição da fluidez das caldas de injeção	4.15
Gráfico 4.2 - Areia seca: tempos de enchimento da coluna/fluidez no cone Marsh	4.16
Gráfico 4.3 - Areia seca: caudal na coluna/fluidez no cone Marsh	4.17
Gráfico 4.4 - Areia seca: tempos de enchimento da coluna/tempos no ensaio de imersão	4.18
Gráfico 4.5 - Areia seca: caudal na coluna/tempos no ensaio de imersão	4.19
Gráfico 4.6 - Areia húmida: tempos de enchimento da coluna/fluidez no cone Marsh	4.20
Gráfico 4.7 - Areia húmida: caudal na coluna/fluidez no cone Marsh	4.21
Gráfico 4.8 - Areia húmida: tempos de enchimento da coluna/tempos no ensaio de imersão	4.22
Gráfico 4.9 - Areia húmida: caudal na coluna/tempos no ensaio de imersão	4.23

CAPÍTULO 5 - ANÁLISE EXPERIMENTAL - ENSAIOS REALIZADOS NO LEM - FEUP E SUAS CONCLUSÕES

Gráfico 5.1 - Ensaios iniciais: variação dos resultados do ensaio de injectabilidade com a pressão de injeção	5.33
Gráfico 5.2 - Ensaios iniciais: características de fluidez e injectabilidade em função da relação A/C	5.34
Gráfico 5.3 - Ensaios iniciais: relação entre a fluidez e a razão A/C	5.35
Gráfico 5.4 - Ensaios iniciais: relação entre a injectabilidade e a razão A/C	5.36
Gráfico 5.5 - Ensaios intermédios/coluna com esferas de aço $\phi = 5,6$ mm; comparação entre dois ensaios de medição da fluidez das caldas	5.37
Gráfico 5.6 - Ensaios intermédios/coluna com esferas de aço $\phi = 5,6$ mm; tempos de enchimento da coluna/fluidez no ensaio do cone	5.38
Gráfico 5.7 - Ensaios intermédios/coluna com esferas de aço $\phi = 5,6$ mm; caudal na coluna/fluidez no ensaio do cone	5.39
Gráfico 5.8 - Ensaios intermédios/coluna com esferas de aço $\phi = 5,6$ mm; tempos de enchimento da coluna/fluidez no ensaio de imersão	5.40
Gráfico 5.9 - Ensaios intermédios/coluna com esferas de aço $\phi = 5,6$ mm; caudal na coluna/fluidez no ensaio de imersão	5.41
Gráfico 5.10 - Ensaios intermédios/coluna com esferas de aço $\phi = 4$ mm; comparação entre dois ensaios de medição da fluidez das caldas	5.42
Gráfico 5.11 - Ensaios intermédios/coluna com esferas de aço $\phi = 4$ mm; tempos de enchimento da coluna/fluidez no ensaio do cone	5.43
Gráfico 5.12 - Ensaios intermédios/coluna com esferas de aço $\phi = 4$ mm; caudal na coluna/fluidez no ensaio do cone	5.44
Gráfico 5.13 - Ensaios intermédios/coluna com esferas de aço $\phi = 4$ mm; tempos de enchimento da coluna/fluidez no ensaio de imersão	5.45
Gráfico 5.14 - Ensaios intermédios/coluna com esferas de aço $\phi = 4$ mm; caudal na coluna/fluidez no ensaio de imersão	5.46
Gráfico 5.15 - Ensaios intermédios: relação entre a exsudação e a razão A/C	5.47

Gráfico 5.16 - Ensaios intermédios: relação entre a fluidez (ensaio de imersão) e a razão A/C	5.48
Gráfico 5.17 - Ensaios finais; comparação entre dois ensaios de medição da fluidez das caldas	5.49
Gráfico 5.18 - Ensaios finais; tempos de enchimento da coluna/fluidez no ensaio do cone	5.50
Gráfico 5.19 - Ensaios finais; caudal na coluna/fluidez no ensaio do cone	5.51
Gráfico 5.20 - Ensaios finais; tempos de enchimento da coluna/fluidez no ensaio de imersão	5.52
Gráfico 5.21 - Ensaios finais; caudal na coluna/fluidez no ensaio de imersão	5.53
Gráfico 5.22 - Ensaios finais; relação entre a exsudação e a razão A/C	5.54
Gráfico 5.23 - Ensaios finais; relação entre a resistência à compressão e a razão A/C	5.55
Gráfico 5.6A - Ensaios intermédios/coluna com esferas de aço $\phi = 5,6$ mm; tempos de enchimento da coluna/fluidez no ensaio do cone. Curva de regressão global	5.56
Gráfico 5.7A - Ensaios intermédios/coluna com esferas de aço $\phi = 5,6$ mm; caudal na coluna/fluidez no ensaio do cone. Curva de regressão global	5.57
Gráfico 5.8A - Ensaios intermédios/coluna com esferas de aço $\phi = 5,6$ mm; tempos de enchimento da coluna/fluidez no ensaio de imersão. Curva de regressão global	5.58
Gráfico 5.9A - Ensaios intermédios/coluna com esferas de aço $\phi = 5,6$ mm; caudal na coluna/fluidez no ensaio de imersão. Curva de regressão global	5.59
Gráfico 5.11A - Ensaios intermédios/coluna com esferas de aço $\phi = 4$ mm; tempos de enchimento da coluna/fluidez no ensaio do cone. Curva de regressão global	5.60

Gráfico 5.12A - Ensaio intermédios/coluna com esferas de aço $\phi = 4$ mm; caudal na coluna/fluidez no ensaio do cone. Curva de regressão global	5.61
Gráfico 5.13A - Ensaio intermédios/coluna com esferas de aço $\phi = 4$ mm; tempos de enchimento da coluna/fluidez no ensaio de imersão. Curva de regressão global	5.62
Gráfico 5.14A - Ensaio intermédios/coluna com esferas de aço $\phi = 4$ mm; caudal na coluna/fluidez no ensaio de imersão. Curva de regressão global	5.63
Gráfico 5.18A - Ensaio finais; tempos de enchimento da coluna/fluidez no ensaio do cone. Curva de regressão global	5.64
Gráfico 5.19A - Ensaio finais; caudal na coluna/fluidez no ensaio do cone. Curva de regressão global	5.65
Gráfico 5.20A - Ensaio finais; tempos de enchimento da coluna/fluidez no ensaio de imersão. Curva de regressão global	5.66
Gráfico 5.21A - Ensaio finais; caudal na coluna/fluidez no ensaio de imersão. Curva de regressão global	5.67
Gráfico 5.23A - Ensaio finais; relação entre a resistência à compressão e a razão A/C. Curvas de regressão global aos 7 e 28 dias	5.68

CAPÍTULO 6 - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DAS CALDAS DE INJECCÃO

Gráfico 6.1 - Relação entre a razão A/C e a fluidez medida no ensaio do cone	6.29
Gráfico 6.2 - Relação entre a razão A/C e a fluidez medida no ensaio de imersão	6.30
Gráfico 6.3 - Selecção das composições a estudar “reologicamente”	6.31
Gráfico 6.4 - Composições seleccionadas: fluidez medida no ensaio do cone	6.32
Gráfico 6.5 - Fluidez no ensaio do cone/fluidez no ensaio de imersão, para diferentes velocidades de rotação da misturadora	6.33
Gráfico 6.6 - Fluidez no ensaio do cone/razão A/C, para diferentes velocidades de rotação da misturadora	6.34

Gráfico 6.7 - Fluidez no ensaio de imersão/razão A/C, para diferentes velocidades de rotação da misturadora	6.35
Gráfico 6.8 - Viscosímetro Brookfield: velocidade de rotação/momento torsor	6.36
Gráfico 6.9 - Valores relativos da tensão de cedência em função da razão A/C	6.37
Gráfico 6.10 - Valores relativos da viscosidade em função da razão A/C	6.38
Gráfico 6.11 - Momento torsor para $\omega = 0,5$ rot./min. em função da razão A/C	6.39
Gráfico 6.12 - Correspondência de fluidez entre composições, no gráfico "valores relativos da tensão de cedência em função da razão A/C"	6.40
Gráfico 6.13 - Correspondência de fluidez entre composições, no gráfico "valores relativos da viscosidade em função da razão A/C"	6.41
Gráfico 6.14 - Correspondência da fluidez entre composições, no gráfico "momento torsor ($\omega = 0,5$ rot./min.) em função da razão A/C"	6.42

ANEXO C - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS REALIZADOS COM O VISCOSÍMETRO BROOKFIELD

Gráfico C.1.1 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala linear) - Composição 1A	C.4
Gráfico C.1.2 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala logarítmica) - Composição 1A	C.5
Gráfico C.2.1 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala linear) - Composição 1B	C.7
Gráfico C.2.2 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala logarítmica) - Composição 1B	C.8
Gráfico C.3.1 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala linear) - Composição 1C	C.10
Gráfico C.3.2 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala logarítmica) - Composição 1C	C.11
Gráfico C.4.1 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala linear) - Composição 1D	C.13

- Gráfico C.4.2 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala logarítmica) - Composição 1D C.14
- Gráfico C.5.1 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala linear) - Composição 2A C.16
- Gráfico C.5.2 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala logarítmica) - Composição 2A C.17
- Gráfico C.6.1 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala linear) - Composição 2B C.19
- Gráfico C.6.2 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala logarítmica) - Composição 2B C.20
- Gráfico C.7.1 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala linear) - Composição 2C C.22
- Gráfico C.7.2 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala logarítmica) - Composição 2C C.23
- Gráfico C.8.1 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala linear) - Composição 2D C.25
- Gráfico C.8.2 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala logarítmica) - Composição 2D C.26
- Gráfico C.9.1 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala linear) - Composição 2E C.28
- Gráfico C.9.2 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala logarítmica) - Composição 2E C.29

Índice de Quadros

CAPÍTULO 3 - CALDAS DE INJECCÃO UTILIZADAS NA OBRA DE CONSTRUÇÃO DA PONTE DE S. JOÃO SOBRE O RIO DOURO E SEUS ACESSOS (DEVESAS - CAMPANHÃ)

Quadro 3.1 - Resumo das composições utilizadas	3.5
Quadro 3.2 - Número de amassaduras de caldas controladas, para injeccão nas bainhas de pré-esforço	3.6
Quadro 3.3 - Boletim de recepção das caldas de cimento para injeccão nas bainhas das armaduras de pré-esforço	3.14
Quadro 3.4 - Boletim dos ensaios de recepção das caldas de injeccão	3.16

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE EXPERIMENTAL - ENSAIOS REALIZADOS NO L.C.P.C. (PARIS) E SUAS CONCLUSÕES

Quadro 4.1a - Comparação entre a medição da fluidez de diferentes caldas de injeccão com o cone de Marsh e com o ensaio de imersão (massa da grenalha de chumbo 200 gr)	4.5
Quadro 4.1b - Comparação entre a medição da fluidez de diferentes caldas de injeccão com o cone de Marsh e com o ensaio de imersão (massa da grenalha de chumbo 200 gr) - continuação	4.6
Quadro 4.1c - Comparação entre a medição da fluidez de diferentes caldas de injeccão com o cone de Marsh e com o ensaio de imersão (massa da grenalha de chumbo 200 gr) - continuação	4.7
Quadro 4.2 - Injeccão da coluna com diferentes granulometrias de areias (pressão de injeccão = 0.75 kgf/cm^2)	4.9
Quadro 4.3a - Injeccão da coluna cheia de areia seca	4.11
Quadro 4.3b - Injeccão da coluna cheia de areia seca – continuação	4.12
Quadro 4.4 - Injeccão da coluna cheia de areia húmida	4.12

CAPÍTULO 5 - ANÁLISE EXPERIMENTAL - ENSAIOS REALIZADOS NO LEM - FEUP E SUAS CONCLUSÕES

Quadro 5.1 - Resultados dos ensaios iniciais de injectabilidade; composição da calda: cimento + água	5.9
Quadro 5.2 - Ensaios intermédios realizados com coluna seca e esferas de $\phi = 5,6$ mm	5.12
Quadro 5.3 - Ensaios intermédios realizados com coluna húmida e esferas de $\phi = 5,6$ mm; composição-tipo da calda: cimento + água	5.14
Quadro 5.4 - Ensaios intermédios realizados com coluna húmida e esferas de $\phi = 5,6$ mm; composição-tipo da calda: cimento + água + 0.6% SK 163	5.15
Quadro 5.5 - Ensaios intermédios realizados com coluna húmida e esferas de $\phi = 5,6$ mm; composição-tipo da calda: cimento + água + 1.5% SK 163	5.15
Quadro 5.6 - Ensaios intermédios realizados com coluna húmida e esferas de $\phi = 5,6$ mm; composição-tipo da calda: cimento + água + 2.5% SK 163	5.15
Quadro 5.7 - Ensaios intermédios realizados com coluna húmida e esferas de $\phi = 4$ mm; composição-tipo da calda: cimento + água	5.17
Quadro 5.8 - Ensaios intermédios realizados com coluna húmida e esferas de $\phi = 4$ mm; composição-tipo da calda: cimento + água + 0,6% SK 163	5.17
Quadro 5.9 - Ensaios intermédios realizados com coluna húmida e esferas de $\phi = 4$ mm; composição-tipo da calda: cimento + água + 1,5% SK 163	5.17
Quadro 5.10 - Ensaios intermédios realizados com coluna húmida e esferas de $\phi = 4$ mm; composição-tipo da calda: cimento + água + 2,5% SK 163	5.18
Quadro 5.11 - Ensaios finais: composição-tipo da calda: cimento + água	5.21

Quadro 5.12 - Ensaio finais: composição-tipo da calda: cimento + água + 0,5% SK163	5.21
Quadro 5.13 - Ensaio finais: composição-tipo da calda: cimento + água + 1.0% SK163	5.21
Quadro 5.14 - Ensaio finais: composição-tipo da calda: cimento + água + 1.5% SK163	5.22
Quadro 5.15 - Ensaio finais: composição-tipo da calda: cimento + água + 2,0% SK163	5.22
Quadro 5.16 - Ensaio finais: composição-tipo da calda: cimento + água + 2,5% SK163	5.22
Quadro 5.17 - Curvas de regressão dos ensaios intermédios	5.28
Quadro 5.18 - Curvas de regressão dos ensaios finais	5.29
Quadro 5.19 - Curvas de regressão globais	5.30

CAPÍTULO 6 - ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DAS CALDAS DE INJECCÃO

Quadro 6.1 - Composição-tipo 1: cimento + água	6.3
Quadro 6.2 - Composição-tipo 2: cimento + água + 2.0% SK 163	6.4
Quadro 6.3 - Composições das caldas escolhidas para realização dos ensaios reológicos	6.6
Quadro 6.4 - Influência da velocidade de rotação da misturadora na fluidez das caldas	6.7
Quadro 6.5 - Viscosímetro Brookfield: velocidades de rotação/momentos torsores	6.15
Quadro 6.6 - Viscosímetro Brookfield: velocidade de rotação/viscosidade aparente	6.16
Quadro 6.7 - Valores relativos da tensão de cedência (T_0) e da viscosidade (μ^*)	6.19

Quadro 6.8 - Composições com idêntica fluidez (ensaio de imersão e ensaio do cone)	6.21
Quadro 6.9 - Correspondência dos valores relativos da tensão de cedência e da viscosidade em caldas com idêntica fluidez (medida pelo ensaio de imersão e pelo ensaio do cone)	6.23

ANEXO A - ESTUDO COMPARATIVO DE NORMALIZAÇÃO SOBRE CALDAS DE INJECCÃO DAS BAINHAS DE PRÉ-ESFORÇO - QUADROS

A1 - ESTUDO COMPARATIVO INICIAL	A.1
Quadro A1.1a - Estudo comparativo inicial de normalização: EN 447 com normalização pré-existente - parte 1	A.2
Quadro A1.1b - Estudo comparativo inicial de normalização: EN 447 com normalização pré-existente - parte 1 (continuação)	A.3
Quadro A1.2a - Estudo comparativo inicial de normalização: EN 447 com normalização pré-existente - parte 2	A.4
Quadro A1.2b - Estudo comparativo inicial de normalização: EN 447 com normalização pré-existente - parte 2 (continuação)	A.5
Quadro A1.3a - Estudo comparativo inicial de normalização: EN 447 com normalização pré-existente - parte 3	A.6
Quadro A1.3b - Estudo comparativo inicial de normalização: EN 447 com normalização pré-existente - parte 3 (continuação)	A.7
Quadro A2.1a - Estudo comparativo inicial de normalização: EN 446 com normalização pré-existente - parte 1	A.8
Quadro A2.1b - Estudo comparativo inicial de normalização: EN 446 com normalização pré-existente - parte 1 (continuação)	A.9
Quadro A2.2a - Estudo comparativo inicial de normalização: EN 446 com normalização pré-existente - parte 2	A.10
Quadro A2.2b - Estudo comparativo inicial de normalização: EN 446 com normalização pré-existente - parte 2 (continuação)	A.11

Quadro A2.3a - Estudo comparativo inicial de normalização:	
EN 446 com normalização pré-existente - parte 3	A.12
Quadro A2.3b - Estudo comparativo inicial de normalização:	
EN 446 com normalização pré-existente - parte 3 (continuação)	A.13
Quadro A2.4a - Estudo comparativo inicial de normalização:	
EN 446 com normalização pré-existente - parte 4	A.14
Quadro A2.4b - Estudo comparativo inicial de normalização:	
EN 446 com normalização pré-existente - parte 4 (continuação)	A.15
Quadro A2.5a - Estudo comparativo inicial de normalização:	
EN 446 com normalização pré-existente - parte 5	A.16
Quadro A2.5b - Estudo comparativo inicial de normalização:	
EN 446 com normalização pré-existente - parte 5 (continuação)	A.17
Quadro A2.6a - Estudo comparativo inicial de normalização:	
EN 446 com normalização pré-existente - parte 6	A.18
Quadro A2.6b - Estudo comparativo inicial de normalização:	
EN 446 com normalização pré-existente - parte 6 (continuação)	A.19
Quadro A2.7a - Estudo comparativo inicial de normalização:	
EN 446 com normalização pré-existente - parte 7	A.20
Quadro A2.7b - Estudo comparativo inicial de normalização:	
EN 446 com normalização pré-existente - parte 7 (continuação)	A.21
Quadro A2.8a - Estudo comparativo inicial de normalização:	
EN 446 com normalização pré-existente - parte 8	A.22
Quadro A2.8b - Estudo comparativo inicial de normalização:	
EN 446 com normalização pré-existente - parte 8 (continuação)	A.23
Quadro A2.9a - Estudo comparativo inicial de normalização:	
EN 446 com normalização pré-existente - parte 93	A.24
Quadro A2.9b - Estudo comparativo inicial de normalização:	
EN 446 com normalização pré-existente - parte 9 (continuação)	A.25

A2 - ESTUDO COMPARATIVO POSTERIOR	A.27
Quadro A3.1 - Estudo comparativo posterior de normalização: Boletim nº 20 da FIB com normalização pré-existente - parte 1	A.28
Quadro A3.2 - Estudo comparativo posterior de normalização: Boletim nº 20 da FIB com normalização pré-existente - parte 2	A.29
Quadro A3.3 - Estudo comparativo posterior de normalização: Boletim nº 20 da FIB com normalização pré-existente - parte 3	A.30
Quadro A3.4 - Estudo comparativo posterior de normalização: Boletim nº 20 da FIB com normalização pré-existente - parte 4	A.31
Quadro A3.5 - Estudo comparativo posterior de normalização: Boletim nº 20 da FIB com normalização pré-existente - parte 5	A.32
Quadro A3.6 - Estudo comparativo posterior de normalização: Boletim nº 20 da FIB com normalização pré-existente - parte 6	A.33
Quadro A3.7 - Estudo comparativo posterior de normalização: Boletim nº 20 da FIB com normalização pré-existente - parte 7	A.34
Quadro A3.8 - Estudo comparativo posterior de normalização: Boletim nº 20 da FIB com normalização pré-existente - parte 8	A.35
Quadro A3.9 - Estudo comparativo posterior de normalização: Boletim nº 20 da FIB com normalização pré-existente - parte 9	A.36
Quadro A3.10 - Estudo comparativo posterior de normalização: Boletim nº 20 da FIB com normalização pré-existente-parte 10	A.37
Quadro A3.11 - Estudo comparativo posterior de normalização: Boletim nº 20 da FIB com normalização pré-existente-parte 11	A.38
Quadro A3.12 - Estudo comparativo posterior de normalização: Boletim nº 20 da FIB com normalização pré-existente-parte 12	A.39
Quadro A3.13 - Estudo comparativo posterior de normalização: Boletim nº 20 da FIB com normalização pré-existente-parte 13	A.40
Quadro A3.14 - Estudo comparativo posterior de normalização: Boletim nº 20 da FIB com normalização pré-existente-Parte 14	A.41

**ANEXO B - CALDAS DE INJEÇÃO UTILIZADAS NA OBRA DE
CONSTRUÇÃO DA PONTE DE S. JOÃO SOBRE O RIO DOURO E SEUS
ACESSOS (DEVESAS - CAMPANHÃ) - BOLETINS DE RECEPÇÃO E ENSAIO
E RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS**

B1 - BOLETINS DE RECEPÇÃO E ENSAIO DAS CALDAS	B.1
Quadro B1.1.1a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 1.1	B.5
Quadro B1.1.2a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 1.2	B.6
Quadro B1.1.3a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 1.3	B.7
Quadro B1.1.4a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 1.4	B.8
Quadro B1.2.1a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 2.1	B.11
Quadro B1.2.2a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 2.2	B.12
Quadro B1.2.2b - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 2.2 - continuação	B.13
Quadro B1.2.2c - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 2.2 - continuação	B.14
Quadro B1.2.2d - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 2.2 - continuação	B.15
Quadro B1.2.3a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 2.3	B.16
Quadro B1.2.3b - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 2.3 - continuação	B.17
Quadro B1.2.3c - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 2.3 - continuação	B.18
Quadro B1.2.4a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 2.4	B.19
Quadro B1.2.4b - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 2.4 - continuação	B.20
Quadro B1.2.4c - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 2.4 - continuação	B.21
Quadro B1.2.5a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 2.5	B.22
Quadro B1.3.1a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 3.1	B.25

Quadro B1.3.2a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 3.2	B.26
Quadro B1.3.2b - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 3.2 - continuação	B.27
Quadro B1.3.3a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 3.3	B.28
Quadro B1.3.3b - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 3.3 - continuação	B.29
Quadro B1.3.4a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 3.4	B.30
Quadro B1.4.1a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 4.1	B.33
Quadro B1.4.2a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 4.2	B.34
Quadro B1.4.3a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 4.3	B.35
Quadro B1.4.4a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 4.4	B.36
Quadro B1.4.4b - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 4.4 - continuação	B.37
Quadro B1.4.4c - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 4.4 - continuação	B.38
Quadro B1.4.4d - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 4.4 - continuação	B.39
Quadro B1.4.4e - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 4.4 - continuação	B.40
Quadro B1.4.4f - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 4.4 - continuação	B.41
Quadro B1.4.5a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 4.5	B.42
Quadro B1.4.6a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 4.6	B.43
Quadro B1.4.6b - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 4.6 - continuação	B.44
Quadro B1.4.7a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 4.7	B.45
Quadro B1.4.8a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 4.8	B.46
Quadro B1.4.9a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 4.9	B.47

Quadro B1.5.1a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 5.1	B.51
Quadro B1.5.2a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 5.2	B.52
Quadro B1.5.3a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 5.3	B.53
Quadro B1.6.1a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 6.1	B.57
Quadro B1.7.1a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.1	B.61
Quadro B1.7.2a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.2	B.62
Quadro B1.7.2b - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.2 - continuação	B.63
Quadro B1.7.2c - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.2 - continuação	B.64
Quadro B1.7.2d - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.2 - continuação	B.65
Quadro B1.7.2e - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.2 - continuação	B.66
Quadro B1.7.2f - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.2 - continuação	B.67
Quadro B1.7.2g - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.2 -continuação	B.68
Quadro B1.7.2h - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.2 - continuação	B.69
Quadro B1.7.3a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.3	B.70
Quadro B1.7.4a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.4	B.71
Quadro B1.7.4b - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.4 - continuação	B.72
Quadro B1.7.4c - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.4 - continuação	B.73
Quadro B1.7.4d - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.4 - continuação	B.74

Quadro B1.7.4e - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.4 - continuação	B.75
Quadro B1.7.4f - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.4 - continuação	B.76
Quadro B1.7.4g - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.4 - continuação	B.77
Quadro B1.7.4h - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.4 - continuação	B.78
Quadro B1.7.4i - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.4 - continuação	B.79
Quadro B1.7.4j - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.4 - continuação	B.80
Quadro B1.7.4k - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.4 - continuação	B.81
Quadro B1.7.4l - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.4 - continuação	B.82
Quadro B1.7.4m - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.4 - continuação	B.83
Quadro B1.7.4n - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.4 - continuação	B.84
Quadro B1.7.4o - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.4 - continuação	B.85
Quadro B1.7.4p - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.4 - continuação	B.86
Quadro B1.7.4q - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.4 - continuação	B.87
Quadro B1.7.4r - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.4 - continuação	B.88
Quadro B1.7.5a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.5	B.89

Quadro B1.7.5b - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.5 - continuação	B.90
Quadro B1.7.5c - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.5 - continuação	B.91
Quadro B1.7.6a - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.6	B.92
Quadro B1.7.6b - Boletim de recepção e ensaio das caldas/composição nº 7.6 - continuação	B.93
B2 - RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DAS CALDAS	B.95
Quadro B2.1 - Quadro resumo das características das caldas - composições 1	B.97
Quadro B2.2 - Quadro resumo das características das caldas - composições 2	B.98
Quadro B2.3 - Quadro resumo das características das caldas - composições 3	B.99
Quadro B2.4 - Quadro resumo das características das caldas - composições 4	B.100
Quadro B2.5 - Quadro resumo das características das caldas - composições 5	B.101
Quadro B2.6 - Quadro resumo das características das caldas - composições 6	B.102
Quadro B2.7 - Quadro resumo das características das caldas - composições 7	B.103

ANEXO C - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS REALIZADOS COM O VISCOSÍMETRO BROOKFIELD

Quadro C.1 - Viscosímetro Brookfield - Quadro de resultados: Composição 1A	C.3
Quadro C.2 - Viscosímetro Brookfield - Quadro de resultados: Composição 1B	C.6
Quadro C.3 - Viscosímetro Brookfield - Quadro de resultados: Composição 1C	C.9
Quadro C.4 - Viscosímetro Brookfield - Quadro de resultados: Composição 1D	C.12
Quadro C.5 - Viscosímetro Brookfield - Quadro de resultados: Composição 2A	C.15
Quadro C.6 - Viscosímetro Brookfield - Quadro de resultados: Composição 2B	C.18
Quadro C.7 - Viscosímetro Brookfield - Quadro de resultados: Composição 2C	C.21
Quadro C.8 - Viscosímetro Brookfield - Quadro de resultados: Composição 2D	C.24
Quadro C.9 - Viscosímetro Brookfield - Quadro de resultados: Composição 2E	C.27

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O autor deste trabalho acompanhou de perto a execução da obra de construção da nova ponte ferroviária sobre o rio Douro no Porto - Ponte de S. João - e todos os seus acessos entre as estações das Devesas (V.N. Gaia) e Campanhã (Porto), entre o final do ano de 1984 e meados de 1991, integrado na equipa da fiscalização, sendo responsável pela parte do controlo laboratorial.

Este controlo abrangeu fundamentalmente materiais de construção estruturais, como os betões de ligantes hidráulicos e seus componentes (cimentos, agregados, água, adjuvantes), aços das armaduras ordinárias para betão armado e para as armaduras de pré-esforço e ainda caldas de injeção cimentícias, utilizadas para diversos fins (enchimento das bainhas de pré-esforço, selagem de pregos de fundação, reparação de defeitos de betonagem, etc). Para além deste controlo mais intenso em termos de quantidade de ensaios realizados com carácter sistemático, foi também feito controlo de uma grande diversidade de outros materiais, mas não em tão grande quantidade de ensaios e em regra não realizados tão sistematicamente.

Mereceu desde o início uma atenção especial por parte do autor deste trabalho o controlo das caldas de injeção das bainhas de pré-esforço, por um conjunto de razões que se poderão resumir no seguinte:

1º) A importância do papel desempenhado por estas caldas principalmente como garante da protecção das armaduras de pré-esforço contra a corrosão e por conseguinte da sua durabilidade. Esta importância estava já na altura (1985 - ano da primeira injeção na obra) realçada pelo conhecimento de que nalguns países onde se haviam realizado campanhas de inspecção às bainhas e cabos de pré-esforço, se ter verificado em diversas obras que os resultados eram insatisfatórios por revelarem uma proporção não desprezável de bainhas imperfeitamente preenchidas ou quase vazias em comprimentos importantes.

2º) A pouca importância que nessa altura era dada a esta questão em Portugal. De facto, a regulamentação portuguesa sobre este assunto vigente na altura, o REBAP e o RBLH, poucas indicações continha sobre caldas de injeção, particularmente quanto às suas

características, para além da resistência à compressão. Quanto às técnicas e procedimentos de injeção, o REBAP já continha indicações que se podiam considerar minimamente satisfatórias. Como reflexo desta pouca importância dada na regulamentação portuguesa às caldas de injeção, os cadernos de encargos portugueses dessa época também poucas indicações continham quanto a este assunto.

Por esta razão, houve a necessidade de ter acesso e fazer o estudo de regulamentação de outros países para se poder efectuar o controlo destas caldas. Nessa altura foi tido em conta a regulamentação espanhola e francesa sobre caldas de injeção:

- Recomendaciones para la ejecución y control de la inyección - Asociación técnica española del pretensado (Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento), Set. 1974.

- Directive Provisoire sur les injections des gaines des ouvrages en béton précontraint - Ministère de L'Amenagement du Territoire, de L'Equipement, du Logement et du Tourisme (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes - SETRA/Laboratoire Central des Ponts et Chaussées - LCPC), Março 1973.

3º) O quase total desconhecimento do autor deste trabalho quanto às características que as caldas deveriam apresentar (para além da resistência à compressão) e das técnicas de injeção das bainhas.

Este desconhecimento constituiu uma motivação acrescida para o estudo da documentação disponível e para o acompanhamento de perto das injeções iniciais das bainhas de pré-esforço, de modo a ter o conhecimento das técnicas e procedimentos de injeção e consequentemente dos condicionalismos com reflexos nas características das caldas.

No decurso do acompanhamento nesta obra do controlo das caldas e da sua injeção nas bainhas de pré-esforço, e na sequência da mudança do adjuvante utilizado na composição das caldas, verificou-se uma alteração significativa nas características das mesmas.

De facto, as caldas inicialmente aplicadas, com determinada injectabilidade, possuíam características satisfatórias, com excepção da exsudação que era elevada, ultrapassando com alguma frequência o limite estabelecido internacionalmente. Após a mudança do

adjuvante (de expansivo para retentor de água), verificou-se que as caldas melhoraram no que respeita à exsudação, que passou a ser nula, mas diminuíram as suas resistências mecânicas, ficando embora ainda acima dos limites para elas estabelecidos. Porém, a fluidez medida pelo cone de Marsh apresentava valores que à luz da normalização internacional vigente levaria à não aplicação destas caldas por se considerarem não adequadamente injectáveis. Ora verificou-se que estas caldas eram igualmente injectáveis como as iniciais. Aliás o estudo da composição das caldas foi sempre afinado de modo a estar-se no limite inferior de injectabilidade, melhorando-se assim o mais possível as restantes características das caldas.

Esta constatação veio pôr em dúvida se a fluidez medida pelo ensaio do cone de Marsh mede convenientemente a injectabilidade das caldas nas bainhas de pré-esforço, ou se só nalgumas condições é que o faz, e ainda se haverá outros métodos de ensaio mais indicados para o efeito.

A procura de resposta a estas questões constituiu o objectivo principal deste trabalho.

No Capítulo 1 deste trabalho é inicialmente feito o enquadramento das injeções nas obras de betão pré-esforçado e são indicadas as funções principais destas caldas e as correspondentes características para esse efeito. Para proporcionar um enquadramento teórico ao presente trabalho é feito neste capítulo uma abordagem da reologia das caldas de cimento, começando pela caracterização dos diferentes comportamentos dos materiais, particularizando, posteriormente, para os fluidos newtonianos e binghamianos os processos de determinação dos respectivos parâmetros reológicos. No final do capítulo, e para permitir uma melhor interpretação dos resultados obtidos neste trabalho, é feito um resumo da análise dos efeitos nos parâmetros reológicos das caldas de cimento da variação de alguns factores como as condições de amassadura, a concentração da mistura, a finura e composição do cimento, a utilização de adjuvantes e a utilização de adições (cinzas volantes e sílica de fumo).

No Capítulo 2 é feito um estudo comparativo da normalização inicial de alguns países sobre as caldas de injeção das bainhas de pré-esforço, tendo como base de comparação a estrutura da normalização europeia actual sobre especificações para caldas de injeção correntes e sobre procedimentos para injeção. Este estudo comparativo inicial é

No Capítulo 6 é feito um estudo experimental de caracterização reológica das caldas de injeção das bainhas de pré-esforço, através de ensaios num viscosímetro “Brookfield”, de modo a permitir uma melhor compreensão e o reforço das conclusões obtidas nos Capítulos 4 e 5.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 - GENERALIDADES

Nas estruturas de betão pré-esforçado pós-tensionado, as armaduras de pré-esforço são normalmente constituídas por cordões de aço (strands) associados, formando cabos, que são colocados nas estruturas dentro de bainhas posicionadas previamente à betonagem cumprindo as cotas dos traçados dos cabos de pré-esforço, constantes dos respectivos projectos.

Pouco tempo após a betonagem (correntemente de 1 a 3 dias) é aplicado o pré-esforço, ficando os cabos tensionados na sua posição final dentro das bainhas. Após esta operação, e normalmente no prazo máximo de uma semana, é injectada uma calda nas bainhas para protecção das armaduras de pré-esforço. Estas caldas são uma mistura de cimento e água, de carácter coloidal (suspensão), com ou sem adjuvantes, mas sempre com fluidez suficiente para serem injectadas nas bainhas que contêm as armaduras.

Os objectivos principais da injeção são:

- a) Encher completamente o espaço existente entre a bainha e as armaduras de pré-esforço, a fim de protegê-las da corrosão. A capacidade de passivação do cimento é uma boa garantia contra a oxidação - a água nos poros capilares está saturada em Ca(OH)_2 , com um $\text{pH} \cong 12,5$; com valores de pH entre 9 e 13 não há praticamente perigo de corrosão.
- b) Estabelecer a aderência entre as armaduras de pré-esforço e a bainha e consequentemente com o betão que envolve a bainha.

(Um terceiro efeito da injeção é que, por enchimento de todas as bainhas com calda, o risco de congelamento da água aprisionada é evitado).

Os cordões ou cabos de aço de pré-esforço alojados em bainhas no interior do betão têm assegurada a sua protecção, em parte pelo próprio betão da peça e por outro lado pela injeção que deve encher totalmente as bainhas.

O estabelecimento da aderência proporciona uma distribuição mais uniforme de eventuais fissuras e melhora a resistência à rotura das peças submetidas a flexão, evitando também flutuações de tensão do aço nas ancoragens.

Em geral empregam-se caldas de cimento, cujos componentes são cimento, água e por vezes adjuvantes. Nos casos em que a secção das bainhas é excepcionalmente grande ($\phi > 15$ cm), poderão utilizar-se argamassas de injeção. Para serem injectáveis, estas argamassas têm baixas percentagens de areia, que não ultrapassam, normalmente, 30% da massa de cimento. Porém, em condições normais, não se recomenda a utilização de argamassas, dada a maior dificuldade em se conseguir com elas uma injeção correcta, uma vez que, apesar de se reduzir a retracção, aumenta-se o risco de entupimento da bainha enquanto se injecta. De facto verifica-se ser muito rara a sua aplicação para este fim.

Para desempenharem convenientemente o seu papel, é necessário que as caldas de injeção respeitem certas condições. Em particular é-lhes solicitado que devem reunir as seguintes características:

- a) Facilidade de colocação em obra - boa injectabilidade: fluidez suficiente para facilmente penetrar nas bainhas e envolver as armaduras.
- b) Estabilidade da mistura: que não haja separação das duas fases e baixa retracção (caso exista). A estabilidade da calda é avaliada pela exsudação e pela variação de volume.
- c) Resistência mecânica adequada, de modo a assegurar a aderência entre as armaduras de pré-esforço e o betão que envolve a bainha.

Recomenda-se que a consistência da calda seja a máxima compatível com a injectabilidade. O aumento da fluidez da calda tem vantagens e inconvenientes. Ao aumentar a fluidez, aumentam-se os seguintes fenómenos nocivos:

- Exsudação da água, com perigo de corrosão das armaduras e do seu eventual congelamento.
- Diminuição de volume da pasta de cimento, com perigo de corrosão nos pontos altos do traçado dos cabos.
- Diminuição da resistência, com perigo para a aderência.

Por outro lado, ao aumentar a fluidez obtêm-se as seguintes vantagens:

- Maior penetrabilidade da calda.
- Menor probabilidade de entupimento da injeção com a formação de tampões.

No entanto, a injeção das bainhas de pré-esforço não é a única utilização destas caldas, sendo múltiplas as suas aplicações. Podem ser utilizadas para a injeção de solos, de rochas, de betões deteriorados com grandes vazios, para selagem de equipamentos e em todos os casos em que se têm que encher vazios. Naturalmente que a formulação das caldas deverá em cada caso ter em conta a dimensão dos vazios a encher.

De modo a proporcionar um enquadramento teórico ao trabalho da presente tese e para permitir uma melhor interpretação dos resultados obtidos, far-se-á, de seguida, uma abordagem da reologia das caldas de cimento.

1.2 – REOLOGIA DAS CALDAS E PASTAS DE CIMENTO

1.2.1 – Introdução

Definindo a reologia de um modo mais alargado como a “ciência que estuda a deformação e o escoamento da matéria” [1], poderiam incluir-se nela estudos muito diversos como a hidrodinâmica e a aerodinâmica, que não são normalmente consideradas como seu objecto. Porém, na prática a reologia estuda os materiais cujas leis de deformação são mais complexas do que as de um sólido elástico ideal ou de um fluido simples, devendo-se salientar que um material pode ter um comportamento simples sob um conjunto restrito de condições, tornando-se muito mais complexo quando sujeito a outras condições.

Muitos materiais com interesse industrial comportam-se de um modo que caem dentro do âmbito da reologia, estando neste caso as caldas de injeção, quer quando ainda frescas, quer quando já no estado endurecido.

1.2.2 – Noção de viscosidade; fluidos newtonianos

Ao aplicar os princípios e técnicas da reologia às caldas e pastas de cimento, e também aos betões de que as pastas fazem parte, é costume começar pelo estudo de materiais cujo comportamento pode ser descrito por relações muito simples.

Considerando, assim, um prisma rectangular de material elástico ideal, representado na Figura 1.1, submetido ao par de forças F aplicadas tangencialmente às faces opostas do prisma, com área A , verifica-se que a correspondente deformação, representada pelo ângulo γ , obedece à lei de Hooke:

$$\tau = \frac{F}{A} = G \cdot \gamma, \quad (1.1)$$

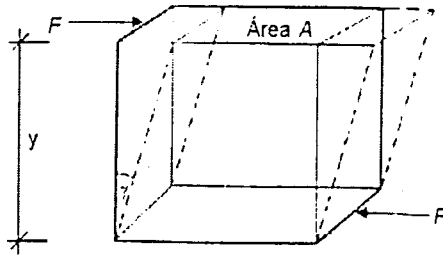


Figura 1.1 - Deformação de um prisma elementar por uma força tangencial.

Por conseguinte, a tensão de corte τ é directamente proporcional à deformação por corte ou distorção γ , sendo a constante de proporcionalidade o módulo de distorção ou módulo de elasticidade transversal.

Imaginando o mesmo prisma rectangular, mas constituído por um líquido simples, submetido a um par semelhante de forças F , com $\tau = \frac{F}{A}$, corresponder-lhe-ia uma deformação contínua, caracterizada pelo acréscimo de deformação angular no tempo, obedecendo à lei de Newton:

$$\tau = \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt}, \quad (1.2)$$

isto é, a tensão de corte τ é directamente proporcional à velocidade de deformação angular, sendo a constante de proporcionalidade η designada por coeficiente de viscosidade. Os fluidos que obedecem a esta lei designam-se por fluidos Newtonianos.

Estas duas leis encontram-se representadas graficamente na Figura 1.2, verificando-se grande semelhança entre elas.

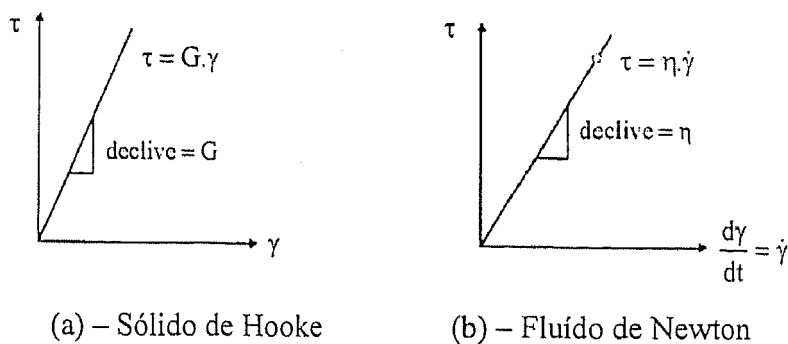


Figura 1.2 – Leis de Hooke e de Newton.

A viscosidade está, portanto, relacionada com a resistência à deformação dos fluidos quando em movimento, não se manifestando se o fluido se encontrar em repouso.

É evidente que não se pode experimentar directamente a deformação de um prisma rectangular de líquido como se imaginou, mas pode-se considerar uma massa fluida em movimento confinada entre dois planos paralelos, tendo estes um movimento no seu próprio plano, sendo lento o movimento relativo dos dois planos, a que corresponde um escoamento laminar do líquido em causa. Esta designação resulta de se ter verificado ser possível neste regime individualizar camadas de fluido (lâminas) que deslizam umas sobre as outras [2]. Newton verificou experimentalmente que a interacção entre os dois planos é uma força tangencial F cuja intensidade é (no caso dos fluidos Newtonianos) proporcional à área A e ao gradiente de velocidades segundo a normal (proporcional à velocidade v e inversamente proporcional à distância entre os planos y):

$$F = \eta A \cdot \frac{dv}{dy}, \quad \text{ou}$$

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}, \quad (1.3)$$

sendo η a mesma constante de proporcionalidade, designada por coeficiente de viscosidade. De facto, o gradiente de velocidades na normal comum às duas superfícies dv/dy é numericamente igual à velocidade de deformação angular dy/dt .

dv/dy é numericamente igual à velocidade de deformação angular dy/dt [2] e portanto a lei de Newton que rege a deformação de meios viscosos pode-se escrever:

$$\tau = \eta \frac{dy}{dt} = \eta \frac{dv}{dy}, \text{ ou}$$

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (1.4)$$

As dimensões da tensão são $ML^{-1} T^{-2}$, sendo expressa no sistema internacional por $N/m^2 = Pa$. As dimensões da velocidade de deformação angular são T^{-1} , expressa nas unidades s^{-1} . Assim, o coeficiente de viscosidade η tem as dimensões $ML^{-1} T^{-1}$, sendo expresso nas unidades $N.s/m^2 = Pa.s$. Refere-se que a unidade de viscosidade no sistema C.G.S. é o poise ($dine \times s/cm^2$), em homenagem a Poiseuille, usando-se ainda com frequência um seu submúltiplo, o centipoise (10^{-2} poises). Assim, um material que necessite de uma tensão tangencial de 1 MPa para produzir uma velocidade de deformação de $1s^{-1}$, tem uma viscosidade de $1Pa.s = 10$ poises.

Um fluido diz-se, portanto, newtoniano ou de viscosidade newtoniana quando existe uma relação linear de proporcionalidade directa entre as tensões tangenciais aplicadas e a velocidade de deformação angular; se essa relação não for puramente linear, o fluido diz-se não-newtoniano ou de viscosidade não-newtoniana. No caso ideal de $\eta = 0$, obtém-se o fluido perfeito (de Pascal). Na realidade não existem fluidos deste tipo, apenas podendo ocorrer situações em que a viscosidade se torne desprezável.

O coeficiente de viscosidade deve ser definido em condições bem determinadas de temperatura, sendo a influência da pressão praticamente desprezável. A uma maior temperatura corresponde uma diminuição do coeficiente de viscosidade dos líquidos. A título de exemplo refere-se a fórmula de Poiseuille obtida para a água[2]:

$$\eta(\text{centipoise}) = \frac{1,78}{1 + 0,0337 \cdot \theta + 0,000221 \cdot \theta^2} \quad (1.5)$$

sendo θ a temperatura da água expressa em graus centígrados.

As suspensões de muito baixa concentração, caso particular das caldas de injeção muito diluídas (relação água/cimento em massa superior a valores da ordem de 5), podem ainda ser consideradas como fluidos newtonianos, cuja viscosidade η é função da viscosidade η_0 do líquido (newtoniano) e da concentração em volume C_v da suspensão.

A concentração volúmica em material sólido C_v é definida pela relação

$$C_v = \frac{V_s}{V_s + V_l} \quad (1.6)$$

com V_s - volume da fase sólida

e V_l - volume de líquido.

Para as suspensões em água, a concentração volúmica e o teor em água A/C estão relacionados pelas equações simples seguintes:

$$C_v = \frac{1}{\frac{\gamma_s}{\gamma_a} \cdot \frac{A}{C} + 1} \quad (1.7)$$

e

$$A/C = \frac{\frac{1}{C_v} - 1}{\frac{\gamma_s}{\gamma_a}} \quad (1.8)$$

com A/C - razão da massa de água sobre a massa da fase sólida;

γ_s - massa volúmica da fase sólida;

γ_a - massa volúmica da água.

Einstein estabeleceu em 1906 a expressão $\eta = \eta_0 + 1,25 C_v$, que é válida para partículas de forma esférica, que não têm acções entre si, em suspensões de baixa concentração ($C_v \leq 0,05$) [3,4]. Inúmeras modificações foram posteriormente sendo propostas a esta fórmula, tendo em conta a forma das partículas, a presença ou ausência de movimentos brownianos, etc.. Porém, está-se longe da sua aplicabilidade às suspensões de maior concentração a que correspondem as caldas de injeção utilizadas na construção, em particular as caldas utilizadas na injeção das bainhas de pré-esforço, com valores correntes de A/C da ordem de 0,35 a 0,40, a que correspondem valores de C_v de cerca de 0,48 a 0,44 (para γ_s do cimento de $3,15 \text{ g/cm}^3$), muito superiores ao valor limite máximo indicado de 0,05.

Para além deste facto, verifica-se que caldas com maior concentração volúmica deixam de se comportar como fluídos newtonianos, tendo um comportamento reológico mais complexo.

1.2.3 – Fluidos não-newtonianos

Num fluido newtoniano a relação entre a tensão tangencial τ e a velocidade da deformação angular $\dot{\gamma}$ é sempre constante (coeficiente de viscosidade η), sendo utilizada como uma constante física característica do material. No entanto, sendo este o comportamento mais simples de um fluido, há muitos materiais com interesse industrial que não têm este comportamento.

Designando-se por diagrama reológico uma representação gráfica que traduz a relação entre as tensões tangenciais e as velocidades de deformação angular, apresenta-se na Figura 1.3 um diagrama reológico com comportamentos reológicos diversos, correspondentes a diferentes materiais [2].

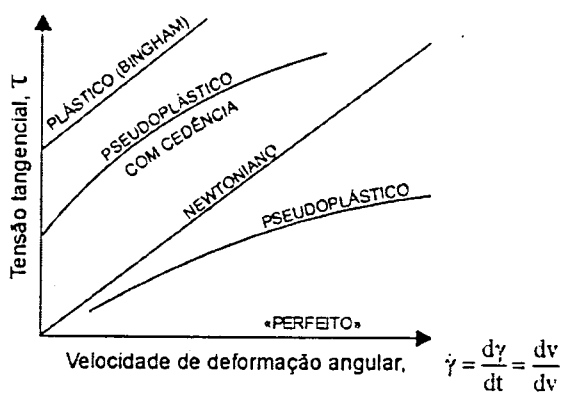


Figura 1.3 - Diagrama reológico.

Neste diagrama encontram-se assinaladas:

- A recta correspondente aos fluidos perfeitos, coincidente com o eixo das abcissas: $\tau = 0$;
- A recta correspondente aos fluidos newtonianos: $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$
- A linha quebrada referente aos meios plásticos, ou de Bingham, com um primeiro trecho coincidente com o eixo das ordenadas, traduzindo a tensão tangencial que estes corpos podem suportar sem fluir, e um trecho com uma certa inclinação traduzindo a fluência para tensões superiores a este limite

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (1.9)$$

d) Curva correspondente a fluidos não newtonianos designados por pseudo-plásticos:

$$\tau = k(\dot{\gamma})^n \quad (1.10)$$

e) Curva correspondente a fluidos não newtonianos designados por pseudo-plásticos com cedência:

$$\tau = \tau_0 + k \cdot (\dot{\gamma})^n \quad (1.11)$$

É frequente fazer a distinção nos fluidos pseudo-plásticos, tanto sem cedência ($\tau = k(\dot{\gamma})^n$) como com cedência ($\tau = \tau_0 + k \cdot (\dot{\gamma})^n$) entre o comportamento “fluidificante”, quando n é inferior a 1 e o comportamento “espassante”, quando n é superior a 1, encontrando-se as respectivas curvas representadas no diagrama reológico da Figura 1.4. O comportamento “espassante” é por vezes acompanhado, nem sempre, por comportamento dilatante, isto é, por aumento de volume quando se deforma (rearranjo das partículas).

Também é habitual fazer a distinção entre fluidos “exclusivamente viscosos”, quando o escoamento se verifica desde que haja uma tensão tangencial não nula, e os fluidos “visco-plásticos”, quando o escoamento só se produz quando a tensão ultrapassa um determinado valor chamado “tensão de cedência”. Na Figura 1.4 encontram-se representados esquematicamente todos estes tipos de comportamento referidos [4].

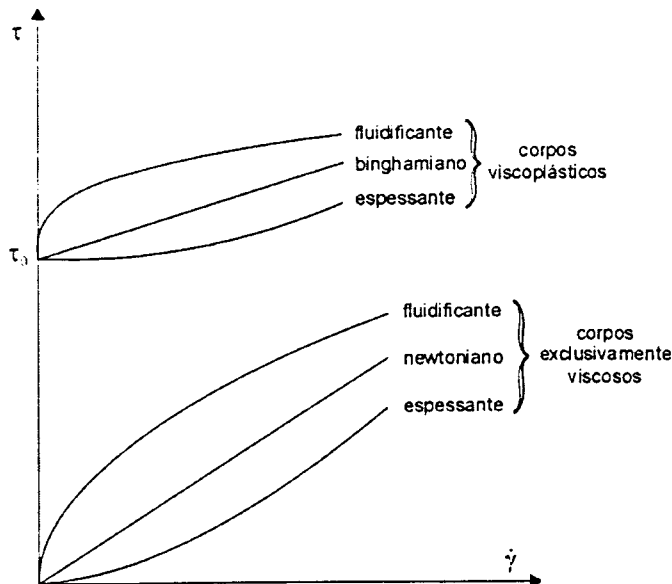


Figura 1.4 - Diagrama com diferentes comportamentos reológicos de materiais.

Como já foi referido anteriormente, as suspensões, em particular as de cimento em água, quando em percentagens muito baixas (baixas concentrações volúmicas), podem ainda ser consideradas como fluidos newtonianos, sendo a viscosidade função da viscosidade do líquido e da concentração volúmica em material sólido. No entanto, muitas das suspensões de elevada concentração de partículas sólidas num meio líquido, nas quais se incluem as caldas de injeção correntes das bainhas de pré-esforço, seguem aproximadamente a lei de Bingham relativa aos fluidos plásticos (1.9):

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma}$$

onde μ é designado por coeficiente de viscosidade plástico, expresso nas mesmas unidades do coeficiente de viscosidade η e τ_0 é designada por tensão tangencial de cedência.

Os fluidos plásticos são, por conseguinte, caracterizados por estes valores: coeficiente de viscosidade plástico e tensão tangencial de cedência, designados por “constantes reológicas” ou “parâmetros reológicos”.

Verifica-se que também as pastas de cimento e os betões, quando frescos, obedecem a esta mesma lei de comportamento (plástico ou de Bingham).

1.2.4 Tixotropia e anti-tixotropia

Até agora apenas se analisou a relação entre as tensões tangenciais τ e a velocidade de deformação $\dot{\gamma}$ a que correspondem determinadas “constantes reológicas”. Acontece que quando se considera o elemento tempo, se verifica que há substâncias cuja relação entre τ e $\dot{\gamma}$ pode variar, sendo dependente da “história anterior” da substância, isto é, das tensões a que esteve submetida previamente [2].

Depois de ter ultrapassado a tensão de cedência τ_0 o material começa a escoar-se. Se o esforço necessário para manter o escoamento constante diminui com o tempo (ou se o escoamento se acelera no tempo com um esforço constante), o material diz-se tixotrópico se este fenómeno for reversível [5]. Caso contrário, isto é, se o esforço para manter o escoamento constante aumenta com o tempo, o material diz-se anti-tixotrópico se o fenómeno for também reversível. Estes comportamentos estão esquematizados na Figura 1.5, fazendo parte da sua definição a indicação de que se tratam de fenómenos reversíveis [5].

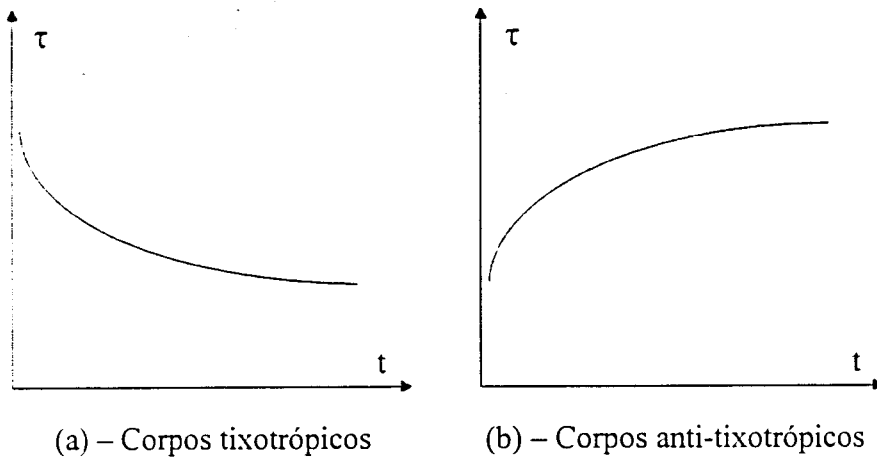


Figura 1.5 - Tixotropia e antitixotropia.

Seguidamente ir-se-á analisar qual o reflexo deste comportamento de alguns materiais no respectivo diagrama reológico τ ; $\dot{\gamma}$.

Merece análise prévia a curva de comportamento fluidificante correspondente quer a materiais exclusivamente viscosos quer a materiais viscoplásticos. Estes materiais apresentam uma curva côncava em relação ao eixo das velocidades de deformação (Figura 1-6 – parte ABC da curva), com uma diminuição do declive de tangente à curva para valores crescentes de τ ou $\dot{\gamma}$, a que corresponde uma diminuição de “viscosidade instantânea” do material. Isto deve-se ao facto de as forças tangenciais destruírem ou tenderem a destruir alguma estrutura que exista no material quando em repouso, aumentando o processo de destruição à medida que aumenta a velocidade de deformação. A curva ABC da Figura 1.6 foi obtida para valores gradualmente crescentes da velocidade de deformação $\dot{\gamma}$. Se a velocidade de deformação descer prontamente até zero, a curva de descarga correspondente poderá coincidir ou não com a curva ascendente.

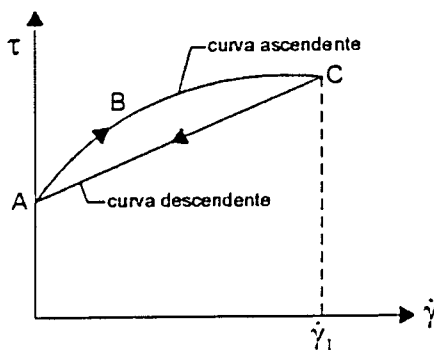


Figura 1.6 - Curva de histerese de um material com destruição estrutural sob acção de corte

Para uma substância que esteja nas condições do ponto C, que foi atingido por aumento da velocidade de deformação até ao valor $\dot{\gamma}_1$, com a consequente destruição estrutural, pode-se verificar que se o processo de destruição estrutural for imediata e instantaneamente reversível, a uma diminuição da velocidade de deformação corresponderá uma reconstrução estrutural, de modo que a curva descendente será coincidente com a da carga. Porém, se for necessário algum tempo para se dar a reconstrução estrutural ou se esta não se verificar, então, à medida que diminui a velocidade de deformação, a tensão tangencial da curva descendente será menor do que da curva ascendente para o mesmo valor da velocidade de deformação. Isto significa que as duas curvas não coincidem, ficando a curva descendente mais próxima do eixo $\dot{\gamma}$. Na Figura 1.6 está representada uma curva típica do comportamento de alguns materiais, ficando uma determinada área compreendida entre as duas curvas, designando-se a curva completa por curva de histerese [1].

Se não se verificar qualquer reconstrução estrutural então uma segunda curva ascendente coincidirá com a primeira descendente. Se houver uma reconstrução parcial da estrutura, a segunda curva ascendente estará entre a primeira ascendente e a primeira descendente.

Uma curva de histerese é típica do comportamento de materiais conhecidos por “tixotrópicos”, isto é, materiais que se tornam fluidificantes quando agitados, recuperando as ligações quando em repouso. Como já referido inicialmente, na definição de material tixotrópico está incluída a condição de reversibilidade da mudança de comportamento. Assim, um material que apresenta diminuição da viscosidade aparente mas que não recupera em repouso não é um material tixotrópico, sendo este fenómeno conhecido por “reodestrução” [1].

Como exemplo de materiais tixotrópicos referem-se as suspensões de bentonite, utilizada na execução de paredes moldadas. Para ilustração do seu comportamento, na Figura 1.7 é apresentada uma suspensão de bentonite, dentro de um tubo invertido sem qualquer escoamento, sujeita ao seu peso próprio após algum tempo em repouso, e ao lado uma outra porção da mesma suspensão em escoamento, após agitação vigorosa.

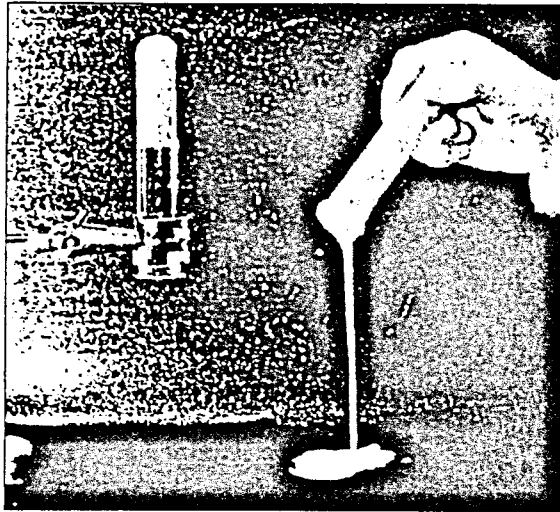


Figura 1.7 – Comportamento tixotrópico de uma suspensão de bentonite.

Por vezes a curva descendente ocorre para a esquerda da curva ascendente produzindo uma curva de histerese negativa. Aos materiais que apresentam este comportamento chamam-se anti-tixotrópicos ou com tixotropia negativa, desde que o fenómeno seja reversível.

A forma exacta da curva de histerese de uma determinada substância depende não só das características da substância mas também do modo como a curva de histerese é determinada, particularmente da velocidade do aumento ou diminuição da velocidade de deformação $\dot{\gamma}$.

De facto, enquanto que as curvas de histerese se admite constituírem normalmente uma indicação preliminar do comportamento, já não são consideradas uma boa base para quantificação da tixotropia.

Alguns autores [3], ainda admitem a quantificação do grau de tixotropia como proporcional à área contida na curva de histerese. Outros [6], admitem o cálculo de um coeficiente M que representa a diminuição de tensão tangencial por unidade de incremento da velocidade de corte:

$$M = \frac{2(\mu_1 - \mu_2)}{\log \frac{\omega_2}{\omega_1}} \quad (1.12)$$

sendo μ_1 e μ_2 as viscosidades calculadas para as velocidades angulares ω_1 e ω_2 .

Em alternativa à quantificação do comportamento tixotrópico a partir do diagrama reológico $\tau ; \dot{\gamma}$, pode-se fazer o estudo do grau de destruição estrutural com o tempo

para uma velocidade de deformação constante. Se se estudar um material que sofre destruição estrutural sob corte num viscosímetro de cilindros coaxiais com velocidade de rotação constante, verifica-se que o momento torsor medido diminui de um valor inicial T_0 para um valor de equilíbrio T_E . Verificou-se que a curva de relação do momento torsor T com o tempo t pode ser representada por uma relação exponencial simples, representada na Figura 1.8, da forma [1]:

$$T = T_E + (T_0 - T_E) \cdot \exp. (-B.t), \quad (1.13)$$

sendo B uma constante.

Assim, a relação entre o $\ln(T - T_E)$ e o tempo t é uma linha recta, com declive igual a $-B$.

Enquanto alguns fluidos atingem o valor final em poucos segundos, outros podem demorar vários dias.

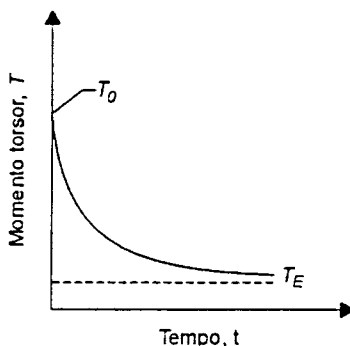


Figura 1.8 - Momento torsor em função do tempo, para um material que sofre destruição estrutural sob corte.

Verificou-se que as pastas de cimento fabricadas apenas com cimento e água, sem adjuvantes, com um cimento comum com finura Blaine de aproximadamente $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$, apenas apresentavam alguma tixotropia, quando a pasta era confeccionada com uma consistência próxima da consistência normal, para valores de A/C inferiores a $0,28$. Por esta razão se constata que uma pasta normal deixada em repouso mistura-se melhor ao fim de alguns segundos de agitação.

Como as caldas de injeção correntes para as bainhas de pré-esforço, confeccionadas sem adjuvante apresentavam tradicionalmente valores de A/C da ordem de $0,40$ e superiores, o fenómeno tixotrópico raramente se encontrava nas suspensões de cimento [3]

O mesmo já não se pode dizer mais recentemente com o uso generalizado de adjuvantes.

1.2.5 – Determinação experimental das características reológicas

1.2.5.1 – Fluidos newtonianos

Para determinar experimentalmente o coeficiente de viscosidade é necessário medir tensões de corte, em determinadas condições e aplicar a lei de Newton: $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$. Verifica-se que não é possível na prática usar aparelhos em que se possa aplicar directamente esta equação [1]

É usual utilizar dois métodos de ensaio correspondentes à utilização dos “viscosímetros de tubo capilar” e dos “viscosímetros de cilindros coaxiais”.

a) Viscosímetros de tubo capilar

Considere-se um tubo de comprimento ℓ e raio R , como indicado na Figura 1.9. Admite-se que o líquido em contacto com a parede do tubo está em repouso (não há escorregamento), e que o escoamento do líquido é laminar. Assim sendo, podem-se imaginar as camadas cilíndricas coaxiais movendo-se no sentido do escoamento como a extensão de um telescópio.

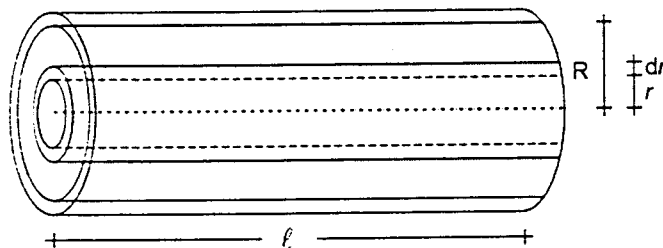


Figura 1.9 - Líquido newtoniano num tubo capilar.

Considere-se um cilindro de líquido de raio r . A força devida à diferença da pressão P responsável pelo escoamento, actuante na base do cilindro é equilibrada pelas forças viscosas de resistência que actuam em toda a superfície cilíndrica do contorno deste cilindro. A correspondente equação de equilíbrio de forças será:

$$\pi r^2 \cdot P + 2\pi r \cdot \ell \cdot \tau = 0 \quad (1.14)$$

onde τ é a tensão tangencial. Então:

$$\tau = -\frac{P \cdot r}{2\ell} \quad (1.15)$$

Como a lei de Newton estabeleceu que $\tau = \eta \frac{dv}{dy} = \eta \frac{dv}{dr}$, virá:

$$\eta \frac{dv}{dr} = -\frac{Pr}{2\ell}, \quad \text{ou} \quad dv = -\frac{Pr}{2\eta\ell} dr$$

Fazendo a integração desta equação com r variável até $r = R$, e tendo em conta que $v(R) = 0$, obtém-se:

$$v = \frac{P}{4\eta\ell} (R^2 - r^2) \quad (1.16)$$

Esta equação permite traçar o perfil de velocidades ao longo de um diâmetro, representada na Figura 1.13(a).

O volume de líquido que se escoia por segundo (caudal) entre os raios r e $r + dr$ pode ser determinado tendo presente a equação da continuidade:

$$dQ = v dS = v \cdot \pi [(r + dr)^2 - r^2] \cong 2\pi r \cdot v \cdot dr \quad (1.17)$$

Por conseguinte

$$Q = \int_0^R dQ = \int_0^R \frac{\pi P}{2\eta\ell} (R^2 - r^2) \cdot r dr$$

ou

$$Q = \frac{\pi R^4 P}{8\eta \cdot \ell} \quad (1.18)$$

Esta é a equação de Poiseuille que foi obtida ao estudar a circulação do sangue nos capilares, através de ensaios de escoamento de água em tubos de pequeno diâmetro [3]. Assim, Poiseuille estabeleceu experimentalmente a lei de proporcionalidade entre o caudal escoado num tubo e a pressão que solicita o fluido que se escoia.

Representando graficamente o caudal Q em função da pressão P (Figura 1.10), obtém-se uma recta que passa na origem e que tem um declive:

$$S = \frac{\pi R^4}{8\eta \ell} \quad (1.19)$$

Como R e ℓ são constantes geométricas do aparelho, o coeficiente de viscosidade η é facilmente determinado conhecido o declive da recta:

$$\eta = \frac{1}{S} \times \frac{\pi R^4}{8\ell} \quad (1.20)$$

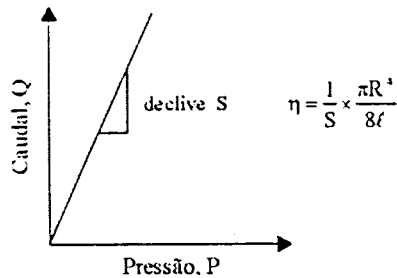


Figura 1.10 - Relação linear entre Q e P para um líquido newtoniano.

Para realizar medições rigorosas, são necessárias correcções para ter em conta o efeito da extremidade e a energia cinética adquirida pelo líquido. De facto, o perfil parabólico das velocidades só se considera estabelecido longe da entrada do tubo, sendo necessária uma correcção dita “de extremidade”. Por outro lado, se o número de Reynolds do escoamento $R_e = \frac{2vR}{\eta}$, mesmo inferior a 2000 (limite aproximado da turbulência), for ainda elevado, é necessária uma correcção dita “de energia cinética”. [3].

b) Viscosímetro de cilindros coaxiais

Este equipamento de ensaio é constituído essencialmente por dois cilindros montados coaxialmente, entre os quais existe um espaço intermédio que é cheio com o líquido em estudo. Na Figura 1.11 encontra-se representado esquematicamente um viscosímetro deste tipo.

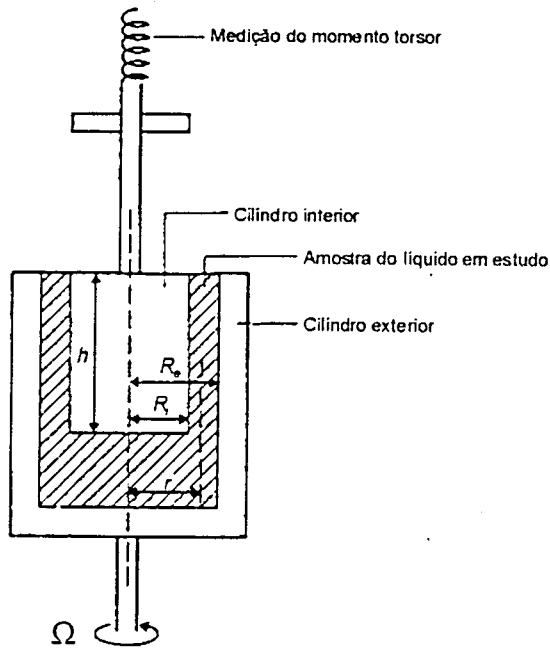


Figura 1.11 - Esquema do viscosímetro de cilindros coaxiais.

Um dos cilindros (normalmente o exterior) é colocado em rotação a uma determinada velocidade Ω e o outro cilindro tende também a rodar devido à acção viscosa de arrastamento exercida pelo líquido. Mede-se, com equipamento apropriado, o momento torsor que é necessário para evitar que o cilindro interior rode, obtendo-se um gráfico que é traçado relacionando o momento torsor T com a velocidade angular de rotação do cilindro exterior Ω .

Considere-se uma superfície cilíndrica dentro do líquido, com o raio r , onde a velocidade angular do líquido é ω . O momento torsor T é o mesmo para todos os raios, sendo dado pelo produto da área da superfície do cilindro pela tensão tangencial e pelo raio:

$$T = 2\pi r h \cdot \tau \cdot r \quad (1.21)$$

ou

$$\tau = \frac{T}{2\pi r^2 h} \quad (1.22)$$

Tendo presente a lei de Newton $\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dr}$ e como $v = \omega \cdot r$, virá

$$\frac{T}{2\pi r^2 h} = \eta \cdot r \frac{d\omega}{dr}$$

ou

$$d\omega = \frac{T}{2\pi\eta \cdot h} \cdot \frac{1}{r^3} dr \quad (1.23)$$

Integrando esta equação entre $r = R_i$ ($\omega=0$) e $r = R_e$ ($\omega=\Omega$):

$$\int_0^\Omega d\omega = \frac{T}{2\pi\eta \cdot h} \cdot \int_{R_i}^{R_e} r^{-3} dr, \text{ obtém-se}$$

$$\Omega = \frac{T}{4\pi\eta h} \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_e^2} \right) \quad (1.24)$$

A relação entre Ω e T , representada na Figura 1.12, é uma recta que passa na origem, com um declive S dado por

$$S = \frac{\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_e^2}}{4\pi\eta \cdot h} \quad (1.25)$$

Como R_i , R_e e h são constantes geométricas do aparelho, o coeficiente de viscosidade η é facilmente determinado conhecido o declive da recta:

$$\eta = \frac{1}{S} \times \frac{\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_e^2}}{4\pi h} \quad (1.26)$$

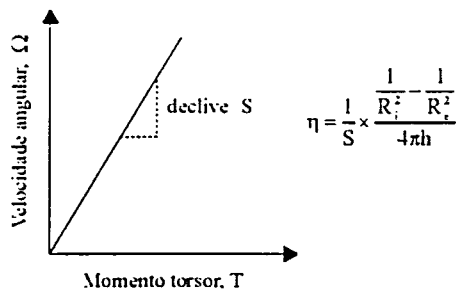


Figura 1.12 - Relação linear entre Ω e T para um líquido newtoniano.

1.2.5.2 – Fluidos plásticos (ou de Bingham)

Vimos já que num fluido newtoniano a relação entre a tensão tangencial τ e a velocidade da deformação angular $\dot{\gamma}$ é sempre constante (η), sendo utilizada como uma constante física característica do material. Porém, para todos os materiais não newtonianos a relação entre τ e $\dot{\gamma}$ não é constante, dependendo da velocidade de deformação angular a que é medida e pode também depender da “história de corte” da amostra em estudo. O seu comportamento não se traduz por uma recta que passe na origem, e as propriedades de escoamento não se podem caracterizar por uma simples constante.

O caso mais simples dos materiais não newtonianos são os materiais plásticos, cujo comportamento é traduzido por uma recta que não passa na origem, mas intersecta o eixo das tensões num valor τ_0 , designado por tensão de cedência, abaixo do qual não ocorre escoamento, sendo a equação da recta (1.9):

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma}$$

Esta equação representa o que é conhecido por modelo de Bingham, sendo μ uma constante com as dimensões da viscosidade, sendo designada por viscosidade plástica.

Portanto, um material que obedece a esta equação necessita de duas constantes, τ_0 e μ , para caracterizar as suas propriedades de escoamento, e a sua determinação experimental será analisada seguidamente.

a) Viscosímetro de tubo capilar

Tal como anteriormente (1.2.5.1-a), admite-se que o escoamento é laminar e que o material em contacto com a parede do tubo está em repouso (não há escorregamento).

Igualmente se designa por ℓ o comprimento do tubo, por R o seu raio e por P a diferença de pressão entre as extremidades do tubo.

Considerando um cilindro de raio r e comprimento ℓ , nas condições da Figura 1.9, obtém-se a mesma equação de equilíbrio de forças (1.14):

$$\pi r^2 P + 2\pi r \ell \cdot \tau = 0$$

ou

$$\tau = -\frac{Pr}{2\ell}$$

Portanto τ será maior quanto maior for r , verificando-se que τ será máximo, em valor absoluto, na parede do tubo, onde $r = R$, vindo aí $\tau = \frac{PR}{2\ell}$.

Se $\tau_{\max} = \frac{PR}{2\ell} < \tau_0$, não haverá qualquer escoamento. À medida que P for aumentando a tensão tangencial τ aumenta proporcionalmente até se atingir o valor de τ_0 primeiramente na parede do tubo e progressivamente para o interior. Admitindo-se atingido o valor τ_0 na parede do cilindro de raio r e não mais, o material do cilindro escoar-se-á como um bloco sólido, designado por núcleo. À medida que P for aumentando ainda mais, τ atingirá o valor τ_0 para raios progressivamente menores e conseqüentemente o raio de núcleo tornar-se-á cada vez menor. Contudo, o raio do núcleo nunca se poderá anular, pois para que τ tivesse um valor finito para $r = 0$ (valor τ_0), seria necessário que a pressão P fosse infinita. Portanto o escoamento em bloco nunca pode ser completamente eliminando num tubo, o mesmo não sucedendo no viscosímetro de cilindros coaxiais como se verá adiante. Esta é uma das razões pelas quais o ensaio dos cilindros coaxiais é preferido relativamente ao tubo capilar como método de ensaio para determinação das “constantes reológicas” de materiais plásticos.

Para calcular o escoamento total num tubo é necessário considerar a região do escoamento em bloco (núcleo) com velocidade constante, e a região com deslocamentos relativos, exterior ao núcleo, com velocidade variável.

Designando por p a pressão mínima para que haja escoamento (atingir-se τ_0 na parede do tubo), virá:

$$\tau_0 = -\frac{pR}{2\ell} \quad (1.27)$$

Na região exterior ao núcleo, onde há deslocamentos relativos, $\tau = \tau_0 + \mu \frac{dv}{dr}$,

sendo v a velocidade numa direcção paralela ao eixo do cilindro.

Então:
$$-\frac{Pr}{2\ell} = -\frac{pR}{2\ell} + \mu \frac{dv}{dr}$$

ou

$$dv = \frac{1}{\mu} \left(-\frac{Pr}{2\ell} + \frac{pR}{2\ell} \right) dr \quad (1.28)$$

Integrando esta equação:

$$\int_0^v dv = \frac{1}{2\mu\ell} \int_R^r (-Pr + pR) dr$$

obtém-se:

$$v = \frac{1}{2\mu\ell} \left[\frac{P}{2} (R^2 - r^2) - pR(R - r) \right] \quad (1.29)$$

Esta expressão dá-nos a variação da velocidade com o raio da secção transversal, exteriormente ao núcleo.

À superfície do núcleo $\tau = \tau_0 = \frac{P \cdot r_0}{2\ell}$, sendo r_0 o raio do núcleo. Como $\tau_0 = \frac{pR}{2\ell}$, então o raio do núcleo é dado por:

$$r_0 = \frac{P}{p} \cdot R \quad (1.30)$$

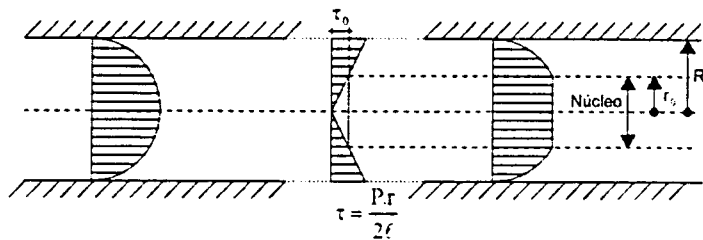
Deste modo, a velocidade do núcleo, designada por V_0 , que é constante, será obtida à superfície do núcleo, a partir da expressão de v exterior ao núcleo, no limite do seu domínio, isto é, para $r = r_0$, obtendo-se:

$$v_0 = \frac{1}{2\mu\ell} \left[\frac{P}{2} (R^2 - r_0^2) - pR(R - r_0) \right] \quad (1.31)$$

Substituindo r_0 por $\frac{P}{p} \cdot R$, obtém-se:

$$v_0 = \frac{R^2}{4\mu\ell} \left(P - 2p + \frac{p^2}{P} \right) \quad (1.32)$$

O perfil de velocidades na secção transversal do escoamento encontra-se representado na Figura 1.13(b).



(a) - Fluido Newtoniano

(b) - Fluido Plástico

Figura 1.13 - Perfis de velocidades de escoamento de fluidos newtonianos e plásticos (binghamianos).

O caudal total escoado é obtido pela soma dos caudais que se escoam na zona do núcleo e na zona exterior, que por sua vez são determinados tendo em conta a lei da continuidade $Q = v \cdot S$:

$$Q = v_0 \cdot \pi r_0^2 + \int_{r_0}^R dQ = \pi r_0^2 \cdot v_0 + \int_{r_0}^R 2\pi r \cdot v \, dr$$

Substituindo v , r_0 e v_0 pelas expressões anteriormente determinadas (1.29), (1.30), (1.32), obtém-se:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\mu l} \left(P - \frac{4}{3}p + \frac{p^4}{3P^3} \right) \quad (1.33)$$

Esta é a equação de Buckingham-Reiner, que relaciona o caudal Q com a pressão P , encontrando-se representada na Figura 1.14.

Quando $P=p$ (pressão mínima para que haja escoamento), o caudal é nulo, sendo este ponto ($P = p$; $Q = 0$) o início da curva representativa da equação de Buckingham-Reiner.

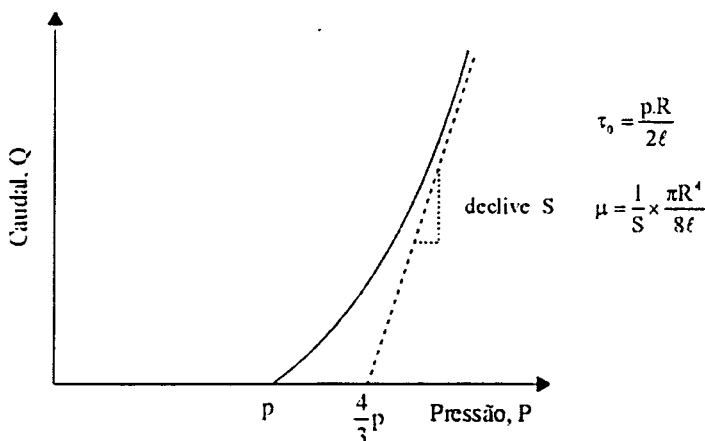


Figura 1.14 - Equação de Buckingham-Reiner.

A curva representativa desta equação não é linear. O declive da curva em cada ponto é dado por:

$$\frac{dQ}{dP} = \frac{\pi R^4}{8\mu\ell} \left[1 - \left(\frac{p}{P} \right)^4 \right] \quad (1.34)$$

À medida que P aumenta, tendendo para infinito, a segunda parcela do segundo termo da equação tende para zero, o que permite concluir que a curva é assintótica de uma recta com declive:

$$S = \frac{\pi R^4}{8\mu\ell} \quad (1.35)$$

Designando por X a intersecção desta recta com o eixo P , a sua equação será

$$Q^* = \frac{\pi R^4}{8\mu\ell} (P - X) \quad (1.36)$$

A diferença entre as duas funções (curva e assíntota) será:

$$Q - Q^* = \frac{\pi R^4}{8\mu\ell} \left(-\frac{4}{3}p + \frac{p^4}{3P^3} + X \right)$$

Quando $P = \infty$, $Q - Q^* = 0$ e $\frac{p^4}{3P^3} = 0$, vindo então $X = \frac{4}{3}p$.

A equação da assíntota será:

$$Q^* = \frac{\pi R^4}{8\mu\ell} \left(P - \frac{4}{3}p \right) \quad (1.37)$$

Esta recta intersecta o eixo P em $\frac{4}{3}p$ e tem um declive igual ao que teria um líquido newtoniano com viscosidade μ (Figura 1.14).

Em resumo, neste método as “constantes reológicas” são determinadas do seguinte modo:

- A tensão de cedência τ_0 é obtida através da determinação da pressão mínima p

para se verificar o início de escoamento: $\tau_0 = \frac{p.R}{2\ell}$

- A viscosidade μ é obtida a partir da determinação do declive S da recta assintota da curva de Buckingham-Reiner. Como esse declive vale $S = \frac{\pi R^4}{8\mu\ell}$, facilmente se determina μ , uma vez conhecido o declive:

$$\mu = \frac{1}{S} \cdot \frac{\pi R^4}{8\ell} \quad (1.38)$$

É assim, através da consideração da recta assintota à curva, que se contorna a dificuldade devida à existência do núcleo com deslocamento em bloco. O raio r_0 deste núcleo tende para zero, à medida que P tende para infinito, nunca atingindo o valor zero, o que corresponde à curva tender para a recta assintota ao aumentar P, nunca a atingindo.

b) Viscosímetro de cilindros coaxiais

Este aparelho já foi descrito e esquematizado (Figura 1.11, em 1.2.5.1.b).

Voltando a designar por R_e o raio do cilindro exterior, R_i o raio do cilindro interior, h a altura do cilindro interior e Ω a velocidade angular de rotação do cilindro exterior, o correspondente momento torsor T é medido no cilindro interior, sendo feito um registo gráfico da relação entre T e Ω .

O momento torsor T é dado por (1.21):

$$T = 2\pi r^2 h \cdot \tau$$

onde τ é a tensão tangencial em qualquer ponto (r) e T é constante. Isto significa que a tensão τ é inversamente proporcional ao raio r, sendo mais elevada onde o raio for menor. Assim, a máxima tensão tangencial verifica-se à superfície do cilindro interior, valendo:

$$\tau = \frac{T}{2\pi R_i^2 \cdot h} \quad (1.39)$$

Só se verificará escoamento se:

$$\frac{T}{2\pi R_i^2 \cdot h} \geq \tau_0 \quad (1.40)$$

Então, se o cilindro exterior roda a baixa velocidade, só se verificará escoamento próximo do cilindro interior e o resto do material mover-se-á como um bloco com

a mesma velocidade do cilindro exterior, solidário com ele (cilindro exterior), excepto se houver escorregamento à superfície. À medida que se aumenta a velocidade de rotação Ω , o momento tissor T correspondente também aumenta, de modo que a tensão τ vai atingindo o valor da tensão de cedência τ_0 para valores de r crescentes até este ser atingido na superfície do cilindro exterior, quando:

$$\frac{T}{2\pi R_e^2 \cdot h} = \tau_0 \quad (1.41)$$

Nestas condições, e para velocidades superiores, verifica-se o escoamento de todo o material, tendo-se eliminado o núcleo exterior que se movia em bloco. Tendo presente a lei de Bingham:

$$\tau - \tau_0 = \mu \cdot \dot{\gamma} = \mu \cdot \frac{dV}{dr} = \mu \cdot r \frac{d\omega}{dr}$$

onde ω é a velocidade angular do material correspondente a r .

Substituindo τ por $\frac{T}{2\pi r^2 \cdot h}$ (1.22), virá:

$$\frac{T}{2\pi r^2 \cdot h} - \tau_0 = \mu \cdot r \frac{d\omega}{dr}$$

ou:

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{T}{2\pi h r^3} - \frac{\tau_0}{r} \right) dr = d\omega$$

Integrando esta equação entre ($r=R_i$; $\omega=0$) e ($r=R_e$; $\omega=\Omega$),

$$\int_0^\Omega d\omega = \frac{1}{\mu} \int_{R_i}^{R_e} \left(\frac{T}{2\pi h} \cdot r^{-3} - \tau_0 \cdot r^{-1} \right) dr, \quad \text{obtem-se:}$$

$$\Omega = \frac{T}{4\pi\mu \cdot h} \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_e^2} \right) - \frac{\tau_0}{\mu} \cdot \ln \frac{R_i}{R_e} \quad (1.42)$$

Esta é a equação de Reiner-Rivlin, encontrando-se representada na Figura 1.15.

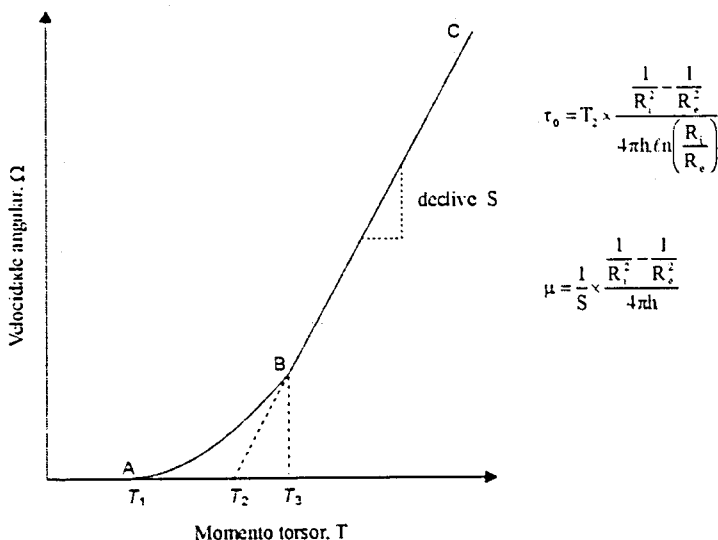


Figura 1.15 - Equação de Reiner-Rivlin.

Esta equação só se aplica quando o núcleo exterior com movimento em bloco for eliminado, isto é, na recta BC do gráfico (acima de B). Isto verifica-se quando o momento torsor T for superior a T_3 , dado por:

$$T_3 = 2\pi R_e^2 \cdot h \cdot \tau_0 \quad (1.43)$$

A recta BC pode ser extrapolada para se obter valor T_2 da sua intersecção com o eixo T, a que corresponderia a velocidade $\Omega=0$. O valor de τ_0 é obtido fazendo na equação de Reiner-Rivlin $\Omega=0$ e $T = T_2$:

$$0 = \frac{T_2}{4\pi\mu h} \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_e^2} \right) - \frac{\tau_0}{\mu} \cdot \ln \frac{R_i}{R_e}, \quad \text{obtendo-se:}$$

$$\tau_0 = \frac{T_2 \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_e^2} \right)}{4\pi h \cdot \ln \left(\frac{R_i}{R_e} \right)} \quad (1.44)$$

O valor de μ , viscosidade plástica, pode ser obtido a partir do declive da recta BC (parte recta da equação de Reiner-Rivlin).

Substituindo na equação de Reiner-Rivlin τ_0 pela expressão anteriormente determinada, obtém-se a equação da recta em causa:

$$\Omega = \frac{T - T_2}{4\pi\mu h} \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_e^2} \right) \quad (1.45)$$

Designando por S o declive da recta, este será $S = \frac{\Omega}{T - T_2}$, pelo que se obtém:

$$S = \frac{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_e^2} \right)}{4\pi\mu \cdot h} \quad (1.46)$$

e, por conseguinte, obter-se-á:

$$\mu = \frac{1}{S} \cdot \frac{\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_e^2}}{4\pi h} \quad (1.47)$$

Como R_i , R_e e h são constantes geométricas do aparelho, o coeficiente de viscosidade plástico μ é facilmente determinado conhecido o declive da recta.

1.2.6 - Variação das constantes reológicas de pastas e caldas de cimento com alguns factores

Verifica-se que as constantes reológicas τ_0 e μ (tensão de cedência e viscosidade) das pastas e caldas de cimento variam em função da variação de determinados parâmetros como as condições de amassadura (tempo e intensidade da mistura), o tipo de cimento (finura e composição), a composição da mistura (concentração), a presença de adjuvantes e adições, a vibração, etc.

Seguidamente procede-se à análise do efeito de alguns destes parâmetros sobre as constantes reológicas das pastas e caldas de cimento.

1.2.6.1 - Efeito das condições de amassadura

Banfill [7], utilizando um agitador mecânico simples, confirmou que a tensão de cedência τ_0 e a viscosidade plástica μ diminuem à medida que aumenta o tempo de mistura, conforme indicado na Figura 1.16. Nesta figura constata-se que num equipamento de mistura adequado existe um tempo de mistura mínimo que deve ser observado, a partir da qual τ_0 e μ pouco variam para uma determinada composição. Para pastas que foram amassadas tempo suficiente, verificou o desaparecimento de discrepâncias e obteve em geral curvas reversíveis no diagrama reológico.

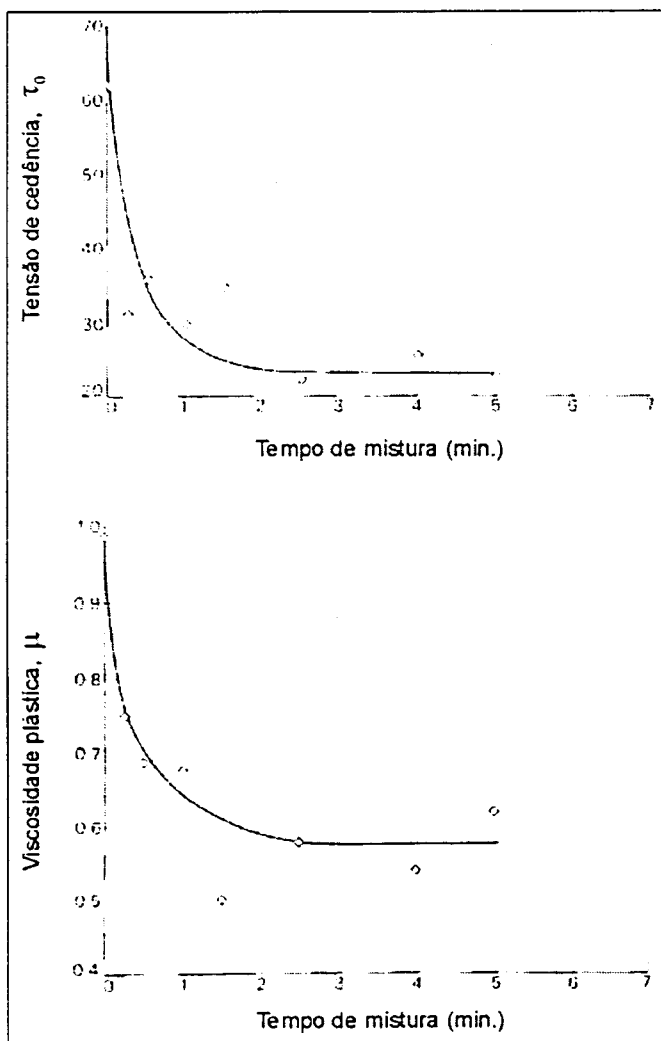


Figura 1.16 - Variação da tensão de cedência e da viscosidade plástica com o tempo de mistura.

Roy e Asaga [8] estudaram pastas de cimento confeccionadas com nove processos de mistura diferentes. Apesar de não terem determinado valores de tensão de cedência e de viscosidades, a partir das curvas reológicas (Ω ; T) publicadas foi possível concluir que das condições menos severas da amassadura para as mais severas se verificou uma diminuição de cerca de 60% tanto na tensão de cedência como na viscosidade. Simultaneamente verificou-se uma diminuição da espessura da curva de histerese [1].

1.2.6.2 - Efeito da concentração da mistura

É geralmente aceite que a tensão de cedência τ_0 e a viscosidade plástica μ são funções exponenciais da razão água/cimento A/C.

O efeito da razão A/C na tensão de cedência e na viscosidade é apresentado nas Figuras 1.17 (a) e (b), respectivamente. Estes gráficos foram elaborados por Tetttersall e Banfill [1] a partir de resultados experimentais de vários autores, recalculados quando necessário de modo a ter as tensões de cedência expressas em Pa, as viscosidades plásticas em Pa.s e as razões A/C em massa.

A análise destes gráficos permite confirmar, como seria de esperar, que tanto a tensão de cedência como a viscosidade plástica de uma pasta ou calda de cimento diminuem com o aumento da razão A/C. Todas as curvas de variação obtidas por todos os autores variam neste sentido. No entanto, registam-se grandes diferenças nos valores absolutos obtidos pelos diferentes autores, para o que contribuíram, designadamente, as diferentes técnicas de medição das constantes reológicas, as diferentes técnicas de amassadura e os diferentes tipos de cimento utilizados.

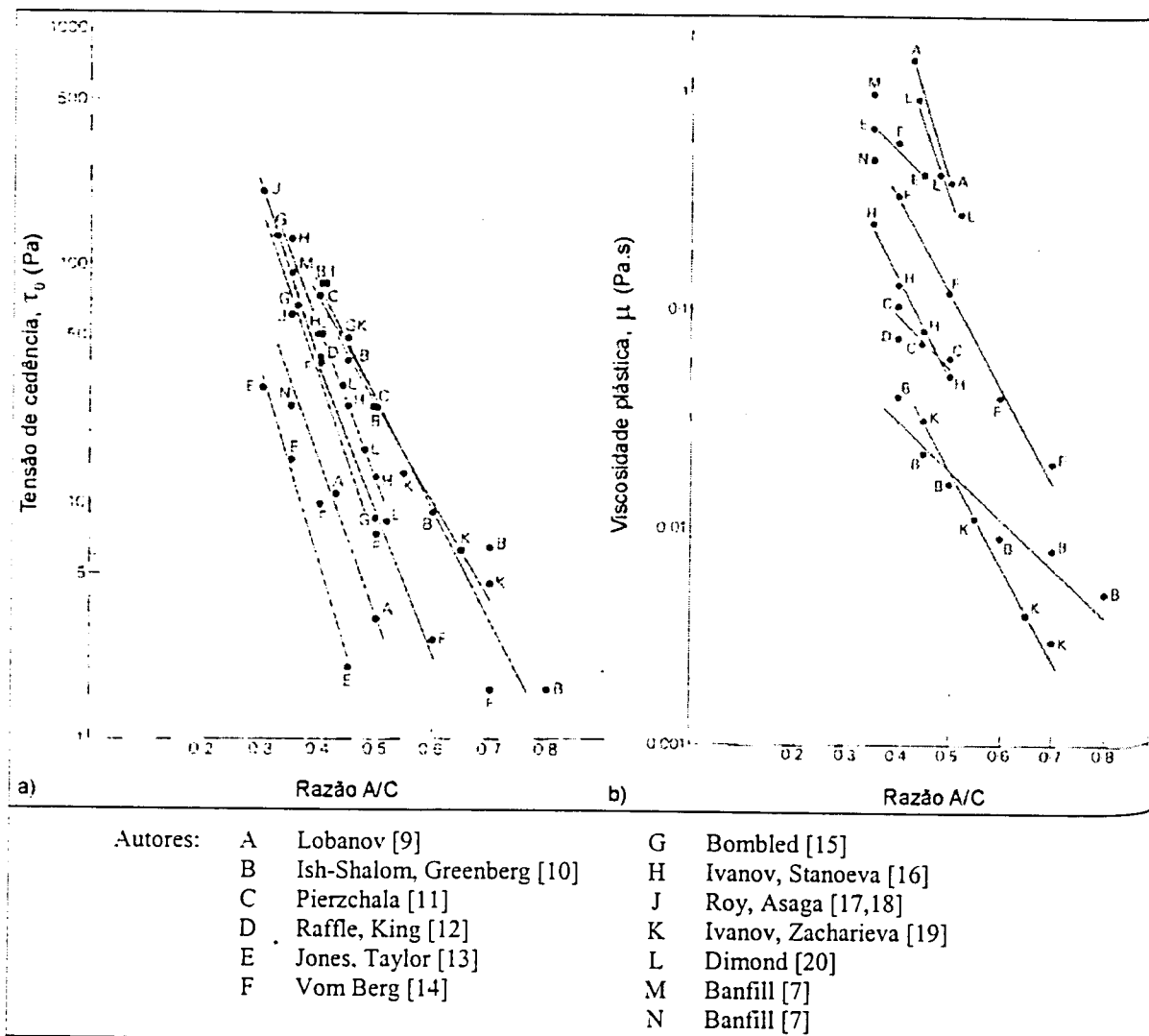


Figura 1.17 - Efeito da razão A/C na tensão de cedência e na viscosidade plástica de pastas e caldas de cimento.

1.2.6.3 – Efeito da finura do cimento

Nas pastas e caldas de cimento um dos parâmetros importantes que afecta a reologia é a finura dos grãos da fase sólida. Muitos autores fizeram estudos comparativos de pastas e caldas confeccionadas com cimentos de diferentes finuras, mas que com frequência tinham também composição química diferente, e, não se podendo separar os dois efeitos, as respectivas conclusões não se podem considerar seguras. Vom Berg [14] utilizou apenas um cimento, tendo-o separado em várias fracções granulométricas e remisturando-as em várias curvas granulométricas contínuas com diferentes dimensões máximas, obteve cimentos com superfícies específicas entre 0,4 e 2,1 m^2/cm^3 , a que corresponde 1300 a 6900 cm^2/g .

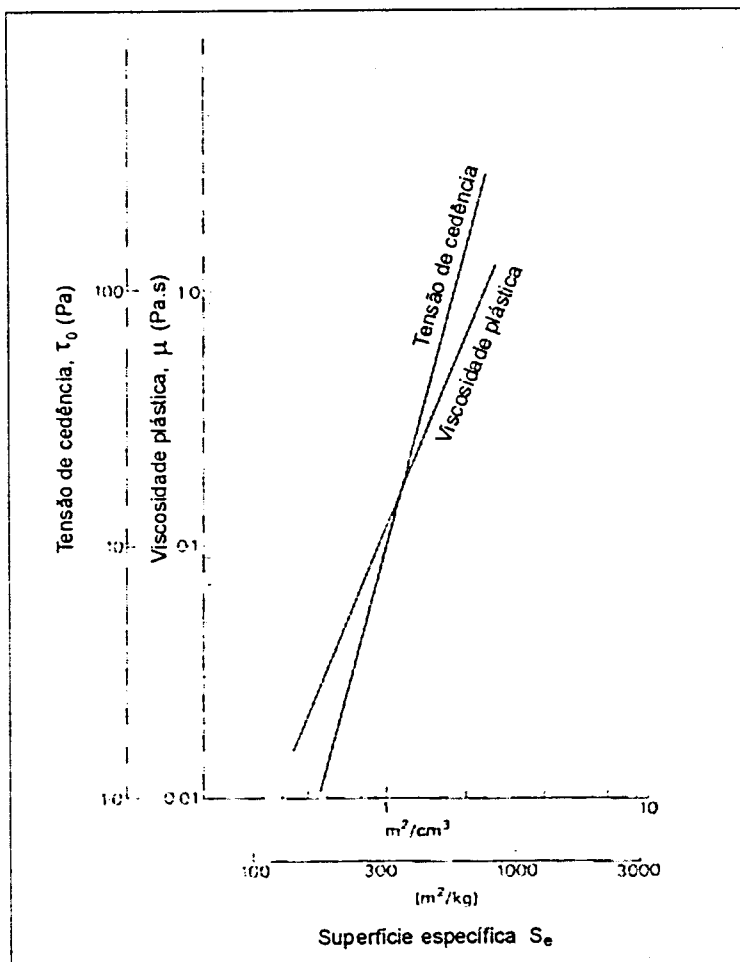


Figura 1.18 - Variação da tensão de cedência e da viscosidade plástica com a superfície específica (razão A/C = 0.50).

Na Figura 1.18 encontram-se apresentados os resultados obtidos para a razão $A/C = 0,50$: τ_0 e μ em função da superfície específica S_e . Na sequência da realização de ensaios com diversos valores da razão A/C , concluiu que a tensão de cedência e a viscosidade plástica são funções potenciais da superfície específica S_e , tendo chegado às seguintes expressões:

$$\tau_0 = K_1 \cdot S_e^{3,33} \quad (1.48)$$

$$\mu = K_2 \cdot S_e^{2,47} \quad (1.49)$$

onde os valores de K_1 e K_2 dependem da razão A/C . O maior valor do expoente de S_e na expressão da tensão de cedência τ_0 permite concluir que τ_0 depende mais intensamente das forças atractivas entre superfícies do que a viscosidade plástica μ .

1.2.6.4 – Efeito da composição do cimento

O efeito da composição do cimento é muito menos importante do que o efeito da concentração volúmica ou da finura do cimento. Odler, Becker e Weiss [21] concluíram nos seus estudos que o efeito da composição do cimento nas características reológicas das pastas e caldas de cimento é de pequena importância.

Ish-Shalom e Greenberg [10] haviam já realizado um estudo usando vários tipos de cimento (cimento portland corrente, cimento de baixo calor de hidratação e cimento com elevada resistência aos sulfatos), tendo verificado pequenas variações nos valores de τ_0 e μ medidos para as mesmas pastas e caldas fabricadas com diferentes tipos de cimento. Verificaram também que o mais importante no efeito da composição química está relacionado com o retardamento da hidratação do aluminato tricálcico conferido pelo sulfato de cálcio. De facto, a adição de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ao clínquer aquando da sua moagem para a obtenção de cimento destina-se a regular o tempo de presa do cimento, retardando-o. Este retardamento é obtido através da hidratação de parte do sulfato imediatamente após a adição de água ao cimento, reagindo os iões sulfato com o aluminato tricálcico, dando origem a um sulfoaluminato de cálcio insolúvel (etringite) que forma uma camada protectora à superfície do aluminato, retardando a reacção de hidratação do aluminato tricálcico. A velocidade destas reacções são importantes na determinação dos parâmetros reológicos nas primeiras idades, tendo um efeito especial na sua variação com o tempo.

Na Figura 1.19 apresentam-se os gráficos obtidos por Ish-Shalom e Greenberg quantificando o efeito da idade e do teor em aluminato tricálcico (C_3A) nos valores da tensão de cedência τ_0 e da viscosidade plástica μ das pastas e caldas de cimento. Concluíram verificar-se um ligeiro aumento de τ_0 e μ com o teor de C_3A , que se torna mais importante à medida que aumenta o tempo de hidratação. No caso concreto das caldas de injeção das bainhas de pré-esforço, como elas se destinam a ser utilizadas imediatamente após o seu fabrico, sendo recomendado normalmente um período de utilização até 30 minutos após a mistura, ou a utilização de retardadores de presa caso seja necessário exceder este limite, o efeito do tempo também está atenuado, pois nunca se atingem as 2 ou 3 horas antes da injeção que fariam subir τ_0 e μ como indicado na Figura 1.19.

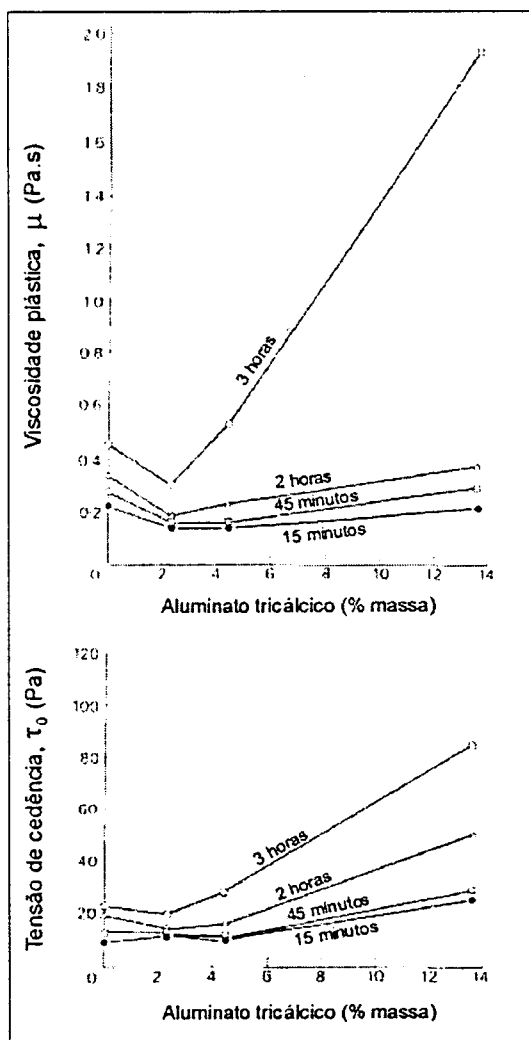


Figura 1.19 - Efeito da idade e do teor em C_3A na tensão de cedência e na viscosidade plástica.

Chama-se a atenção para o facto de neste subcapítulo apenas se terem analisado cimentos fabricados sem adições. O efeito das adições utilizadas em substituição de parte do clinker portland será apreciado mais adiante (1.2.6.6).

1.2.6.5 – Efeito dos adjuvantes

De acordo com a Norma Portuguesa NP ENV 206, adjuvante é definido como um “produto que é adicionado em pequenas quantidades referidas à massa do cimento, antes ou durante a amassadura ou numa operação adicional de amassadura, provocando as modificações requeridas das propriedades normais”. Quanto aos requisitos básicos para a composição do betão, esta mesma norma indica que “a quantidade total de adjuvantes na composição, quando utilizados, não deve exceder 50 g/kg de cimento e não convém que seja inferior a 2 g/kg de cimento”.

Normalmente a classificação dos diferentes tipos de adjuvantes é feita com base na acção principal sobre as propriedades tecnológicas do betão e não na sua natureza físico-química [22]. Assim, tendo em conta a função principal de cada adjuvante, a Especificação nº 374 do LNEC (LNEC E 374), “adjuvantes para argamassas e betões - características e verificação da conformidade” [23], define os seguintes tipos de adjuvantes: a) redutor de água/plastificante, b) redutor de água de alta gama/superplastificante, c) retentor de água, d) introdutor de ar, e) acelerador de presa, f) acelerador de endurecimento, g) retardador de presa e h) hidrófugo.

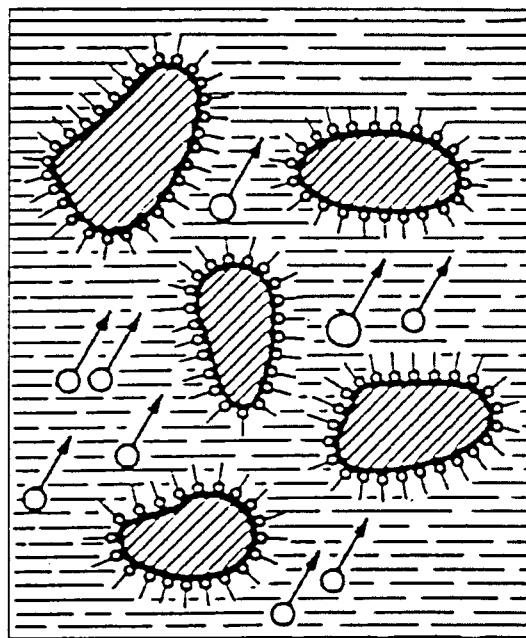
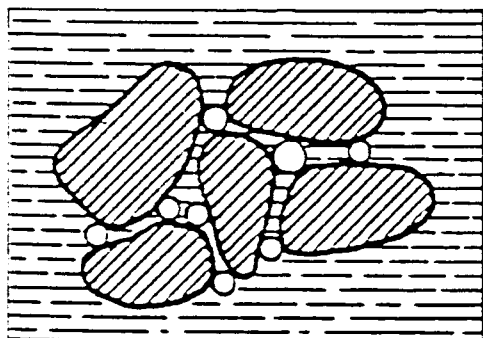
Tattersal e Banfill [1] consideram que as classes de adjuvantes que verdadeiramente afectam a reologia do betão fresco são os plastificantes, superplastificantes e os introdutores de ar. Os aceleradores e retardadores também têm interesse porque afectam a hidratação do cimento nas primeiras idades e por conseguinte conduzem a alteração das características reológicas, com o tempo.

Por esta razão e pelo facto de o estudo mais pormenorizado de algumas propriedades das caldas de injeção realizado nos capítulos 4 e seguintes ter sido elaborado considerando um adjuvante do tipo superplastificante, a análise do efeito dos adjuvantes cingir-se-á essencialmente aos adjuvantes deste tipo.

Para recordar o mecanismo de acção destes adjuvantes começa-se por referir que os adjuvantes plastificantes, superplastificantes e introdutores de ar são substâncias tenso-activas, isto é, capazes de modificar a tensão superficial do dissolvente (água). As suas moléculas são alongadas, com uma parte hidrófila e outra hidrófoba. A

extremidade hidrófila é geralmente formada por grupos carboxílicos (COO^-) ou sulfônicos (SO_3^-). A extremidade hidrófoba pode ser constituída por uma cadeia alquílica simples mais ou menos ramificada, podendo conter núcleos benzénicos, linhossulfônicos, naftalénicos, melamínicos, etc. [12]

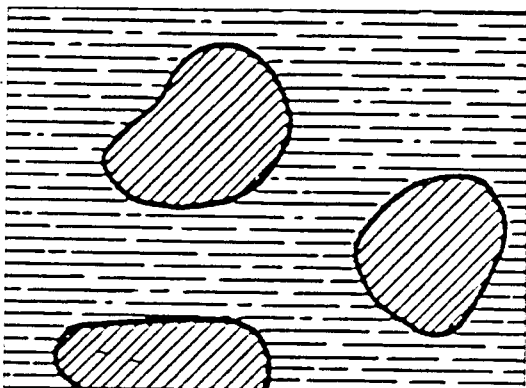
Nas Figuras 1.20 e 1.21 [22], encontram-se representados esquemas elucidativos do mecanismo de acção deste tipo de adjuvantes. Na Figura 1.20 está ilustrado o efeito dispersante destes adjuvantes, pois ao adicionar um agente plastificante à água, este é adsorvido pela superfície das partículas de cimento provocando a desfloculação dos grãos de cimento que estavam associados devido à acção dos meniscos de ar provocados pelo ar incluído entre os grãos. Esta dispersão das partículas de cimento devida à repulsão electrostática entre as partículas, é acompanhada da expulsão do ar aprisionado. Na Figura 1.21 está ilustrado efeito redutor de água destes mesmos adjuvantes, pois quando não há plastificante, a quantidade de água necessária para a mobilidade das partículas é grande, e ao adicionar o plastificante as partículas repelem-se, não sendo necessária para a sua mobilidade a água que fica livre entre elas, podendo as distâncias entre as partículas reduzirem-se, sendo dispensada a água em excesso.



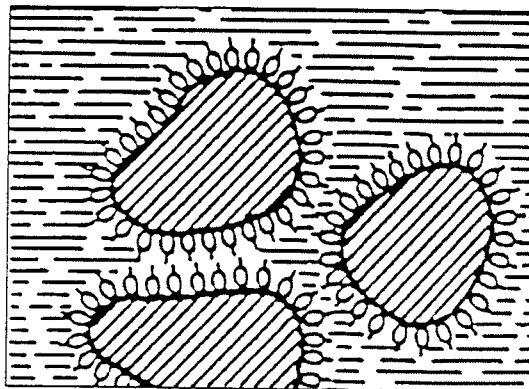
(a) - Sem plastificante - partículas de cimento floculadas

(b) - Com plastificante - partículas de cimento dispersas

Figura 1.20 - Efeito dispersante dos plastificantes.



(a) - Sem plastificante - grande quantidade de água necessária para a mobilidade das partículas.



(b) - Com plastificante - as partículas repelem-se e a água que fica livre entre elas não é necessária para a sua mobilidade, podendo ser dispensada (menor distância entre partículas).

Figura 1.21 - Efeito redutor de água dos plastificantes.

Finalmente, refere-se que a adsorção das moléculas de adjuvante pelos grãos de cimento retarda o seu contacto com a água, promovendo um atraso na precipitação dos primeiros componentes hidratados, e conseqüentemente, a acção dispersante do adjuvante provoca o efeito secundário de retardar a presa [22].

O mecanismo da acção dos superplastificantes é idêntico ao dos plastificantes, mas mais intenso. Tratam-se normalmente de polímeros sintéticos, com capacidade de dispersão muito superior à dos plastificantes, não havendo distinção na adsorção pelos componentes principais do clínquer, o que não acontece nos plastificantes, para os quais o C_3A tem uma capacidade de adsorção bastante maior do que os restantes componentes (C_3S , C_2S e C_4AF).

Quanto ao efeito da adição de superplastificantes a pastas e caldas de cimento nas respectivas características reológicas, referem-se os estudos efectuados por Banfill [7] que realizou amassaduras com razão $A/C = 0,35$, utilizando quatro cimentos diferentes e dois superplastificantes, um condensado (resina) de naftaleno formaldeído sulfonatado e um condensado de melamina formaldeído sulfonatado, com concentrações variáveis.

Os resultados obtidos encontram-se indicados na Figura 1.22 (melamina) e 1.23 (naftaleno). Verifica-se que a tensão de cedência τ_0 cai de valores da ordem dos 50 Pa para valores próximos de zero quando as concentrações dos adjuvantes aumentam de zero até cerca de 1% (dosagem em massa relativamente à massa do cimento), mantendo-se próximo de zero para valores de concentração superiores a 1%. Quanto à

viscosidade plástica verifica-se um decréscimo da ordem dos 40% até um valor mínimo da viscosidade para uma concentração da ordem de 1%, seguindo-se uma parte ascendente da curva, mas com menor declive, correspondendo a uma subida mais lenta da viscosidade com o aumento da concentração do adjuvante. Comparando os gráficos da Figura 1.22 com os da Figura 1.23, isto é, analisando comparativamente o efeito dos dois adjuvantes, verifica-se que tanto para a tensão de cedência como para a viscosidade a sua variação com a concentração do adjuvante é mais intensa com a melamina do que com o naftaleno.

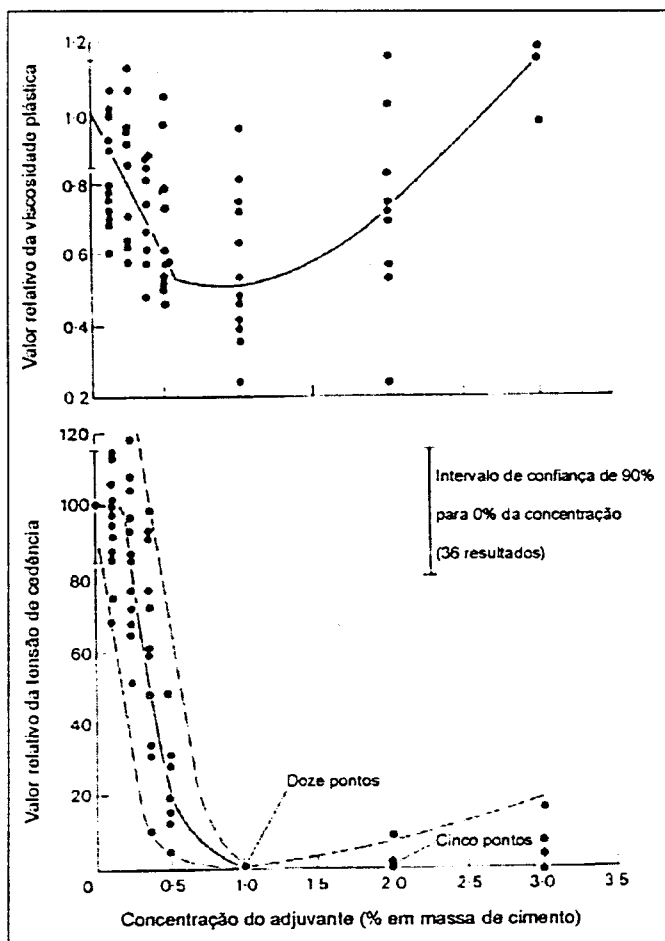


Figura 1.22 - Efeito da concentração de condensado de melamina formeldeído sulfonatado na tensão de cedência e na viscosidade plástica.

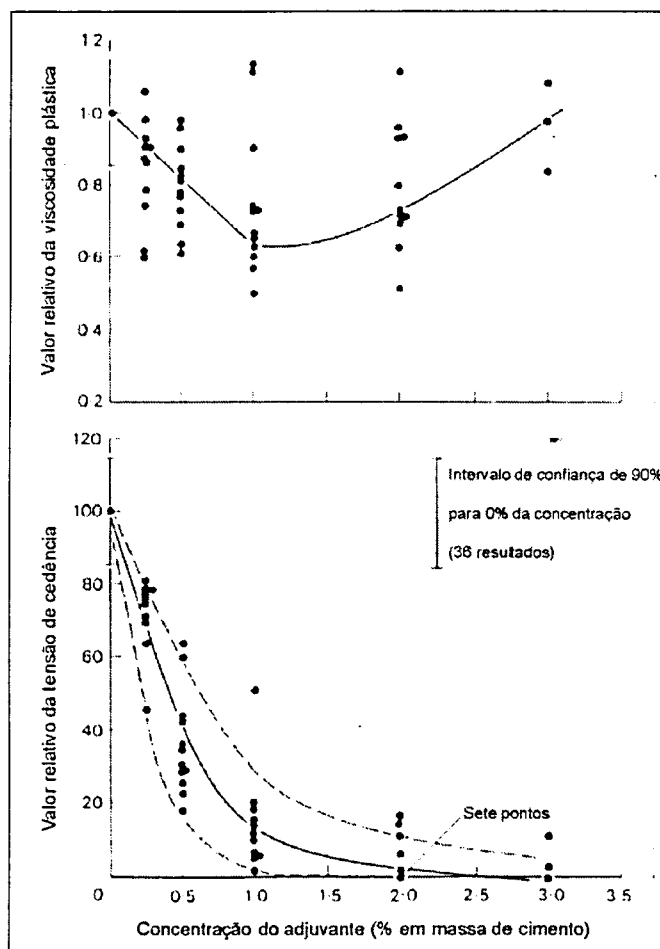


Figura 1.23 - Efeito da concentração de condensado de naftaleno formeldeído sulfonatado na tensão de cedência e na viscosidade plástica.

1.2.6.6 – Efeito das adições

De acordo com a norma NP ENV 206, define-se adição como um “material inorgânico, finamente dividido, que pode ser adicionado ao betão (na amassadura) com a finalidade de melhorar certas propriedades ou para adquirir propriedades especiais”.

Apesar de a normalização vigente sobre caldas de injeção das bainhas de pré-esforço permitir apenas a utilização do cimento do tipo I, à base de clínquer portland (CEM I), nalguns países membros do CEN é autorizada a utilização de cimentos com um teor até 20% de cinzas volantes ou escória granulada de alto forno.

A maior parte dos estudos publicados sobre esta matéria trata da influência de duas grandes famílias de adições: cinzas volantes e sílica de fumo. É o que seguidamente se analisa.

a) Adição de cinzas volantes

Banfill [24] realizou a amassadura de pastas com relação A/C inicial de 0,35 e com substituição de cimento por cinzas volantes até percentagens de 60%. Os valores obtidos para a tensão de cedência e para coeficiente de viscosidade destas pastas encontram-se indicados na Figura 1.24. Verifica-se que à medida que aumenta a percentagem de substituição de cimento por cinza volante, regista-se uma diminuição da tensão de cedência da pasta, enquanto que a viscosidade praticamente não é afectada.

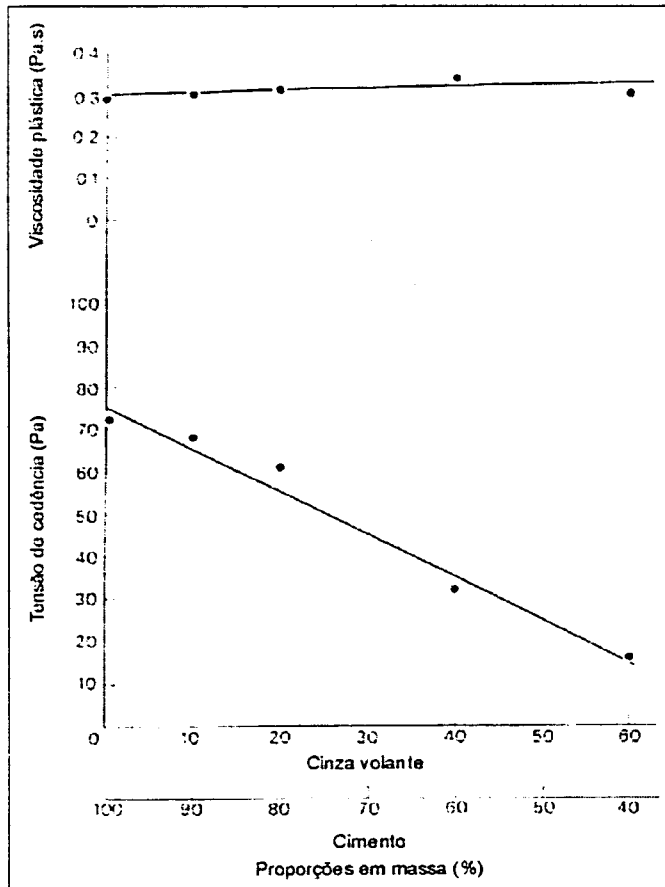


Figura 1.24 - Variação da tensão de cedência e da viscosidade plástica com a substituição de cimento por cinza volante numa pasta com razão A/C inicial de 0.35.

Corroborando estas conclusões, grande parte dos autores como Hobbs D.W. [25], Brown, J.H. [26] e Helmuth R.A. [27] observaram que considerando a concentração volúmica constante, a tensão de cedência e a viscosidade diminuem a maioria das vezes quando aumenta o teor em cinzas volantes contido na fase sólida. Estes resultados podem parecer contrários ao que seria de esperar, uma vez

que a adição de cinzas aumenta, em geral, a finura da fase sólida. Segundo Helmuth a explicação para este comportamento reside no facto de a presença das partículas de cinzas volantes diminuírem o valor médio das forças eléctricas responsáveis pela estrutura floculada das suspensões de cimento.

b) Adição de sílica de fumo

Domone e Tank [28] estudaram a influência da adição de sílica de fumo no comportamento reológico das caldas de cimento. Estes autores concluíram que com a concentração volúmica constante, tanto a tensão de cedência τ_0 como a viscosidade plástica μ das caldas aumentam com o aumento do teor em sílica de fumo, justificando este comportamento com a muito elevada finura da sílica de fumo.

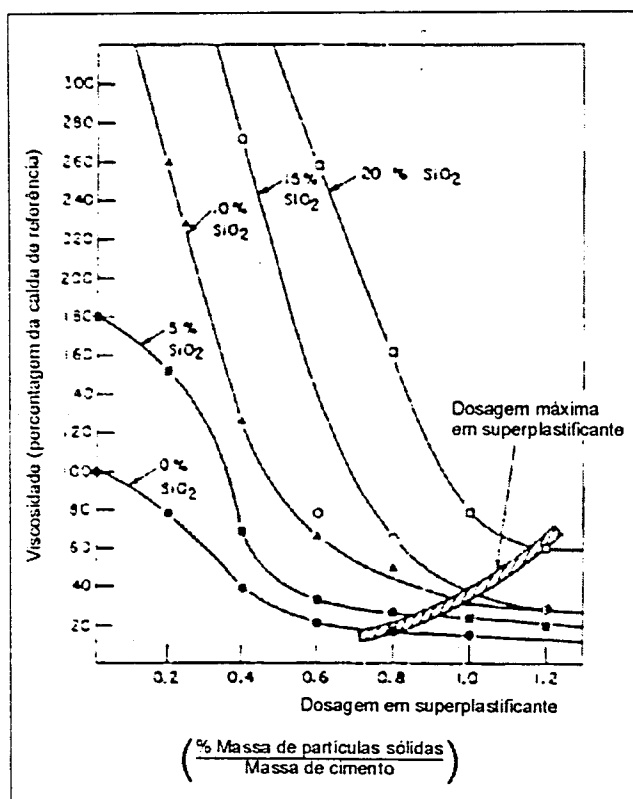


Figura 1.25 - Evolução da viscosidade em função da dosagem de superplastificante e do teor em sílica de fumo.

Um resultado análogo pode ser extraído da Figura 1.25 obtida por Aïtcin, Ballivy e Parizeau [29] e também indicada por Miltiadou [4] na qual se apresenta a evolução da viscosidade em função da dosagem do superplastificante, para vários teores em sílica de fumo. Verifica-se que para uma mesma dosagem de

superplastificante a viscosidade da calda aumenta significativamente com o teor em sílica de fumo. Para compensar este efeito e obter valores de fluidez idênticos aos das caldas confeccionadas só com cimento, é indispensável a utilização de superplastificantes. Domone e Tank verificaram também que para se obter uma tensão de cedência e viscosidade constantes, o teor em superplastificantes deve aumentar de um modo aproximadamente linear com o teor em sílica de fumo. Este resultado encontra-se ilustrado na Figura 1.26 elaborado pelos mesmos autores.

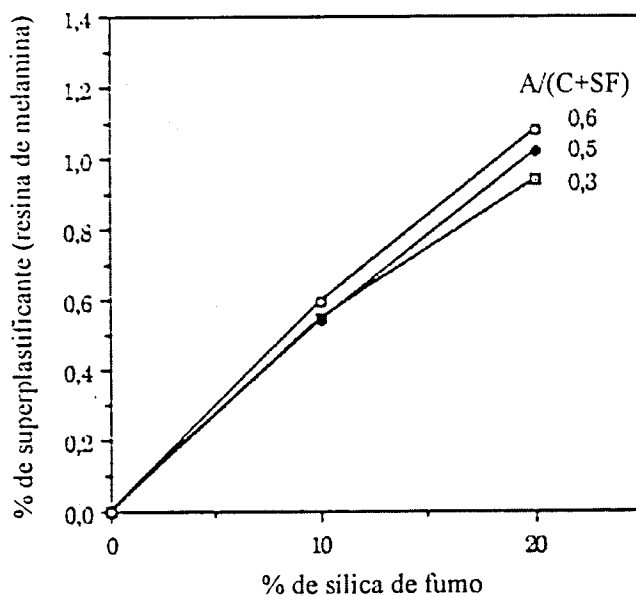


Figura 1.26 - Dosagem de superplastificante em função do teor em sílica de fumo.

Capítulo 2

NORMALIZAÇÃO

2.1 - INTRODUÇÃO

Atendendo ao grande aumento do volume de obras com utilização da técnica do pré-esforço e inevitavelmente à execução destas obras por empresas sem grande experiência neste tipo de construções, tornou-se necessária a edição de manuais e de normalização em que se resumissem as prescrições fundamentais a satisfazer para se conseguir uma boa injeção.

Cumulativamente verificou-se que os resultados obtidos através de campanhas de inspecção com radiações γ (gamografia) a diversas obras não foram suficientemente satisfatórias, pois revelaram que uma proporção não desprezável de bainhas estavam imperfeitamente preenchidas ou quase vazias em comprimentos importantes.

Foram assim surgindo recomendações e normas de que se referem, designadamente:

"Recommended Practice for Grouting of Post-Tensioned Prestressed Concrete"- PCI Committee on Post-Tensioning, Nov/Dez. 1972 [30].

"Directive Provisoire sur les Injections des gaines des ouvrages en béton précontraint" - Ministère de L'Amenagement du Territoire, de L'Equipement, du Logement et du Tourisme. (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes - SETRA / Laboratoire Central des Ponts et Chaussées - LCPC), Março 1973 [31].

"Recomendaciones para la ejecución y control de la inyección" - Asociación técnica española del pretensado (Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento), Setembro 1974 [32].

"Grout and grouting of prestressed concrete" - Cap. 3, FIP Guides to Good Practice, Practical Construction, Setembro 1975 [33].

Em Portugal, apenas no REBAP - Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado (aprovado pelo Decreto-Lei 349-C/83, de 30 de Julho) [34] este assunto foi primeiramente regulamentado, nos artigos 163º e 168º a 170º (163º - Bainhas; 168º - Protecção das armaduras; 169º - Caldas de injeção; 170º - Injeção das bainhas) e mesmo assim de um modo insuficiente no que se refere às características a apresentar pelas caldas de injeção e ao respectivo controlo de qualidade.

No entanto, e no que diz respeito ao estudo das caldas de injeção em Portugal, convém referir a tese apresentada a concurso para especialista do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em Agosto de 1969, pelo Engenheiro Manuel Joaquim Gonçalves Barroso, intitulada "Caldas de injeção à base de cimento - Contribuição para o estudo da sua influência na resistência ao corte de maciços rochosos" [35].

Mais recentemente, e no âmbito da harmonização normativa europeia, foram publicadas em 1977 e revistas em 2000 pelo IPQ - Instituto Português da Qualidade, as seguintes Normas Portuguesas:

NP EN 445 (2000): Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço - Métodos de ensaio [36];

NP EN 446 (2000): Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço - Procedimentos para injeção [37];

NP EN 447 (2000): Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço - Especificações para as caldas de injeção correntes [38].

Estas normas são a versão portuguesa das Normas Europeias EN 445, EN 446 e EN 447, respectivamente, que foram elaboradas pelo Comité Técnico CEN/TC 104 "Betão - Comportamento, produção, colocação e critérios de conformidade" e ratificadas pelo CEN - Comité Europeu de Normalização, em 28 de Outubro de 1994, tendo sido publicadas em Março de 1996 em três versões oficiais (alemão, francês e inglês). A versão portuguesa tem o mesmo estatuto que as versões oficiais, tendo a tradução sido da responsabilidade do IPQ.

Os membros do CEN são obrigados a submeter-se ao respectivo Regulamento Interno, que define as condições de adopção destas Normas Europeias como normas nacionais, sem qualquer modificação (Alemanha, Áustria, Bélgica, Dinamarca, Espanha, Finlândia, França, Grécia, Holanda, Irlanda, Islândia, Itália, Luxemburgo, Noruega, Portugal, Reino Unido, Suécia e Suíça).

2.2 - ESTUDO COMPARATIVO

2.2.1 – Estudo comparativo inicial

Em seguida apresenta-se um estudo comparativo das indicações constantes da normalização referida, tendo por base o indicado nas normas europeias EN 446 e EN 447. Assim, seguindo a estrutura das normas EN 447 e EN 446, ir-se-á apresentando o especificado em cada capítulo destas normas, e em correspondência o especificado na restante normalização anteriormente referida.

Foram assim elaborados os quadros apresentados no Anexo A - Quadros A1.1a a A2.9b, nos quais são analisadas as indicações quanto a especificações para as caldas de injeção e a procedimentos para injeção, com o seguinte conteúdo:

Especificações para as caldas de injeção:

Materiais: Generalidades;
 Cimento;
 Água;
 Adjuvantes;
 Inertes.

Propriedades das caldas: Fluidez;
 Exsudação;
 Variação de volume;
 Resistência à compressão;
 Outras propriedades.

Doseamento e amassadura: Doseamento;
 Amassadura.

Procedimentos para injeção:

Equipamento: Misturadora/Reservatório de armazenamento;
 Bomba;
 Acessórios.

Técnica de injeção: Pessoal;
 Localização das aberturas de entrada e saída;
 Bainhas;
 Precauções antes da injeção;
 Temperaturas;

Operações de injeção da calda;
Precauções após injeção;
Pós-injeção;
Reinjeção.

Controlo de qualidade: Generalidades;
 Materiais;
 Equipamento;
 Calda de injeção;
 Eficiência da injeção da calda;
 Outras verificações.

Naqueles quadros é possível comparar para cada referência, constante de uma mesma linha, as indicações de cada norma analisada e o que ficou consagrado na norma europeia (EN) correspondente.

Do conteúdo destes quadros comparativos constantes do Anexo A, ir-se-ão destacar alguns aspectos, principalmente os que envolvem quantificação, que se passam a expôr pela mesma ordem:

a) *Especificações para as caldas de injeção:*

- Tipos de cimento utilizáveis: em geral são indicados cimentos portland.

A norma NP EN 447 indica cimento do tipo CEM I (ENV 197-1), embora refira, como nota, que nalguns países membros do CEN é autorizada a utilização de cimentos com um teor até 20% de escória granulada de alto forno ou de cinzas volantes. Os cimentos previstos na norma NP 2064/1991 - Cimentos - Definições, composição, especificações e critérios de conformidade [39], do tipo IIZ (cimento portland de pozolana) ou IIC (cimento portland de cinzas volantes) têm este teor limitado a 28%, enquanto que o cimento do tipo II (cimento portland composto) tem o teor destes constituintes limitados a 23%.

Assim, estes cimentos do tipo II previstos na NP 2064, apesar de estarem próximos no que respeita à sua constituição, não se encaixam nesta excepção de alguns países membros do CEN.

Já alguns cimentos do tipo II previstos na norma NP EN 197-1/2001 - Cimento - Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos

correntes [40], encaixam nesta excepção. Tratam-se do cimento portland de escória do tipo CEM II/A-S, com teor de escória granulada de alto forno até 20%, do cimento portland de pozolana dos tipos CEM II/A-P e CEM II/A-Q, com teores até 20% de pozolana natural e pozolana natural calcinada, respectivamente, e do cimento portland de cinza volante, dos tipos CEM II/A-V e CEM II/A-W, com teores até 20% de cinza volante siliciosa ou calcária, respectivamente.

A norma do “PCI Committee” admite cimentos dos tipos I, II e III conforme a ASTM C150. Quanto ao REBAP não tem qualquer indicação quanto ao tipo de cimento.

- Fluidez: os valores recomendados referem-se ao cone Marsh ($\phi_{\text{saída}} = 10 \text{ mm}$) apresentado-se em geral valores mínimos (13-17”) e máximos (25”) recomendáveis.

O REBAP é omissivo quanto a valores (a composição deve conferir as necessárias características de fluidez).

A norma do “PCI Committee” prevê um outro cone de fluidez (U.S. Corps of Engineers Method CRD - C79, com $\phi_{\text{saída}} = \frac{1}{2}'' = 12,7 \text{ mm}$) e apenas a exigência de limite à fluidez máxima ($t_{\text{escoamento cone}} \geq 11''$) após a amassadura. Esta norma contém uma outra indicação que não consta das restantes normalizações analisadas e refere-se ao facto de considerar o ensaio do cone não aplicável a caldas que incorporem aditivos tixotrópicos.

A norma NP EN 447 recomenda, no que respeita à fluidez, as seguintes indicações:

imediatamente após a mistura:	Ensaio de imersão $\geq 30''$ Ensaio do cone $\leq 25''$
30 minutos após a mistura:	Ensaio de imersão $\leq 80''$ Ensaio do cone $\leq 25''$
à saída da bacia:	Ensaio de imersão $\geq 30''$ Ensaio do cone $\geq 10''$

A norma prevê que alguns destes valores poderão ter o seu limite alargado no caso de caldas de injeção preparadas em misturadoras com elevada velocidade de rotação.

A apreciação dos valores indicados permite verificar que à saída da bacia se limita inferiormente o tempo de ensaio, que 30 minutos após a mistura se limita

superiormente o tempo de ensaio, e que imediatamente após a mistura, no ensaio do cone limita-se superiormente o tempo de ensaio, enquanto que no ensaio de imersão se limita inferiormente este tempo.

Aparentemente estas limitações aos tempos de ensaio imediatamente após a mistura não são coerentes pelo facto de se tratar de tipos de limitações diferentes. De facto, quando se limita superiormente o tempo de ensaio, pretende-se garantir um mínimo de fluidez à calda para permitir uma injeção eficaz e adequada de forma a encher convenientemente a batinha. Quando se limita inferiormente o tempo de ensaio pretende-se evitar caldas excessivamente fluidas, de modo que sejam suficientemente espessas para expulsar todo o ar e eventual água das batinhas.

- Exsudação: a norma NP EN 447 estabelece apenas que o seu valor não pode exceder 2%, determinado ao fim de 3 horas.

A restante normalização analisada estabelece este mesmo limite, mas acrescenta, em geral, que o seu valor máximo não pode exceder 4% e que ao fim de 24 horas deve-se verificar a reabsorção completa da água exsudada.

O REBAP é omissivo no que respeita a indicações relativamente à exsudação.

- Variação de volume: a norma NP EN 447 indica que a variação de volume deve estar compreendida entre -1% (retração) e +5% (expansão).

Da restante normalização analisada, algumas consentiam limites mais alargados (+10%).

O REBAP não quantifica valores admissíveis, apenas referindo que se trata de uma característica das caldas de injeção que pode ter interesse em certos casos.

- Resistência à compressão: a norma NP EN 447 estabelece essencialmente que a resistência à compressão aos 28 dias deverá ser no mínimo 30 MPa (prismas $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, cilindros $\phi = 10 \text{ cm}$ e $h = 8 \text{ cm}$ e até cubos com $a = 10 \text{ cm}$). A restante normalização fixava em geral também este mesmo limite, com ensaio de prismas $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$.

A norma do "PCI Committee" indica o valor mínimo de cerca de 40 MPa aos 28 dias, mas determinado em cubos de aresta de 2" (5,08 cm).

O REBAP fixa o valor mínimo exigido em 17 MPa, mas determinado aos 7 dias de idade, em provetes cúbicos de aresta 10 cm, o que corresponde a uma exigência menor relativamente à restante legislação.

As “FIP Guides” indicam a este respeito que a resistência à compressão por si só não é importante, mas dá indicação da qualidade da calda: calda com 30 MPa aos 28 dias (\cong 20 MPa aos 7 dias), indica uma calda com boas propriedades (aderência, resistência ao corte, resistência à congelação).

- Relação A/C: a norma NP EN 447 estabelece que se deverá respeitar o limite $A/C \leq 0,44$.

A norma do “PCI Committee” e a “H.P. 3-73” espanhola estabelecem o limite de $A/C \leq 0,45$.

A norma francesa “SETRA-LCPC” estabelece $A/C \leq 0,40$ nas caldas sem adjuvantes e $A/C \leq 0,38$ nas caldas com adjuvantes.

O REBAP é omissivo quanto a esta questão.

- Tempos de amassadura: a norma NP EN 447 nada refere quanto aos tempos de amassadura. As restantes normalizações analisadas têm diversas indicações como de 1,5 a 3 minutos, ≤ 4 minutos, ≤ 5 minutos (REBAP) e apenas a norma francesa “SETRA-LCPC” destriça os tipos de misturadora (misturadoras comuns – 2 a 8 minutos; misturadoras de rolos \cong 2 minutos; misturadoras de hélice - até próximo de 8 minutos).

b) *Procedimentos para injeção*:

- Peneiro entre a misturadora e o reservatório de armazenamento: A norma NP EN 446 indica que a misturadora deve possuir um peneiro de malha < 2 mm, para passagem da calda. Todas as restantes normalizações consideradas referem a necessidade da peneiração da calda antes da injeção.

As normas francesa e espanhola indicam uma abertura também de 2 mm. A norma do “PCI Committee” indica uma abertura de 1/8” (3,175 mm) e as “FIP Guides” recomendam o peneiro nº 16 (1,19 mm). O REBAP não indica a abertura da malha do peneiro.

A necessidade da passagem da calda pelo peneiro antes da injeção destina-se a retirar materiais de maiores dimensões da calda (impurezas ou grumos) e com

isso limpar a calda e evitar o entupimento da injeção. Da experiência do autor deste trabalho, a impureza que com maior frequência fica retida no peneiro são bocados de papel das embalagens dos sacos de cimento, mas também podem aparecer pontas de cigarros, bocados de aço provenientes das esferas da moagem do clínquer, etc.. O peneiro também retém os grumos de cimento que se formam quando o cimento já está parcialmente hidratado (cimento envelhecido) ou quando o cimento está demasiado frio, devendo-se rejeitar estas caldas.

- Características da misturadora: a norma NP EN 446 indica que a misturadora deverá permitir obter uma calda com uma dispersão homogénea do cimento e do adjuvante, com o mínimo de grumos e com as propriedades que lhe estão especificadas. As restantes normas analisadas têm indicação semelhante. Quanto à velocidade de rotação a norma francesa “SETRA-LCPC” acrescenta que para as misturadoras de hélice se recomenda uma velocidade de rotação de cerca de 1500 rot./minuto e as “FIP Guides” que uma misturadora de elevada velocidade deverá ter o mínimo de 1000 rot./minuto.

- Reservatório de armazenamento: a generalidade das normas indica que a calda deve ser continuamente agitada após a mistura até ser injectada.

A norma francesa “SETRA-LCPC” acrescenta que a velocidade de rotação deste agitador está normalmente compreendida entre 60 e 160 rot./minuto.

- Bomba: as bombas deverão ser capazes de dar pressões superiores a um determinado valor (1 MPa - NP EN 447, espanhola HP 3-73, FIP Guides; 1,5 MPa - PCI, SETRA-LCPC; 2 MPa - REBAP). Indica-se, em geral, que a injeção seja feita a uma pressão inferior a 1 MPa, acrescentando a norma espanhola valores recomendáveis de 0,3 a 0,7 MPa.

- Sobrepensões: devem ser instaladas válvulas de sobrepressão (automáticas ou manuais) para evitar pressão superior a determinado valor (em geral 2,0 MPa; PCI - 2,5 MPa; SETRA-LCPC - 1,8 MPa).

Esta limitação destina-se a evitar o risco de danificar o elemento estrutural - betão envolvente das bainhas, e ainda uma eventual separação do cimento da água que pode causar entupimento.

- Localização das aberturas de entrada e saída: indicado em geral que deverão localizar-se em ambas as extremidades e nos pontos altos das bainhas; nos pontos

baixos, caso haja risco de congelamento durante o período de execução. A norma “SETRA-LCPC” indica um espaçamento máximo admissível de 60 m sem aberturas de saída e as “FIP-Guides” indica 40 m para este limite. As restantes normas analisadas não contêm indicação quanto ao espaçamento máximo entre aberturas de saída. No entanto a norma NP EN 446 indica que o comprimento de injeção máximo a ser preenchido numa única operação deve ser inferior a 50 metros, salvo se forem previstos pontos suplementares de injeção. A restante normalização não indica limites para o comprimento máximo de injeção.

- Intervalo de tempo entre tensionamento do aço e a injeção da bainha: indicado em geral que deverá ser o menor possível. Se for necessário dilatar este tempo recomenda-se proteger as armaduras (por ex. com óleos solúveis). O valor máximo aceitável para o intervalo de tempo em causa, quando quantificado, é variável: 7 dias (REBAP), 8 dias (SETRA-LCPC), 1 mês (HP 3-73)

- Temperaturas: a norma NP EN 446 indica como limites os seguintes:

temperatura da calda: de 10 a 25°C

temperatura ambiente: de 5 a 30°C

temperatura do elemento estrutural: de 5 a 25°C.

Fora destes limites devem ser tomadas precauções especiais, mas a temperatura da calda nunca poderá exceder 35°C.

As restantes normas analisadas contêm indicações semelhantes com ligeiras diferenças. Merece porém referência o facto de nalgumas normas a indicação do limite inferior admissível para a temperatura ambiente ser acompanhada da necessidade da sua observância até 48 horas após a injeção.

- Velocidade de injeção: a norma NP EN 446 indica que a velocidade de injeção deverá situar-se, normalmente, entre 5 e 15 metros/minuto, enquanto que a generalidade da restante normalização analisada indica o valor de 6 a 12 metros/minuto.

- Precauções para prevenir saída da calda da bainha após injeção: a norma NP EN 446 e a “SETRA-LCPC” indicam que após a conclusão da injeção se mantenha a pressão a 0,5 MPa durante 1 minuto e só depois se proceda ao fecho das saídas. As “FIP-Guides” recomendam a mesma pressão mas durante 5 minutos

e a “HP 3-73” recomenda a manutenção da pressão de injeção durante 30 segundos.

- Pós injeção e Reinjeção: é dado particular destaque a estas operações na norma NP EN 446 e quase não são abordadas nas restantes normalizações analisadas; apenas a “HP 3-73” refere algo sob pós-injeção e a “SETRA-LCPC” sobre reinjeção.

Relembra-se que se tratam de operações complementares posteriores à injeção, destinadas a substituir o ar ou água existentes nas bainhas por calda de injeção, antes ou depois da presa da calda original, respectivamente para a pós injeção ou a reinjeção.

2.2.2 – Estudo comparativo posterior

Já após a realização da primeira parte deste trabalho, que englobou o estudo comparativo inicial, foi publicado em Julho de 2002 o boletim nº 20 da FIB - Fédération Internationale du Béton (criada pela fusão do CEB e da FIP), como “Guide to good practice”, intitulado “Grouting of tendons in prestressed concrete”, elaborado pelo fib-Task Group 9.8 - Grouting” [41].

Como justificação para a publicação do presente boletim da FIB, é indicado no seu preâmbulo que na passada década de 90 foram sendo descobertos em vários países temas para reflexão, pois as caldas de injeção, consideradas como um meio de protecção importante do aço de pré-esforço dos cabos contidos nas bainhas, parecia nalguns casos ser inadequado.

Realizaram-se investigações importantes, incluindo o exame das bainhas por intrusão física (endoscopia) principalmente em pontes, e procedeu-se à revisão de procedimentos e especificações. Assim, em vários países têm vindo a ser publicadas novas especificações nacionais referentes à injeção das bainhas de pré-esforço pós tensionado (Reino Unido - 1996; França - 1999; EUA - 2001), tendo também a FIB criado o Task Group que a elaborou a presente publicação.

A experiência internacional adquirida na última década verificou que foram encontrados alguns problemas nalgumas das pontes inspeccionadas, tendo sido dado passos no sentido de se repararem pontes existentes, quando considerado necessário, e de se melhorarem construções futuras revendo as especificações nacionais. Foi dada uma ênfase especial a uma estratégia de protecção múltipla, pelo que a protecção contra

a corrosão é implementada com estanqueidade em geral, betão com muito baixa permeabilidade (betão impermeável), bainhas estanques e boa qualidade da calda de injeção.

A presente publicação é considerada como "State-of-art guidelines" destinada a ajudar no desenvolvimento e melhoria da qualidade da calda de injeção como principal meio de defesa contra a corrosão das armaduras de pré-esforço.

Este documento traduz o consenso da visão dos profissionais cientes dos defeitos da prática anterior, com sugestões de melhoria, constituindo uma actualização importante dos anteriores documentos da FIB e podendo ser considerada como base para futura actualização das normas europeias EN 445 a EN 447.

Nesta publicação estão incluídas novas áreas como a compreensão dos efeitos prejudiciais de caldas instáveis (exsudação) e como evitá-los, a importância do treino e de procedimentos adequados, a concepção da mistura com testes de prova da sua eficiência, bem como a técnica de alguns novos ensaios. É actualmente compreendido e geralmente aceite que as propriedades das caldas de injeção correntes confeccionadas com cimento e água podem ser muito variáveis e por vezes imprevisíveis, e tais caldas não são aconselhadas.

Em face da grande importância deste boletim da FIB comprovada pela densidade do seu conteúdo e com incidência nas diferentes partes do estudo comparativo anteriormente apresentado, procedeu-se a uma renovação desse estudo comparativo. Como base da sua estrutura manteve-se a mesma do estudo anterior, que corresponde à das normas EN 447 e EN 446, tendo-se mantido também para termo de comparação as recomendações iniciais da FIP (1975), constituindo este boletim nº 20 da FIB uma sua última actualização (2002). Apresentam-se, assim, no Anexo A os novos quadros A 3.1 a A 3.14, com o estudo comparativo do conteúdo das normas EN 447 e 446 [38, 37], com o correspondente conteúdo das "FIP-Guides" de 1975 [33] e do boletim nº 20 da FIB [41].

As indicações deste boletim da FIB constantes da 3ª coluna dos novos quadros do Anexo A constituem, assim, uma actualização do estado da arte no que respeita às especificações para as caldas de injeção e aos procedimentos para injeção nas bainhas de pré-esforço pós-tensionado.

Do conteúdo destes novos quadros, dar-se-á destaque às principais diferenças relativamente ao anteriormente estabelecido.

Quanto às especificações para as caldas de injeção, no que respeita aos ensaios a realizar e aos valores a observar merecem realce as seguintes propriedades das caldas:

- a) Exsudação (e estabilidade): a quantidade de água exsudada da calda ao fim de 3 horas mantida em repouso, deverá ser inferior a 0,3% nos novos ensaios de exsudação constantes do anexo B1 e B2 da publicação em causa [41]. Dever-se-á também observar este mesmo limite de 0,3% ao fim de 24 horas com a calda em repouso.

O limite anteriormente estabelecido de 2% baixa, assim, substancialmente para apenas 0,3%, sendo os novos ensaios de medição da exsudação mais representativos, pois em vez de se realizarem numa proveta de apenas 100 ml, são realizados ou num tubo inclinado com 5 metros de comprimento e de diâmetro aproximadamente 80 mm ou num tubo vertical de 1,5 m de altura e de diâmetro entre 60 e 100 mm, existindo em ambos os casos cordões de pré-esforço no interior do tubo. Estes novos ensaios serão descritos no subcapítulo seguinte (2.3 – Ensaio).

É referido expressamente que não se recomenda mais a realização dos ensaios nos moldes anteriores, por se ter demonstrado que estes não representam adequadamente as condições reais no interior das bainhas.

A calda é considerada estável se no ensaio com o tubo inclinado a exsudação se mantiver inferior a 0,3% entre as 0 e as 24 horas.

- b) Fluidez

A fluidez medida pelo cone Marsh tem limites semelhantes aos anteriormente estabelecidos. No entanto, para caldas tixotrópicas é indicado que outros limites e outros ensaios devem ser aplicados, sugerindo-se o ensaio de imersão, o ensaio de medição da viscosidade com "scissometre" (shear vane test) descrito no anexo B3 da publicação em referência [41], ou ainda com outros ensaios alternativos. O ensaio do "scissometre" será também descrito no subcapítulo seguinte (2.3 - Ensaio).

c) Resistência à compressão

A resistência mecânica não é considerada um parâmetro de observância importante, remetendo-se como orientações habituais as anteriores exigências.

Quanto aos procedimentos para injeção merecem destaque dois aspectos:

- a) Novos sistemas: reconhecendo o facto de as bainhas metálicas não constituírem uma protecção contra a corrosão permanentemente estanque, foi sendo introduzida a utilização de bainhas plásticas.

Com o uso de bainhas de polietileno e polipropileno com espessura suficiente e com juntas convenientemente estanques, consegue-se uma protecção adicional a acrescentar à protecção conferida pela calda de cimento. Para além deste há mais uma série de outros sistemas de protecção que não utilizam calda de injeção de cimento e que portanto não se enquadram no âmbito deste estudo. Esse conjunto de outros sistemas, alguns deles novos sistemas de protecção, encontram-se descritos no boletim nº 11 da FIB, intitulado "Factory applied corrosion protection of prestressing steel", state-of-art report, preparado pelo Task Group 9.1, publicado em Janeiro de 2001 [42].

- b) Planos sistemáticos de controlo: nestas novas disposições é dado destaque ao sistemático controlo que se deve verificar, abrangendo todas as fases da operação de injeção. Começando pela necessidade de pessoal devidamente qualificado e treinado, fornecendo requisitos a satisfazer por cada tipo de técnico que colabore nas operações de injeção e a indicação da necessidade de planos de instrução e de controlo, que nalguns países passa pela certificação de empresas para o efeito. Os planos sistemáticos de controlo abrangem uma série de procedimentos a efectuar antes, durante e após a injeção, incluindo um programa de ensaios prévios quer em laboratório, quer em obra à escala real com o uso dos equipamentos reais e um conjunto de ensaios sobre amostras colhidas durante a injeção (ensaios de recepção).

Termina com uma maior preocupação com a eficiência da injeção da calda, indicando uma série de procedimentos para verificação do enchimento completo da bainha, que fazem também parte dos planos de controlo.

2.3 - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Apresenta-se seguidamente uma descrição sumária dos principais ensaios correntemente realizados sobre as caldas de injeção das bainhas de pré-esforço, para determinação de propriedades que com frequência são referidas no presente trabalho. Os correspondentes métodos de ensaio encontram-se descritos pormenorizadamente na norma NP EN 445, já referida [36].

Para cada ensaio indicam-se os valores especificados na norma NP EN 447 para as caldas de injeção correntes, igualmente já referida [37].

Para além destes ensaios correntes, praticamente de rotina, ir-se-á também descrever um ensaio especial, a que se recorreu nos Capítulos 4 e 5 deste trabalho: trata-se do ensaio de injectabilidade na coluna de areia, normalizado em França através da norma NF P 18-891 - Produits pour injections dans des structures en béton - Essai d'injectabilité à la colonne de sable en milieux sec et humide [43].

Como novos ensaios de controlo das caldas previstos no Boletim nº 20 da FIB, já referido [41], ir-se-ão apresentar também os novos ensaios de exsudação e o ensaio de medição da viscosidade com o "scissometre".

2.3.1 – Ensaio de fluidez

Para realização deste ensaio ficaram consagrados na norma NP EN 445 dois métodos de ensaio alternativos: o método do cone (Marsh), correntemente utilizado em França para este fim, e o método de imersão, usualmente utilizado na Alemanha.

- a) Método do cone: este ensaio consiste, essencialmente, na determinação do tempo necessário (em segundos) para que se escoe um volume de 1 litro de calda através do orifício do cone, que tem um diâmetro de 10 mm.

Na Figura 1.1 encontra-se representado o cone normalizado para o ensaio de fluidez. O volume de calda introduzido no cone é de cerca de 1,7 litros, sendo previamente passada por um peneiro de malha quadrada de abertura 1,5 mm, posicionado sobre o cone (amovível).

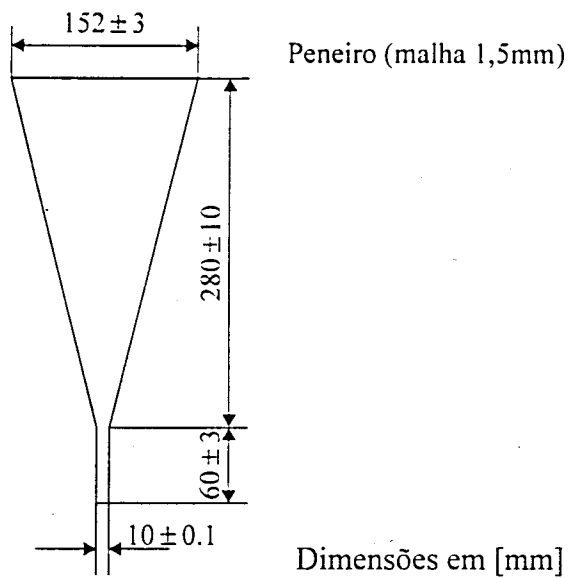


Figura 2.1 - Cone para o ensaio de fluidez.

O resultado do ensaio, e por conseguinte a fluidez medida, depende das condições de escoamento da calda através do orifício inferior, de diâmetro 10 mm.

A norma NP EN 447 especifica os seguintes limites para os resultados dos ensaios:

$t \leq 25$ segundos, imediatamente após a mistura, 30 minutos após a mistura ou no fim do período de injeção; este limite poderá ser alargado até 50 segundos para caldas de injeção preparadas em misturadoras com elevada velocidade de rotação.

$t \geq 10$ segundos, à saída da batinha.

- b) Método de imersão: consiste essencialmente na medição do tempo necessário (em segundos) para que um corpo metálico cilíndrico - imersor, com diâmetro de 58,2 mm desça 50 cm dentro da calda, colocada dentro de um tubo cilíndrico, também metálico, com um diâmetro de 62 mm, ligeiramente superior ao do imersor (1,9 mm de folga em todo o contorno).

O conjunto do dispositivo que permite determinar o tempo de imersão encontra-se representado na Figura 1.2.

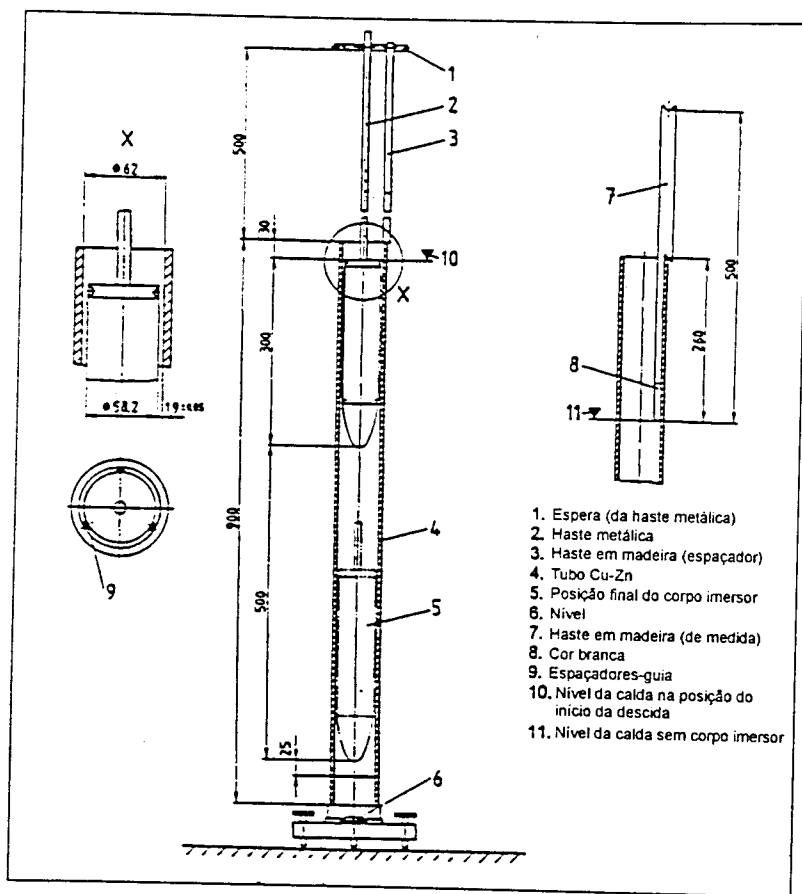


Figura 2.2 - Dispositivo para determinação do tempo de imersão.

A medida da fluidez determinada neste ensaio depende das condições de escoamento da calda da parte inferior para a parte superior do imersor, à medida que este desce no tubo. Este escoamento processa-se através da folga existente em todo o contorno entre o imersor e o tubo. Verifica-se assim, uma certa semelhança com as condições reais de injeção das caldas, cujo escoamento se processa através de folga existente entre o cabo e a bainha.

A Norma NP EN 447 especifica os seguintes limites para os resultados dos ensaios:

- $t \geq 30$ segundos, imediatamente após a mistura e à saída da bainha.
- $t \leq 80$ segundos, 30 minutos após a mistura ou no fim do período de injeção; este limite pode ser elevado para 200 segundos para caldas de injeção preparadas em misturadoras com elevada velocidade de rotação.

2.3.2 - Ensaio de exsudação

O ensaio consiste em medir a quantidade de água que reflui à superfície de uma calda que foi deixada em repouso, tendo sido impedida qualquer evaporação.

O ensaio é realizado com uma proveta cilíndrica transparente de 100 mililitros de capacidade, graduada em mililitros (ml), com diâmetro de 25 mm e altura de 250 mm. Verte-se 95 a 100 ml de calda na proveta, registando-se o nível superior da calda (v) sem considerar o menisco. Ao fim de 3 horas mede-se a quantidade de água à superfície da calda (v_1), tendo evitado qualquer evaporação de água (p. ex. tapando a proveta com uma rolha de borracha). A quantidade de água exsudada ao fim de 3 horas, que constitui o resultado do ensaio, é expressa em percentagem do volume inicial da calda:

$$\text{exsudação} = \frac{v_1}{v} \times 100\% \quad (2.1)$$

Em alternativa o ensaio poderá ser realizado com uma proveta cilíndrica transparente de diâmetro 50 mm, com altura de 200 mm e graduada em milímetros (mm). Neste caso verte-se calda na proveta até a uma altura de cerca de 150 mm, registando-se a altura inicial (h), e ao fim de 3 horas mede-se a altura de água à superfície da calda (h_1). Nas mesmas condições de ensaio anteriormente referidas, o resultado do ensaio será:

$$\text{exsudação} = \frac{h_1}{h} \times 100\% \quad (2.2)$$

A norma NP EN 447 refere que a exsudação deve ser suficientemente baixa para impedir a sedimentação e a segregação da calda, especificando o limite superior de 2% para o resultado do ensaio.

Quanto à técnica de execução deste ensaio refere-se, como nota, que o autor deste trabalho, ao fim de algumas determinações e dadas as dificuldades de precisão das leituras efectuadas nas provetas para medir a quantidade de água à superfície da calda, optou por utilizar outra técnica. Esta consistiu em, ao fim de 3 horas, absorver a água exsudada com um papel de filtro seco, previamente tarado, e por pesagem deste determinar a quantidade de água exsudada. Utilizando uma balança com leitura digital com precisão 0,01 gramas e com possibilidade de taragem a zero, verificou-se ser este procedimento bastante prático e mais preciso.

2.3.3 - Ensaio de variação de volume

A variação de volume é determinada ao fim de 24 horas e é expressa em percentagem do volume inicial da calda.

A norma NP EN 445 prevê dois métodos possíveis para proceder à medição da variação de volume, a seguir indicados:

- a) Método da proveta cilíndrica: utiliza-se uma proveta cilíndrica transparente, de 50 mm de diâmetro e 200 mm de altura (a mesma proveta utilizada como alternativa no ensaio de exsudação anteriormente descrito).

Enche-se a proveta com calda até um nível h , que se regista, e vinte e quatro horas após o enchimento da proveta mede-se a altura h_2 da calda dentro da proveta.

O resultado do ensaio (variação de volume observado após 24 horas) é dado por:

$$V.V. = \frac{h_2 - h}{h} \times 100\% \quad (2.3)$$

Refere-se, como nota, que o autor do presente trabalho realizou inicialmente algumas determinações da variação de volume com provetas de vidro, tendo-se partido todas as provetas ao tentar desmoldar a calda endurecida, uma vez que ao fim de 24 horas a calda já está endurecida e com uma apreciável resistência à compressão (15 - 20% $R_{28\text{dias}}$).

Passou a utilizar depois provetas de plástico que após o ensaio eram colocadas em água quente, e que dado o elevado valor do seu coeficiente de dilatação térmico ($\alpha \approx 8 \times 10^{-5} / ^\circ \text{C}$) quando comparado com o do vidro ($\alpha = 0,9 \times 10^{-5} / ^\circ \text{C}$) dilatavam sensivelmente, permitindo a retirada da calda endurecida e permitindo também a sua reutilização.

- b) Método do recipiente: utiliza-se um recipiente metálico com o diâmetro de 100 mm e a altura de 120 mm, com tampa adequada para evitar qualquer perda de humidade. Enche-se o recipiente com calda até uma altura de 100 mm e mede-se a distância entre o bordo superior do recipiente e a superfície da calda, imediatamente após o enchimento do recipiente e 24 horas após o enchimento.

Esta medição pode ser feita com uma placa sobre o recipiente ou com uma placa transparente sobre a calda.

A diferença entre o valor da primeira medida (imediatamente após o enchimento do recipiente) e da segunda medida (24 horas depois) corresponde, para um nível de enchimento de 100 mm, a uma variação de volume em percentagem.

Assinala-se qualquer aumento de volume com (+) e qualquer diminuição com (-).

A norma NP EN 447 especifica que a variação de volume das caldas de injeção deve situar-se entre -1% e +5%. Para as caldas de injeção que contenham agentes expansivos não se deverá registar diminuição de volume.

2.3.4 - Ensaio de resistência à compressão

A norma NP EN 445 prevê que esta determinação se possa fazer com dois tipos de provetes:

- a) Provetes prismáticos: a resistência à compressão de caldas de injeção é determinada nestes ensaios por intermédio de provetes prismáticos de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. A forma dos provetes, o equipamento e a técnica de ensaio é idêntica à da norma NP EN 196-1: Métodos de ensaio de cimentos - Parte 1: Determinação das resistências mecânicas [44]. A técnica do ensaio apenas difere da NP EN 196-1 no enchimento dos moldes devido à fluidez da calda de injeção. Assim, neste ensaio os moldes são cheios de uma só vez (e não em duas camadas) e a calda não sofre qualquer compactação (em vez das 60 pancadas da compactadora por cada camada).

A determinação da resistência à compressão (tensão de rotura por compressão) é feita sobre meios prismas obtidos a partir da rotura por flexão dos prismas $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, de acordo com a norma NP EN 196-1.

- b) Provetes cilíndricos: a resistência à compressão das caldas de injeção é determinada por ensaio dos provetes cilíndricos usados no ensaio de variação de volume indicado em 1.3.3.b). Para este ensaio, cada provete é preparado por corte do cilindro junto da sua face superior e depois por rectificação das duas

faces até à obtenção de um provete com a espessura de 80 mm (diâmetro de 100 mm).

A resistência à compressão R_c é expressa em MPa, e é dada por $R_c = \frac{F_c}{A}$, em que F_c é a carga de rotura em N e A a área da secção em mm^2 .

A norma NP EN 447 especifica que a resistência à compressão das caldas de injeção, determinada em provetes prismáticos ou cilindros anteriormente referidos, não deve ser inferior a 30 MPa aos 28 dias, ou a 27 MPa aos 7 dias nos casos em que se pretende estimar a resistência provável aos 28 dias, a partir da resistência aos 7 dias.

Esta norma (NP EN 447) refere como nota que nalguns países se utilizam cubos para determinar a resistência à compressão, devendo nesse caso a máxima dimensão da aresta ser 100 mm (a utilização de cubos deve ser autorizada pelas autoridades competentes).

2.3.5 - Ensaio de injectabilidade na coluna de areia

O ensaio, descrito na norma NF P 18-891 já referida [43], consiste em injectar a calda a testar, sob pressão constante, num tubo plástico transparente (coluna) cheio de areia calibrada, que se mantém na posição vertical.

A injeção faz-se a partir da extremidade inferior da coluna, medindo-se os tempos necessários para que a calda atinja vários níveis marcados ao longo do tubo.

O esquema com as condições de ensaio encontra-se indicado na Figura 2.3.

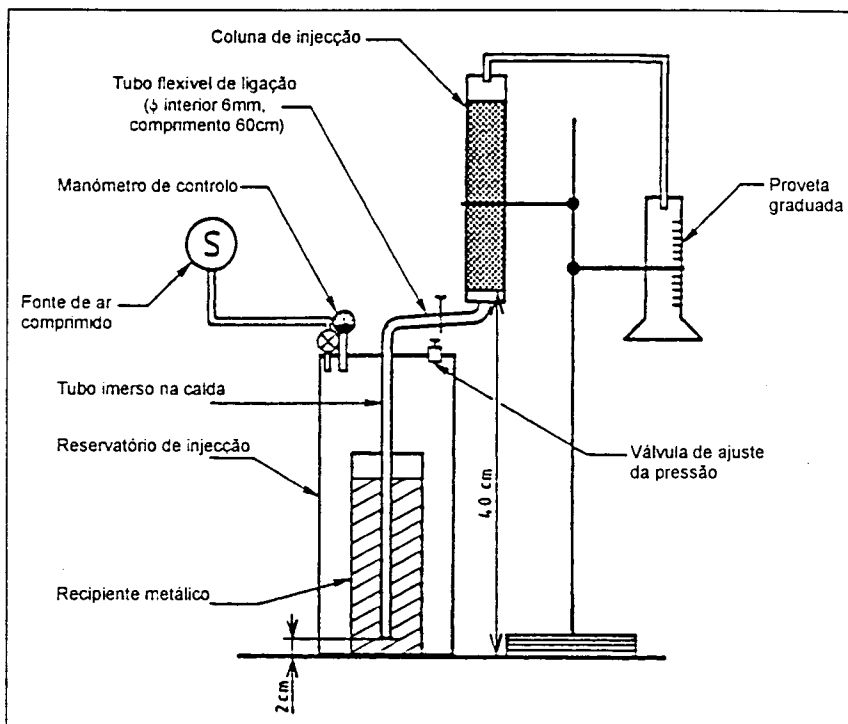


Figura 2.3 - Esquema do ensaio de injectabilidade na coluna de areia.

Como nota refere-se que o autor do presente trabalho, dadas as características das caldas estudadas, para além da medição do tempo de enchimento da coluna, procedeu também à medição do caudal de calda instalado após o enchimento da coluna. Outras alterações da pormenorização das condições de ensaio efectuadas pelo autor encontram-se expostas nos Capítulos 4 e 5. Estas alterações revelaram-se necessárias para adaptação da presente norma, destinada a todos os produtos de reparação de estruturas de betão por injeção, às caldas de injeção correntes das bainhas de pré-esforço.

2.3.6 – Novos ensaios de exsudação

Como já foi referido anteriormente, estes novos ensaios para determinação da exsudação das caldas de injeção estão descritos nos anexos B1 e B2 do boletim nº 20 da FIB, designando-se por “ensaio do tubo inclinado” e “ensaio do tubo vertical”.

Justifica-se a sua criação por representarem melhor as condições reais no interior das bainhas, recomendando-se não usar mais os ensaios anteriormente estabelecidos (provetas simples de plástico ou vidro). Estes novos ensaios realizam-se com um tubo inclinado ou vertical, contendo cordões de pré-esforço como os usados “in situ”. A presença destes cordões de aço permite a passagem de qualquer água exsudada, que sobe até à superfície, sendo este efeito desestabilizador a principal diferença

relativamente aos ensaios anteriores, que se verificou falharem na identificação de caldas potencialmente instáveis.

O primeiro ensaio deste tipo a ser criado foi o ensaio do tubo inclinado, desenvolvido no LCPC, em França, sendo o ensaio do tubo vertical desenvolvido posteriormente, no projecto “QA of grouting” da BRITE Euram, tratando-se de um ensaio mais simples, rápido e económico.

No entanto, continuamente estão a ser desenvolvidos ensaios alternativos a estes dois, com o intuito de se arranjar um ensaio mais simples, mas que consiga distinguir entre uma calda boa e uma calda de má qualidade. Os principais especialistas internacionais de pré-esforço estão a realizar ensaios de prova de eficiência para comparar os diferentes ensaios sendo possível que num futuro próximo se possa introduzir um ensaio mais simples de exsudação/estabilidade. Até lá continuar-se-ão a utilizar estes dois ensaios.

a) Ensaio do tubo inclinado

As condições de realização deste ensaio encontram-se apresentadas na Figura 2.4. O ensaio é realizado num tubo transparente de PVC, de diâmetro de cerca de 80 mm, inclinado cerca de 30° , com o comprimento de 5 metros, devidamente apoiado e com 12 cordões de pré-esforço instalados no seu interior, materializando um cabo de pré-esforço.

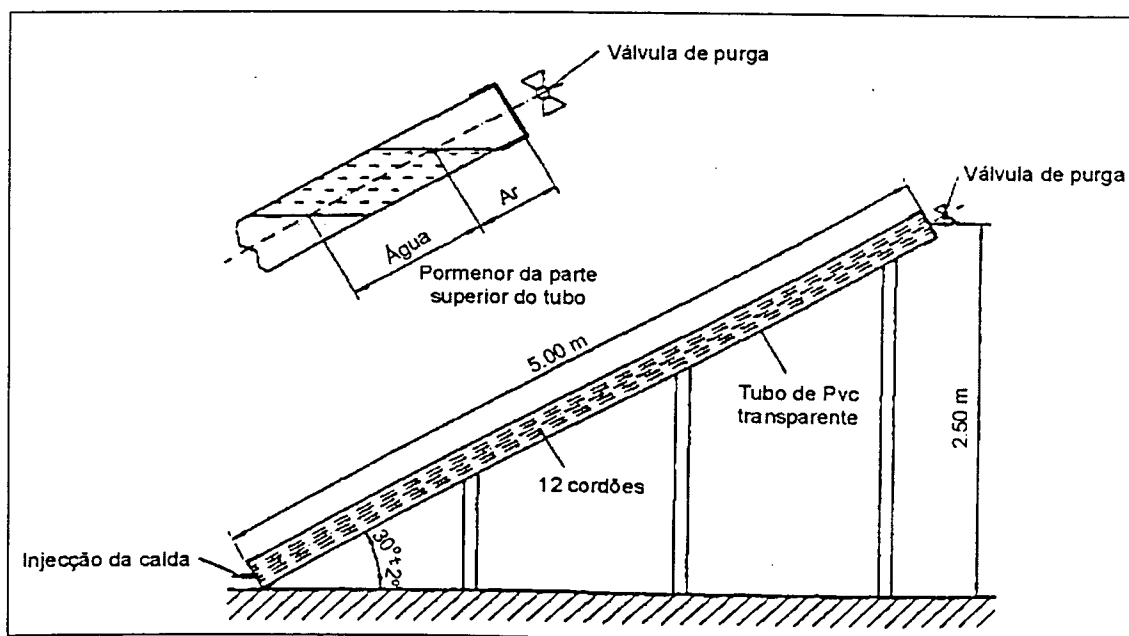


Figura 2.4 - Esquema do ensaio do tubo inclinado.

Após a injeção da calda pela extremidade inferior, é feita a purga pela extremidade superior, é fechada a extremidade superior e verifica-se a manutenção da pressão durante o tempo estabelecido, fechando-se posteriormente a entrada inferior para concluir a operação de injeção.

Em seguida fazem-se as medidas dos níveis de água e ar no topo do tubo a partir do instante zero (logo após o final da operação de injeção) até 24 horas, depois.

O resultado considera-se satisfatório se a quantidade de água e ar exsudados, ao fim de 3 horas em repouso for inferior a 0,3%. Este limite deve ser o mesmo ao fim de 24 horas em repouso.

É prevista a possibilidade de se realizar simultaneamente o ensaio com um segundo tubo idêntico e nas mesmas condições para se testar a reinjeção, quando esta estiver prevista ser utilizada em obra. Neste caso, o segundo tubo é injectado como o primeiro, e após a conclusão da injeção, ao fim do tempo estabelecido para a reinjeção (normalmente entre 30 minutos e 2 horas), é feita a reinjeção, registando-se quer antes, quer depois, os níveis de ar e água no topo do tubo (até 24 horas após a reinjeção).

Chama-se a atenção para o significado genérico com que é utilizado o termo “reinjeção” neste documento da FIB, abrangendo qualquer nova injeção realizada posteriormente a uma primeira. Lembra-se que na Norma EN 446 faz-se a distinção entre “pós-injeção” e “reinjeção” como injeções posteriores a uma primeira, realizadas antes ou depois da presa da calda original, respectivamente.

b) Ensaio do tubo vertical

O ensaio é realizado com um tubo de material transparente com diâmetro interior entre 60 e 100 mm, com comprimento de 1,5 m e com uma extremidade tapada.

Coloca-se o tubo na posição vertical, com a extremidade aberta para cima, fixando-o rigidamente de modo a não sofrer movimentos ou vibrações. Instalam-se no seu interior os cordões de aço de pré-esforço, com 1,40 m de comprimento, diâmetro individual de cerca de 16 mm (0,6”), em número suficiente para encher cerca de 30% da secção transversal do tubo ($n \times d^2 = 0,3 d^2_{\text{tubo}}$).

Enche-se o tubo com calda continuamente até uma altura h_0 , cerca de 10 mm acima do topo dos cordões, vertendo-se directamente a calda para interior do tubo ou através de um tubo auxiliar (tremie), tapando no final a extremidade superior para minimizar a evaporação.

Considerando a origem de contagem do tempo o final de enchimento do tubo com calda, registam-se a altura de calda h_g em intervalos de 15 minutos até perfazer 1 hora e depois em intervalos de 30 minutos até não haver alteração em 3 leituras consecutivas. Ao mesmo tempo que se fazem as leituras das alturas da calda h_g também se regista a altura da água h_w .

A exsudação é dada por:

$$\left(\frac{h_w}{h_0} \times 100\% \right) \quad (2.4)$$

A variação de volume por:

$$V.V. = \frac{h_g - h_0}{h_0} \times 100\% \quad (2.5)$$

Tal como no ensaio anterior, a exsudação deverá ser inferior a 0,3% ao fim de 3 horas e também ao fim de 24 horas.

Quanto à variação de volume, os limites estabelecidos são de +5% e -0,5% (expansão até 5% e retracção até 0,5%).

O ensaio do tubo inclinado é indicado para ensaios de prova ou para aprovação de sistemas de pré-esforço, podendo também ser usados como ensaios de conformidade em obras de grande dimensão.

O ensaio do tubo vertical é de mais simples realização, sendo indicado para os ensaios "in situ" (um ensaio por cada meio dia, como ensaio de recepção).

Como nota final refere-se que nos EUA e na ETAG (European Technical Approval Guideline) está já especificado um ensaio com um tubo vertical de comprimento de 1 metro, com apenas um cordão de aço no interior. Porém, ainda não se sabe se o ensaio é tão eficiente como os dois anteriores, pensando-se que o tubo deva talvez ser inclinado, para simular as condições "in situ".

2.3.7 – Ensaio de medição da viscosidade com o “scissometre”

O ensaio é destinado essencialmente às caldas tixotrópicas para medição da sua consistência, através da medição de um momento torsor aplicado à calda por uma hélice que quando é rodada provoca acção de corte na calda.

A montagem do equipamento de ensaio encontra-se esquematizado na Figura 2.5.

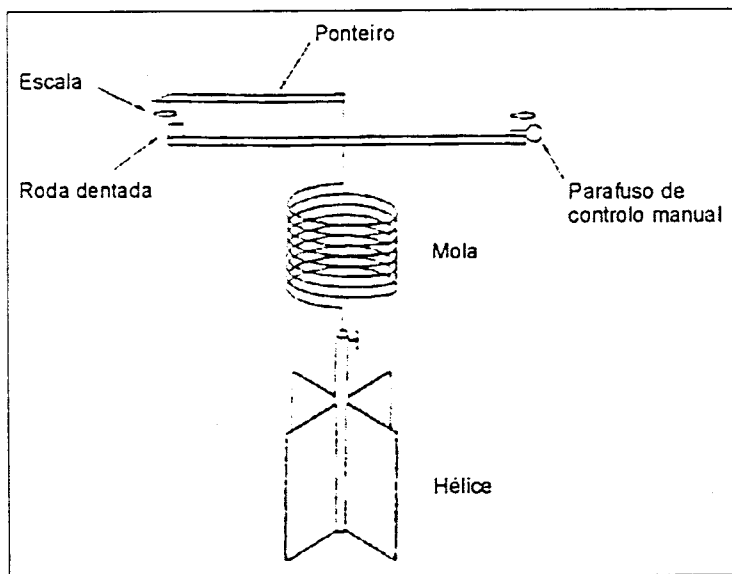


Figura 2.5 - Esquema do ensaio com o “scissometre”.

Após ter mantido a calda em repouso pelo menos durante 30 segundos, mergulha-se nela a hélice, com altura e diâmetro de 38 mm, até a sua parte superior ficar rasa com a superfície da calda. Roda-se a hélice continuamente até a acção de corte na calda estar completa (quando a agulha recua), registando-se o máximo desvio indicado na escala (graduada de 20 a 300 g/cm²).

A viscosidade da calda deve estar compreendida entre 120 e 200 g/cm², imediatamente após a amassadura, devendo permanecer nos 200 g/cm² durante o período de injectabilidade.

Capítulo 3

CALDAS DE INJEÇÃO UTILIZADAS NA OBRA DE CONSTRUÇÃO DA PONTE DE S. JOÃO SOBRE O RIO DOURO, E SEUS ACESSOS (DEVESAS – CAMPANHÃ)

3.1 - PREÂMBULO

Neste capítulo são caracterizadas as caldas de injeção utilizadas no enchimento das bainhas de pré-esforço da obra de construção da nova ponte ferroviária sobre o rio Douro no Porto (ponte de S. João) e nos seus acessos, que incluíram a construção de uma nova linha dupla entre as estações das Devesas (Gaia) e de Campanhã (Porto).

A inclusão deste capítulo justifica-se em virtude de o signatário da presente dissertação ter desempenhado o papel de responsável em obra, por parte da fiscalização, pelo controlo da qualidade dos materiais, designado na estrutura da fiscalização por divisão de controle laboratorial.

Este acompanhamento foi assegurado desde o início dos trabalhos (final de 1984 - Obra do Viaduto das Devesas e edifício do Dono da Obra - posteriormente sede do Gabinete do Nó Ferroviário do Porto – actualmente integrado na Refer, E.P.) até ao final (meados de 1991 - conclusão da estrutura da ponte e sua pintura).

Tendo em vista assegurar uma garantia geral do controlo de qualidade, foi celebrado um protocolo de colaboração/assessoria entre o LNEC e o Dono da Obra (GPFD - Gabinete da Ponte Ferroviária sobre o Rio Douro e seus acessos, mais tarde reorganizado e designado por GNFP - Gabinete do Nó Ferroviário do Porto).

No âmbito deste protocolo verificou-se uma colaboração estreita entre o LNEC e a Fiscalização - Laboratório da Obra, principalmente nos domínios do controlo dos betões e seus constituintes (Departamento de Materiais de Construção - Núcleo de Aglomerantes e Betões), do controlo dos aços correntes, aços de pré-esforço e sistema

de pré-esforço (Departamento de Estruturas) e do controlo das pinturas (Departamento de Materiais de Construção - Núcleo de Química).

3.2 - SISTEMA E EQUIPAMENTO DE PRÉ-ESFORÇO

3.2.1 - Sistema de pré-esforço

Nesta obra o sistema de pré-esforço utilizado foi o sistema espanhol "Stronghold" (Barcelona). Este sistema foi certificado em Portugal pelo LNEC, tendo em vista a sua utilização nesta obra, no âmbito do protocolo LNEC - Dono da Obra anteriormente referido.

Os ensaios realizados para efeitos da certificação incidiram sobre as soluções mais utilizadas nesta obra, correspondentes a cabos de 12 cordões de 0,6", 24 cordões de 0,6" e 32 cordões de 0,6". Esta última solução mereceu uma atenção especial visto ter sido concebida propositadamente para a obra da ponte, não tendo a Stronghold experiência desta solução.

Os ensaios realizados foram os previstos na norma British Standard - B.S. 4447 - Specification for the performance of prestressing anchorages for post-tensioned construction - October 1973 [45] e principalmente nas recomendações da FIP - Federation Internationale de la Precontrainte - Recommendations for acceptance and application of post-tensioning systems - March 1981 [46].

Como valores prescritos para os resultados dos ensaios, de modo a se considerarem satisfatórios, foram adoptados os recomendados pela FIP, em geral mais severos que os constantes da B.S.4447.

Passam-se a referir, sumariamente estes ensaios:

- a) Ensaio de tracção, em regime estático do conjunto cabo/ancoragem: neste ensaio mede-se essencialmente a eficiência da ancoragem, razão entre a carga de rotura no ensaio e a carga de rotura do cabo. Este ensaio foi realizado nas instalações fabris da Stronghold. Verificou-se que enquanto as soluções já fabricadas e testadas correntemente pela Stronghold tiveram resultados francamente satisfatórios, da ordem dos 98-99%, já a solução da ancoragem de 32 cordões de 0,6" obteve um resultado de 95,6%, mesmo assim graças à colaboração do Prof. Edgar Cardoso na sua concepção, uma vez que havia condicionalismos da

largura máxima admissível devido à espessura das almas do tabuleiro (36 cm) o que obrigou a que estas ancoragens não tivessem a forma circular habitual, mas fossem “alongadas” na direcção vertical. Para uma melhor eficiência foram também adoptadas complementarmente, por insistência do Prof. Edgar Cardoso, cunhas tripartidas em vez das cunhas bipartidas utilizadas pela Stronghold. Refere-se que o valor do resultado especificado nas normas é de um mínimo de 95% (FIP) ou 92% (B.S. 4447).

- b) Ensaio de tracção, em regime dinâmico do conjunto cabo/ancoragem: neste ensaio são aplicadas tensões de tracção flutuantes entre 60 e 65% da tensão de rotura dos cordões, com uma frequência inferior a 10Hz (B.S. 4447) ou 500 ciclos/minuto (FIP), devendo-se atingir 2×10^6 ciclos, podendo-se verificar rotura até 5% da secção do aço. Este ensaio foi realizado oficialmente no Laboratório de Ensaios da Universidade de Delft (Holanda), com resultados satisfatórios. As condições de ensaio e as exigências são idênticas nas duas normas anteriormente referidas. A norma B.S. 4447 apenas acrescenta que este ensaio é aplicável somente para cabos não injectados, enquanto as recomendações da FIP nada referem quanto a esta questão. Na obra da ponte de S. João também existiam cabos não injectados no pré-esforço exterior que foi materializado através de cabos exteriores que ficaram à vista no interior dos caixões da estrutura, para futuras compensações de pré-esforço.

De qualquer modo, refere-se que o aço de pré-esforço utilizado na obra teve garantida, mediante ensaios realizados periodicamente no LNEC, uma resistência à fadiga traduzida pela resistência a 2×10^6 ciclos para uma tensão de tracção actuante com uma amplitude de 60 a 70% da tensão de rotura do cordão, de acordo com a normalização então vigente [47].

- c) Ensaio de transmissão da carga: com este ensaio pretende-se garantir uma correcta transmissão do esforço da ancoragem ao betão, testando-se o conjunto ancoragem/trompeta, que é inserido num prisma de betão normalizado, com armaduras normalizadas. Este betão deverá ter uma tensão de rotura entre 75 e 90% da tensão de rotura aos 28 dias do betão utilizado em obra.

O provete foi capaz de suportar $1,1 \times$ Força de rotura característica do cabo, sem fendilhação ou deformações que comprometessem a sua capacidade para continuar a transmitir esse valor de carga, conforme previsto nas normas.

Este ensaio foi realizado nas instalações do laboratório da EDP de Crestuma, já que dispunha de uma prensa com capacidade para aplicar cargas de compressão até 10.000 kN (a carga prevista para ensaio ultrapassava os 5.000 kN) e com uma altura da câmara superior a 1 metro, altura aproximada do provete.

3.2.2 - Equipamentos de pré-esforço

Para além do sistema do pré-esforço propriamente dito foram também utilizados equipamentos deste sistema de pré-esforço como macacos hidráulicos para aplicação do pré-esforço e cravação das cunhas, misturadoras para fabrico das caldas e sua manutenção antes da injeção, bem como bombas injectoras das caldas, nas bainhas de pré-esforço.

Quanto a este equipamento verificou-se ter um comportamento satisfatório, excepto as misturadoras Stronghold que, com o decorrer das obras iniciais, se verificou não serem adequadas para o fabrico das caldas nas melhores condições, pelo que foram substituídas como adiante se indica.

3.3 - TIPOS DE CALDAS UTILIZADAS E SUAS CARACTERÍSTICAS

3.3.1 - Composição das caldas

As caldas utilizadas eram compostas da mistura de água, cimento e um adjuvante. As caldas utilizadas foram agrupadas em 7 tipos de composição, e dentro de cada tipo foram divididas em diferentes composições conforme o valor da relação água/cimento em massa (A/C).

Os diferentes tipos de composições distinguem-se consoante o tipo de cimento, o tipo e dosagem de adjuvante e ainda o tipo de misturadora. Estas composições encontram-se indicadas no Quadro 3.1.

Quanto à importância de cada uma das composições utilizadas, foi elaborado o Quadro 3.2 no qual se encontram indicados o número de amassaduras realizadas para o fabrico de calda que foram controladas. O número total de amassaduras contabilizadas (1111) correspondem praticamente ao total de facto realizadas, pois muito raramente o

peçoal do laboratório não assistiu a uma injeção devido à ocupação noutras actividades (mais que uma betonagem simultaneamente, e em locais diferentes da injeção), e mesmo nestas condições o peçoal do pré-esforço ou os fiscais da frente da obra em causa se encarregavam de proceder aos registos habituais. Assim, neste quadro, estão indicados o número de amassaduras de calda por cada composição adoptada.

Verifica-se que as composições-tipo 1, 5 e 6 são as menos importantes, pois no seu conjunto totalizam apenas 4,5% do total de amassaduras. Em contraposição encontram-se as composições-tipo 7 que só por si excedem os 50% das amassaduras (53,74%).

Quadro 3.1 – Resumo das composições utilizadas

		COMPOSIÇÕES						
		1	2	3	4	5	6	7
		1.1 a 1.4	2.1 a 2.5	3.1 a 3.4	4.1 a 4.9	5.1 a 5.3	6.1	7.1 a 7.6
Cimento		Moagem especial ≡ classe resist 40	fabrico corrente – classe de resistência 30					
Misturadora		Stronghold (≡ 180 rot./min.)		de rolos, com elevada velocidade de rotação (≡ 1450 rot./min.)				
Adjuvante	Tipo	Conbex 100 (expansivo)			Conbex 208 (retentor de água)			
	Dosagem (por 100 kg cimento)	0,450 kg	0,450 kg	0,450 kg	1,200 kg	0,600 kg	0,300 kg	1,000 kg
Água - - relações A/C	Valores limite	0.40-0.43	0.36-0.40	0.38-0.42	0.40-0.60	0.45-0.55	0.45	0.39-0.47
	Valores por composição	1.1-0.40	2.1-0.36	3.1-0.38	4.1-0.40	5.1-0.45	6.1-0.45	7.1-0.39
		1.2-0.41	2.2-0.37	3.2-0.39	4.2-0.45	5.2-0.50		7.2-0.40
		1.3-0.42	2.3-0.38	3.3-0.40	4.3-0.48	5.3-0.55		7.3-0.42
		1.4-0.43	2.4-0.39	3.4-0.42	4.4-0.50			7.4-0.45
			2.5-0.40		4.5-0.51			7.5-0.46
					4.6-0.52			7.6-0.47
			4.7-0.53					
			4.8-0.55					
			4.9-0.60					

Quadro 3.2 - Número de amassaduras de caldas controladas, para injeção nas bainhas de pré-esforço

Composições		Número de Amassaduras	Percentagem de Amassaduras	
Composições 1	1.1	21	1,89%	3,78%
	1.2	2	0,18%	
	1.3	9	0,81%	
	1.4	10	0,90%	
Composições 2	2.1	1	0,09%	17,64%
	2.2	76	6,84%	
	2.3	62	5,58%	
	2.4	49	4,41%	
	2.5	8	0,72%	
Composições 3	3.1	17	1,53%	9,36%
	3.2	39	3,51%	
	3.3	27	2,43%	
	3.4	21	1,89%	
Composições 4	4.1	1	0,09%	14,76%
	4.2	1	0,09%	
	4.3	15	1,35%	
	4.4	103	9,27%	
	4.5	4	0,36%	
	4.6	26	2,34%	
	4.7	2	0,18%	
	4.8	11	0,99%	
	4.9	1	0,09%	
Composições 5	5.1	1	0,09%	0,63%
	5.2	5	0,45%	
	5.3	1	0,09%	
Composição 6	6.1	1	0,09%	0,09%
Composições 7	7.1	3	0,27%	53,74%
	7.2	128	11,52%	
	7.3	5	0,45%	
	7.4	348	31,33%	
	7.5	71	6,39%	
	7.6	42	3,78%	

3.3.2 - Elementos constituintes

- a) Água de amassadura: a água utilizada foi sempre água potável, fornecida pelo sistema público de abastecimento de água, quer do Porto (obras da margem direita), quer de Vila Nova de Gaia (obras da margem esquerda), não se tendo recorrido a outra origem de água. Nos diferentes tipos de composição utilizaram-se diferentes valores da relação A/C, parâmetro que só por si exprime a composição das caldas quando estas não têm adjuvante.
- b) Cimentos: todo o cimento utilizado foi fornecido pela Secil, sendo essencialmente de dois tipos. Inicialmente, e apenas nas composições-tipo 1,

utilizou-se um cimento de uma moagem especial, mais intensa, realizada propositadamente para esta obra pela Secil, nas suas instalações fabris do Porto, junto à marginal do rio Douro, próximo da ponte da Arrábida. Nestas instalações a Secil tinha um silo de 3.000 toneladas reservado para esta obra.

Devido à moagem mais intensa do clínquer, este cimento apresentava maior finura do que o cimento de moagem normal, e conseqüentemente maiores resistências mecânicas, mas maior calor de hidratação, correspondendo aproximadamente à actual classe de resistência 42,5. Este cimento era fornecido a granel às centrais de fabrico de betão (uma na margem esquerda e outra na margem direita).

Para se usar este cimento nas caldas de injeção das bainhas de pré-esforço da obra 2 - Viaduto das Devesas, única obra onde foi utilizado para este fim, era necessário transportá-lo para a obra e pesá-lo em unidades de 50 kg antes de ser utilizado, ou então pesá-lo previamente na central de betão, ensacá-lo em sacos plásticos com massa de 50 kg de cimento e transportá-lo para a obra.

Além dos inconvenientes do maior trabalho de aprovisionamento e o risco de erros na sua pesagem, verificou-se que no seu normal manuseamento desde a saída dos silos da central de betão até à sua utilização em obra, devido ao seu contacto com o ar, o vapor de água existente no ar provocava reacções incipientes de hidratação com os componentes do cimento mais vulneráveis - fenómeno do envelhecimento natural do cimento, quantificável através da "perda ao rubro" (perda de massa a 1000°C).

Este fenómeno traduziu-se por um maior risco de entupimento durante a operação de injeção, pressentida nos grânulos de cimento hidratado que ficavam retidos no peneiro de passagem de calda da misturadora para o recipiente de manutenção antes da injeção.

Devido a estes inconvenientes, apenas se utilizou este cimento para o fabrico das caldas de injeção na obra 2 e somente no período de 10 de Outubro de 1985 a 21 de Novembro do mesmo ano.

Este cimento continuou a ser fornecido à obra para o fabrico de betão, mas não se utilizou mais para o fabrico das caldas de injeção.

A partir desta data utilizou-se cimento da classe de resistência 30 e do tipo CPN (Cimento Portland Normal) ou CPC (Cimento Portland Composto). O CPC foi utilizado nos períodos em que as cimenteiras nacionais não forneceram o CPN ensacado.

Refere-se que foi através do D.L. nº 208/85, de 26 de Junho, que entraram em vigor as novas designações - tipo de cimento referidas, bem como as classes de resistência 30 e 40, constantes da versão contemporânea da NP 2064 (Cimentos - definições, classes de resistência e características). Foi nesta altura que se estabeleceu mais uma classe de resistência do cimento (40), tendo em vista as estruturas de betão pré-esforçado, e que se criou mais um tipo de cimento (CPC), em cuja composição podia ser substituída uma fracção de clínquer por materiais de produção menos consumidora de energia.

Regista-se que nas caldas de injeção da estrutura principal - obra da ponte - apenas se utilizou cimento do tipo CPN, equivalente ao actualmente designado por tipo I, uma vez que para essa obra se colocaram no estaleiro, propositadamente para o fabrico das caldas, silos para o armazenamento do cimento, havendo sempre o fornecimento deste tipo de cimento a granel.

Quanto ao facto de nalgumas obras secundárias se ter utilizado por vezes cimento que não do actual tipo I (usou-se CPC, equivalente ao actual tipo II), regista-se que nessa altura a normalização portuguesa era omissa quanto a esse aspecto, referindo apenas que o cimento deveria ser de fabrico recente e no momento de aplicação estivesse a uma temperatura inferior a 40°C.

A normalização de outros países era variável, consentindo vários tipos de cimento (PCI) ou restringindo a "Cimento Portland" - Cap. 2.

Mais tarde, na norma EN 447, veio a ficar estabelecido que o cimento para fabrico das caldas de injeção das bainhas de pré-esforço deveria ser do tipo CEM I (ENV 197-1), correspondente ao tipo I da norma NP 2064/1991, embora a norma EN 447 refira como nota que nalguns países membros do CEN é autorizada a utilização de cimentos com um teor até 20% de escória granulada de alto forno ou cinza volante. Esta questão foi já analisada no Capítulo 2 (2.2.1 - Estudo comparativo inicial/tipos de cimento utilizáveis).

No draft pr EN 447, de 1992-04-06 [48], constava já esta indicação. Esta normalização europeia foi preparada pelo TC 104 - “Concrete - Performance, production, placing and compliance criteria”, pelo seu “Working Group 6 - Grout for prestressing tendons”.

Numa reunião deste WG 6 que decorreu em Lisboa no LNEC, nos dias 21 e 22 de Outubro de 1991, o signatário teve oportunidade de pôr esta questão nessa altura premente para Portugal, da utilização de cimento do tipo II, devido a não existir no mercado cimento ensacado do tipo I, tendo obtido a resposta consensual de que não havia provas ou indicações de inconvenientes surgidas em obras em que não foi utilizado cimento do tipo I, mas também não havia segurança que não viria a verificar-se.

Apenas por precaução esta indicação ficou consagrada na norma e foi referido nessa reunião que na generalidade dos países membros do CEN havia disponível cimento ensacado do tipo I.

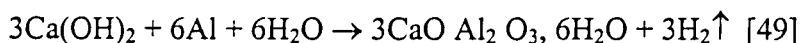
Dos registos das injeções realizadas na obra, não consta a indicação do tipo de cimento, embora sejam da mesma classe de resistência (30).

Só mais tarde, na revisão da norma NP-2064 de 1991 se modificaram as classes de resistência dos cimentos para 32,5, 32,5 R, 42,5 e 42,5 R.

Em resumo, quanto aos cimentos, utilizaram-se cimentos mais resistentes nas composições 1 (moagem especial Secil) e cimentos da classe de resistência 30 nas restantes composições 2 a 7.

- c) Adjuvantes: em todas as caldas fabricadas se utilizaram adjuvantes. Estes foram apenas de 2 tipos: inicialmente utilizou-se um adjuvante expansivo - Conbex 100, que entrou na constituição das composições 1, 2 e 3, utilizadas até ao final de 1987. A partir de 1988 utilizou-se o adjuvante retentor de água - Conbex 208.

Estes adjuvantes foram fornecidos pela Fosroc (Espanha), sendo o Conbex 100 um adjuvante expansivo à custa da presença de pó de alumínio, gerador de bolhas de hidrogénio segundo a reacção:



É recomendada a sua utilização na dosagem de uma saca de 225 gr. por cada 50 kg de cimento (um saco).

Quanto ao Conbex 208 trata-se de um adjuvante anti-segregante para caldas de cimento, composto por uma mistura equilibrada de polímeros orgânicos. Estes actuam como potentes dispersantes e agentes tixotrópicos quando adicionados a misturas de cimento/água, pelo que virtualmente eliminam a segregação e a formação de bolsas de água na calda de cimento, segundo o fabricante.

Atendendo a estas indicações, considera-se que este adjuvante se enquadra no tipo “retentor de água”, segundo a especificação LNEC E 374, já anteriormente referida [23]: adjuvante retentor de água - adjuvante que reduz a perda de água através da redução da exsudação.

É recomendada uma dosagem entre 0,9 e 1,5% em peso do cimento (normalmente 1,2%) e uma relação água/cimento de 0,45.

Quanto às características das caldas que incorporam este adjuvante, é também referido pelo fabricante que para além do efeito anti-segregante que faz com que estas caldas estejam isentas de segregação para pressões normais de injeção, têm também um efeito retardador do início de presa.

A mudança do adjuvante utilizado de Conbex 100 para Conbex 208 ficou-se a dever principalmente a dois factores:

- Dificuldade de controle da exsudação com o adjuvante Conbex 100: de facto, estando na legislação internacional da altura consagrado o limite de 2% para a exsudação 3 horas após a amassadura, verificou-se que para as composições 1 as determinações efectuadas revelaram valores médios entre 2,2 e 3,4%, para as composições 2 valores médios entre 1,7 e 2,4% e para as composições 3 valores médios compreendidos entre 1,6 e 2,1%. Mesmo com estes valores de exsudação, já parcialmente em infracção, verificava-se que se estava no limite da injectabilidade, pois com frequência se verificavam entupimentos na injeção que, não se desobstruindo rapidamente, obrigava à lavagem da baina com água sob pressão, insuflação de ar e nova operação de injeção. Nalguns casos não se conseguiu já desobstruir, tendo-se recorrido à injeção pela purga mais próxima da injeção, mas ainda não atingida, para completar a operação de injeção, com os inconvenientes que são conhecidos.

Verificava-se então uma situação permanente de conflito entre a exsudação, próxima do seu limite, e a injectabilidade também próxima do limite de executibilidade da injeção, quase sem margem de manobra.

A adopção de outro adjuvante (Conbex 208 - retentor de água) veio reduzir a exsudação a zero para as restantes composições de caldas (composição 4, 5, 6 e 7).

- Risco de corrosão das armaduras de pré-esforço devido ao pó de alumínio contido no Conbex 100: havendo a suspeita de que a acção expansiva deste adjuvante fosse obtida à custa da presença de pó de alumínio na sua constituição que poderia provocar a corrosão das armaduras, e porque no Caderno de Encargos da obra se vedava a utilização de adjuvantes contendo pó de alumínio para o fabrico das caldas de injeção das bainhas de pré-esforço, recomendando-se adjuvantes do tipo Intraplast Z, foi solicitado um parecer ao LNEC sobre este assunto.

O LNEC elaborou uma Nota Técnica datada de Janeiro de 1988 [50], na qual referia que a adição de pó de alumínio ao cimento pode provocar a libertação de hidrogénio, nomeadamente em pontos localizados de baixo pH (<8,8) resultantes de defeitos no envolvimento das armaduras. Esta libertação de hidrogénio origina a fragilização do aço de pré-esforço. Além disso, a adição de pó de alumínio provoca o abaixamento em cerca de uma unidade do pH da calda de cimento, diminuindo a sua potencial capacidade como meio adequado a passivação. Em conclusão referia que não deveriam ser utilizados aditivos que contivessem pó de alumínio (alumínio livre) em caldas de injeção de bainhas de pré-esforço, sendo de preferir aditivos em que o alumínio, a existir, estivesse integrado em compostos que não permitissem a libertação de hidrogénio.

Complementarmente o LNEC efectuou a análise química de 4 adjuvantes (Conbex 100, Intraplast Z, Intracrete EH e FlowCable) tendo verificado que embora os quatro adjuvantes tenham mostrado conter alumínio, verificou-se uma diferença importante entre os dois primeiros (Conbex 100 e Intraplast Z) e os restantes. De facto, enquanto o Conbex 100 e o

Inraplast Z apresentavam pó de alumínio em quantidades de 3,44% e 5,67%, respectivamente, o Intracrete EH e o FlowCable possuíam compostos de alumínio. Nestes dois últimos adjuvantes foi efectuada uma análise por difracção de raios X que não detectou a presença do pó de alumínio.

Assim, a partir de 1988 foi usado o adjuvante Conbex 208 (retentor de água) em vez do Conbex 100 (expansivo).

No que respeita às características das respectivas caldas há a registar que se perdeu o efeito expansivo do Conbex 100, e se verificou alguma quebra na resistência à compressão, mesmo para caldas com igual relação A/C. Em compensação a exsudação elevada, que constituía uma enorme preocupação no que respeita à consecução de um perfeito enchimento final das bainhas e a garantia da protecção dos cabos de pré-esforço, baixou para 0% em todas as composições em que se utilizou o Conbex 208.

Curiosamente, quanto à fluidez, medida através do ensaio do cone Marsh, esta alterou-se significativamente, passando de valores médios de 9 a 13 segundos nas composições 1, 2 e 3 para valores médios muito superiores: composições 4 - 21 a 48 segundos, composições 5 - 12 a 25 segundos, composição 6 - 32 segundos e composições 7 - 31 a 49 segundos. Aparentemente isto significaria uma elevada perda de injectabilidade das caldas, visto que este ensaio constituía uma forma indirecta de medir a injectabilidade, e atendendo também ao recomendado em grande parte da normalização internacional vigente na altura, de não ultrapassar o valor de 25 segundos. Porém, contrariamente às expectativas, a injectabilidade das composições 4 a 7 não piorou comparada com a das composições 1 a 3, cujas injeções foram realizadas com o mesmo equipamento e nas mesmas condições de execução.

Foi esta observação que esteve na génese do presente trabalho, pois pôs-se de imediato a dúvida sobre se a fluidez das caldas medida através do seu escoamento no cone Marsh seria uma medida correcta de injectabilidade da calda, isto é, verificar-se-ia uma boa correlação entre os resultados do escoamento no cone Marsh e a injectabilidade ou não? Haveriam outros ensaios

alternativos com melhor correlação? É o que se procura dar resposta nos Capítulos seguintes.

3.3.3 - Equipamento de fabrico

Para fabrico das caldas de injeção foram utilizadas inicialmente misturadoras fornecidas pela Stronghold (sistema de pré-esforço).

Em face das inúmeras dificuldades surgidas nas primeiras injeções, que levaram à primeira medida rectificativa já referida de substituir o cimento de moagem especial ensacado em obra por cimento de fabrico corrente ensacado em fábrica, centrou-se a atenção nas misturadoras Stronghold. De facto, a legislação internacional vigente na altura, chamava a atenção para a necessidade de potência mínima da misturadora para que fosse eficaz, e parte dessa legislação recomendava mesmo uma velocidade mínima de rotação da misturadora da ordem das 1000 rot./min..

Em medida efectuada às misturadoras Stronghold, verificou-se que estas tinham uma velocidade de mistura de 180 rot./min. e uma velocidade de manutenção bastante inferior. Assim, decidiu-se utilizar outras misturadoras com maior velocidade de rotação, tendo o empreiteiro optado por misturadoras de rolos verticais (dois) que rodam em torno do seu eixo (vertical), mas em sentidos opostos, o que provoca elevada turbulência na mistura da calda. As novas misturadoras tinham velocidade de rotação de 1450 rot./min., tendo-se iniciado a sua utilização em Setembro de 1986 (composições 3).

As composições iniciais 1 e 2, correspondentes a caldas fabricadas com as misturadoras Stronghold utilizaram-se até Agosto de 1986.

3.3.4 - Características das caldas

3.3.4.1 - Quadros elaborados

No que respeita ao controlo das caldas utilizadas em obra, foram realizados sistematicamente durante a execução da obra, os boletins de recepção das caldas de cimento para injeção nas bainhas das armaduras de pré-esforço. Neste boletim, constante do Quadro 3.3, registava-se a designação do elemento estrutural em causa, as designações dos cabos, o número da amassadura, sua composição, hora de início e fim da amassadura (e respectiva duração), ensaio de fluidez (hora, temperatura ambiente,

temperatura da calda e tempo de escoamento no cone Marsh), peneiro utilizado na crivagem da calda, colheita de amostras, pressão de injeção e observações.

Este boletim era preenchido em todas as injeções efectuadas.

Para registo dos resultados dos diferentes ensaios efectuados, estes eram compilados nos “Boletins dos ensaios de recepção das caldas”, semelhantes aos adoptados para os betões - Quadro 3.4. Estes boletins estavam estruturados fundamentalmente para o registo das resistências mecânicas, registando-se nas observações as outras características. Nestes boletins registava-se o número da amostra, o número dos provetes, a data e hora da colheita, o resultado do ensaio de fluidez, a temperatura ambiente e da calda, a localização na obra da calda a que se referia a amostra, as datas de ensaio dos provetes, tensões de rotura (individuais e médias) e observações. Nesta última coluna registavam-se outros resultados para além da resistência à compressão e fluidez, como por exemplo a exsudação, variação de volume, densidade.

A partir destes dois conjuntos de registos disponíveis, foram agora elaborados os quadros que constituem os “Boletins de Recepção e Ensaio das Caldas”, apresentados no Anexo B - Quadros B1.1.1a a B1.7.6b, nos quais está concentrada a informação destes registos. Os quadros em causa estão organizados por composições e dentro de cada composição estão organizados cronologicamente, independentemente da parte da obra onde foram aplicadas. Para melhor entendimento dos locais de aplicação das caldas, apresentam-se em seguida as designações das partes da obra em que existia pré-esforço por cabos, cujas bainhas foram injectadas:

Obra 2 – Viaduto das Devesas

Obra 3 – Plataforma em escavação entre o Viaduto das Devesas e o Viaduto da Rua Cândido dos Reis

Obra 4 – Estação de General Torres e Viaduto entre a Rua Cândido dos Reis e o túnel da Serra do Pilar

Obra 6 – Plataforma em escavação após o túnel da Serra do Pilar

Obra 7 – Viaduto sobre a Rua Alfredo Faria de Magalhães

Obra 8 – Muro de suporte e plataforma em escavação no Morro da China

Obra 9 – Viaduto – Estacada a partir do Morro da China – Pórticos P1 a P36

Obra 10 – Viaduto – Estacada entre os Pórticos P37 e P55

Obra 11 – Viaduto sobre a Rua do Freixo e entrada na Estação de Campanhã

Obra 14 – Viaduto da margem esquerda de acesso à Ponte

Obra 15 – Ponte

Obra 16 – Viaduto da margem direita de acesso à Ponte

Obra 21 – Laboratório estrutural

Para facilitar a análise dos resultados obtidos, foram também elaborados os quadros resumo das características das caldas - Quadros B2.1 a B2.7, constantes do Anexo B, indicando-se para cada composição e para as respectivas características determinadas, quais os correspondentes número de ensaios, valor médio, desvio padrão, coeficiente de variação e para a resistência à compressão o valor característico, correspondente à probabilidade de ocorrência de 95%.

3.3.4.2 - Análise dos resultados

Para uma mais fácil percepção comparativa de resultados foram elaborados os Gráficos 3.1 a 3.3, nos quais se encontram expressos os valores médios obtidos para as três principais características (fluidez, resistência à compressão e exsudação) e para cada composição, em função da relação A/C.

Ir-se-á fazer uma análise dos resultados obtidos para as diferentes características das caldas à medida em que se foi evoluindo cronologicamente nas composições adoptadas.

Verifica-se que as composições 1 apresentam valores satisfatórios da resistência à compressão, da ordem dos 430 kg/cm² aos 28 dias, mas exsudações muito elevadas - valor médio de 2,6%, isto para uma fluidez (cone) média de 11,4 segundos.

Ao adoptar as composições 2, cujas composições diferem das anteriores fundamentalmente pela utilização de cimento de fabrico corrente ensacado na origem, verificou-se que se podiam utilizar relações A/C mais baixas que as anteriores, com características de fluidez próximas. Passou-se assim da relação A/C média de cerca de 0,42 nas composições 1 para a relação A/C = 0,38 nas composições 2, com uma ligeira quebra na fluidez (passou de 11,4 para 12,6 seg.). Obtiveram-se assim para as composições 2 resistências à compressão igualmente satisfatórias, com valor médio global de 468 kgf/cm² aos 28 dias. Quanto à exsudação registou-se uma sensível melhoria (valor médio passou de 2,6% para 1,9%).

A passagem das composições 2 para as composições 3 resultou da modificação das condições de amassadura das caldas por substituição da misturadora Stronghold por

uma misturadora de rolos de elevada velocidade de rotação. As consequências ao nível das características das caldas foi a obtenção de resistências à compressão também amplamente satisfatórias, com valores médios aos 28 dias de 445 kg/cm^2 . Aumentou-se a relação média A/C de 0,38 para 0,40, conseguindo-se uma melhor fluidez, que passou de 12,6 para 10,2 segundos e, mesmo assim, ainda se melhorou ligeiramente a exsudação que desceu de 1,9% para 1,8%.

Ao adoptarem-se as composições 4 em resultado da mudança do adjuvante de Conbex 100 (expansivo) para Conbex 208 (retentor de água), com uma dosagem de 1,2 kg por cada 100 kg de cimento, conforme indicação do fabricante (dosagem de 0,9 a 1,5% - normalmente 1,2%), verificou-se uma profunda alteração nas características das caldas. Em primeiro lugar há que registar a quebra completa da exsudação que, dos elevados valores registados nas primeiras 3 composições, muito próximos dos 2% (limite aceite internacionalmente), passou para 0%. Esta melhoria significativa anulou as preocupações que existiam quanto ao risco do não cumprimento do limite da exsudação e dos inconvenientes que daí resultavam, conforme já descrito anteriormente (3.3.2.c)). Porém, verificou-se que pioraram as restantes características: verificou-se uma quebra significativa na resistência à compressão que passou aos 28 dias de valores médios superiores a 400 kg/cm^2 para um valor médio de 266 kg/cm^2 , inferior aos 300 kg/cm^2 recomendado internacionalmente na altura. Este valor foi porém aceite, porque a legislação nacional vigente na altura (REBAP) recomendava apenas uma resistência à compressão de valor superior a 17 MPa aos 7 dias, registando-se para estas composições 4 o valor médio aos 7 dias de 206 kg/cm^2 (20,2 MPa), e com pequena dispersão. Considerou-se preferível a garantia de boas condições de enchimento das bainhas em detrimento de uma boa resistência à compressão. Como já referido em 3.3.2.c), os resultados do ensaio de fluidez (cone) aumentaram significativamente de 10,2 seg. para 40,3 seg. (valores médios), sem porém praticamente afectar a injectabilidade das caldas.

As composições 5 e 6 resultaram de erros verificados na medição do adjuvante em obra, correspondendo as composições 5 a uma dosagem metade da normal (0,600 kg/100 kg de cimento) e a composição 6 a um quarto do especificado (0,300 kg/100 kg de cimento). No entanto, dada a raridade destes enganos, estas composições quase não têm expressão quando comparadas com as restantes, pois totalizam no seu conjunto apenas 0,72% do total das amassaduras efectuadas. Porém, a análise dos resultados

obtidos permite concluir que se tratam de composições ainda com exsudação 0%, mas já com melhor resistência à compressão, apesar da quase igual relação A/C elevada (0,51 nas composições 4, 0,525 nas composições 5 e 0,45 na composição 6). Obtiveram-se valores médios da resistência à compressão aos 28 dias já superiores a 300 kg/cm²: 343 kg/cm² nas composições 5 e 303 kg/cm² nas composições 6, embora com pouca confiança nestes resultados devido aos poucos valores disponíveis (apenas 3 amostras de 3 cubos cada ensaiados aos 28 dias). A exsudação manteve-se em 0%. Quanto às composições 7, as últimas adoptadas, resultaram da diminuição da dosagem do adjuvante Conbex 208 do valor 1,2% nas composições 4 para 1,0% nestas composições 7.

Aproveitando as indicações das composições 5 e 6, com dosagens inferiores por erro de medição do adjuvante, resolveu-se finalmente diminuir um pouco a dosagem do adjuvante recomendada normalmente de 1,2% para o valor de 1,0% da massa do cimento, ainda dentro do limite recomendado pelo fabricante (0,9 a 1,5%). Sabia-se que a exsudação se manteria em 0% e esperava-se que se melhoraria um pouco quer a resistência à compressão quer a fluidez.

Assim aconteceu, tendo a resistência à compressão passado do valor médio de 266 kg/cm² aos 28 dias nas composições 4 para o valor médio de 335 kg/cm² aos 28 dias nas composições 7 e a fluidez passado do valor médio 40,3 segundos para 36,6 segundos nestas mesmas composições.

Quanto à relação A/C baixou de uma média de 0,51 para 0,44.

Concluiu-se assim, ser tecnicamente preferível (e até economicamente) a utilização de uma dosagem do adjuvante ligeiramente inferior ao valor médio recomendado pelo fabricante.

Fluidez

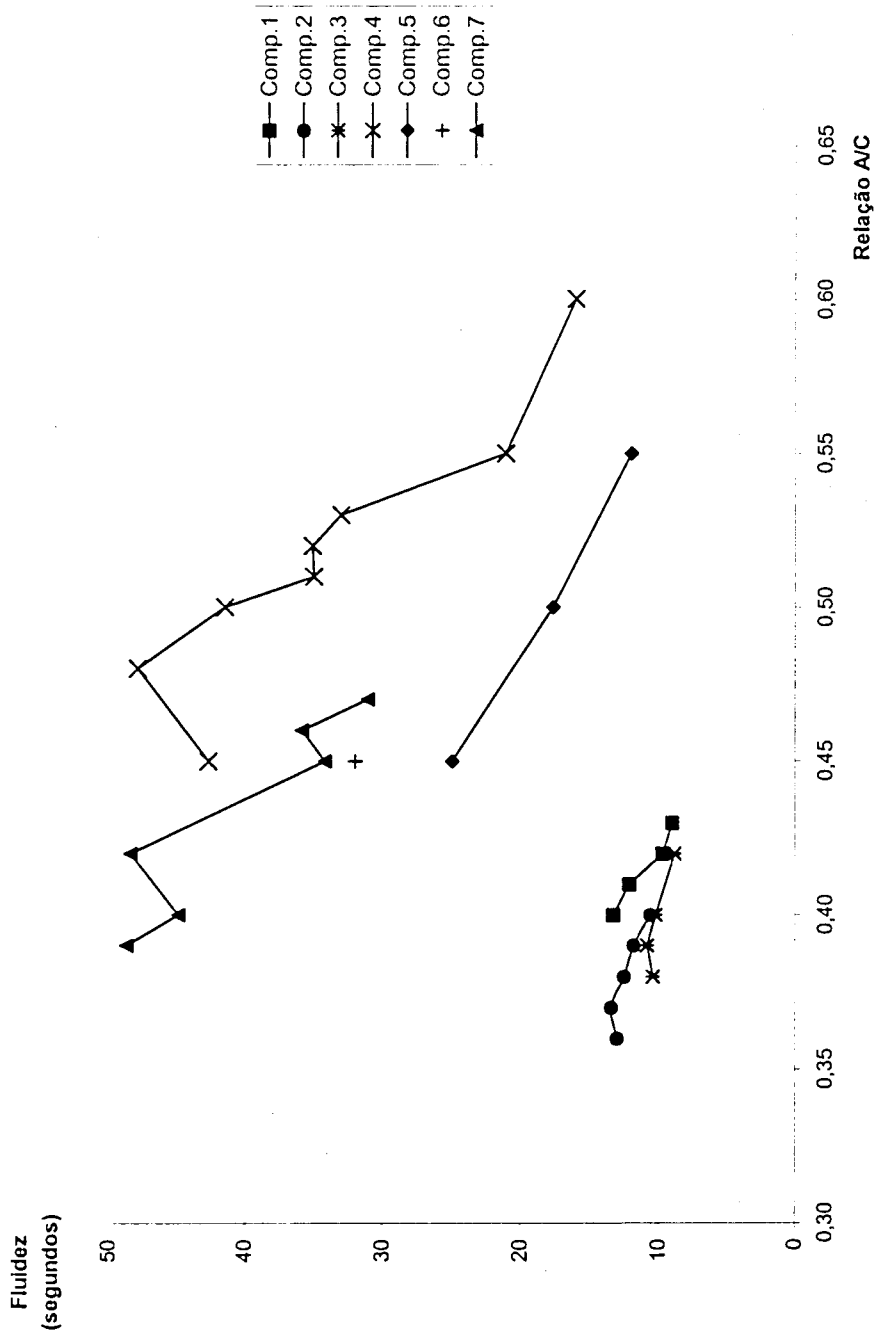


Gráfico 3.1 – Valores médios da fluidez das diferentes composições.

Resistência à Compressão

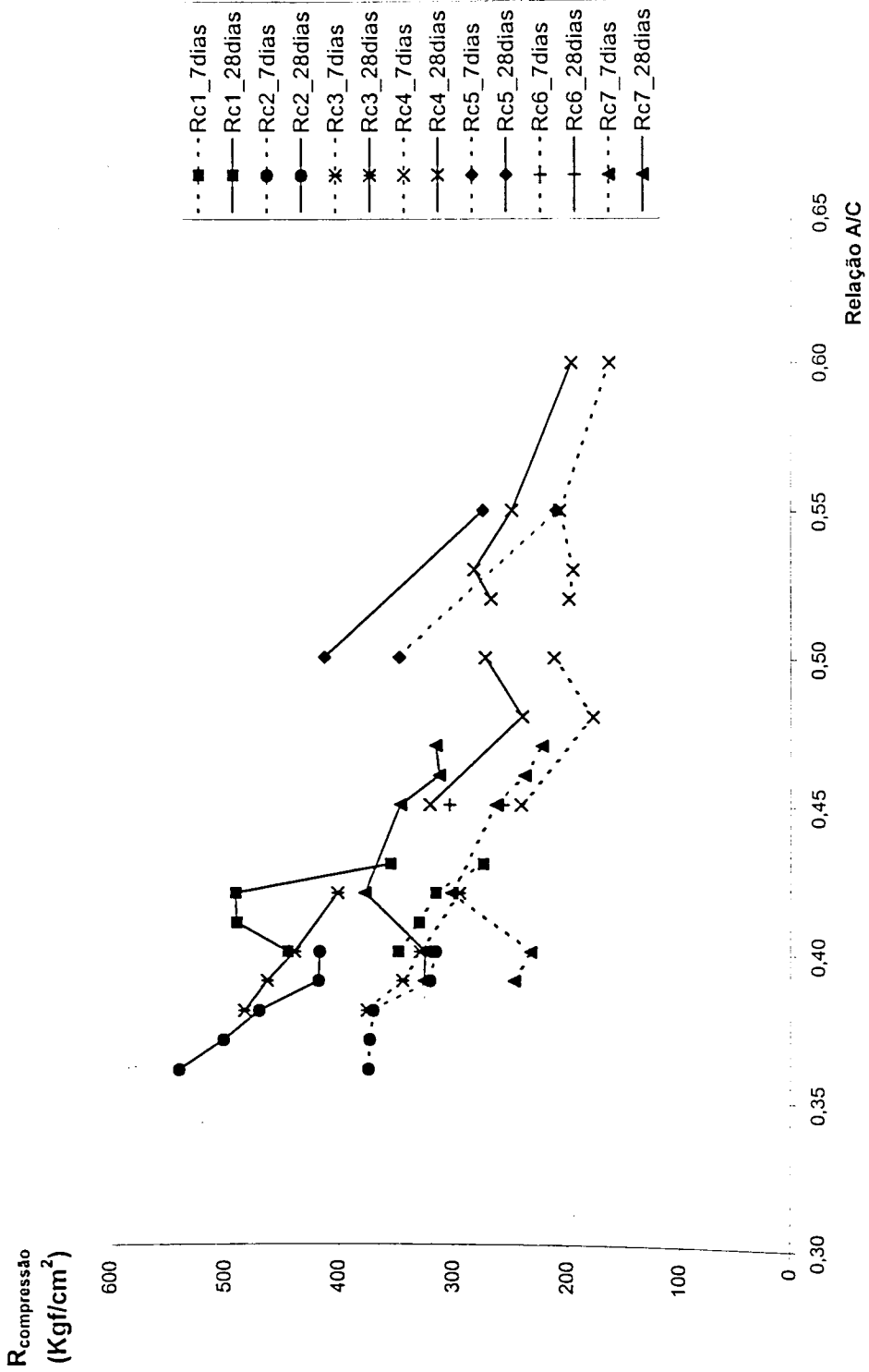


Gráfico 3.2 – Valores médios da resistência à compressão das diferentes composições.

Exsudação

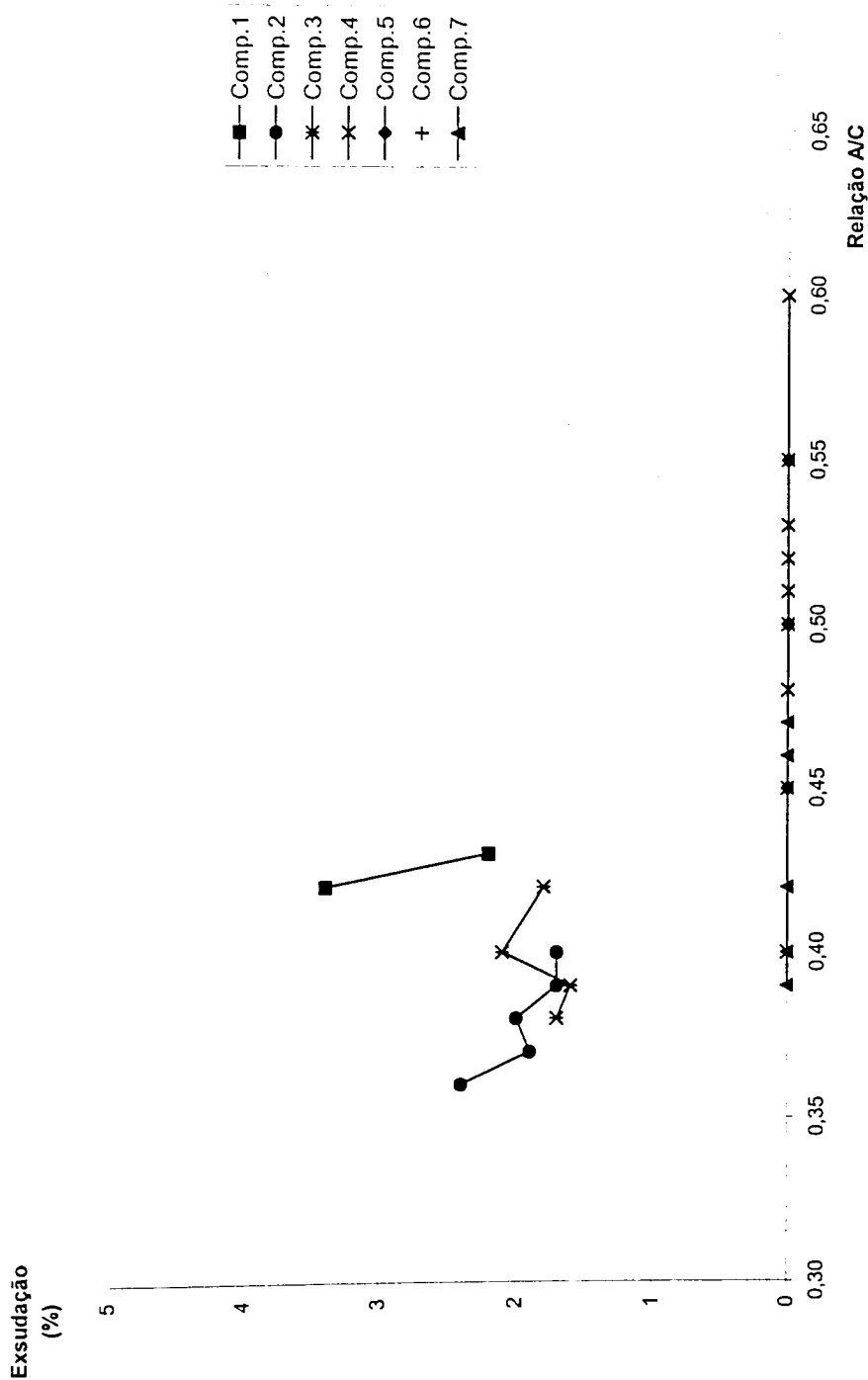


Gráfico 3.3 – Valores médios da exsudação das diferentes composições.

Capítulo 4

ANÁLISE EXPERIMENTAL - ENSAIOS REALIZADOS NO L.C.P.C. (PARIS) E SUAS CONCLUSÕES

4.1 - INTRODUÇÃO

Realizou o signatário da presente tese um conjunto de ensaios experimentais no L.C.P.C. - Laboratoire Central des Ponts e Chaussés”, na divisão de “Surveillance et Pathologie des Ouvrages d’Art” sobre caldas de injeção.

Numa primeira fase dos ensaios procedeu-se à medida das características gerais das caldas de injeção, tendo-se considerado como características principais a fluidez e a exsudação e como características complementares, também medidas, as resistências mecânicas (flexão e compressão), a retracção, os tempos início e fim de presa, a determinação da falsa presa, a absorção capilar e a variação de volume.

Numa fase intermédia dos ensaios, que correspondeu à parte principal dos ensaios, foi feita a comparação de dois métodos de ensaio para medir a fluidez - ensaio do cone de Marsh e ensaio de imersão. Esta comparação foi feita, quantificando a relação directa que existe entre os resultados destes ensaios em diferentes tipos de caldas, e complementarmente comparando esses resultados com os obtidos no ensaio de injectabilidade na coluna de areia, ensaio que se encontra normalizado em França e que já foi referido no Capítulo 2 [43].

Numa última fase dos ensaios estudou-se uma utilização específica de uma calda de injeção. Tratou-se da reparação de betões que apresentam grande segregação e após descofragem grandes vazios e/ou grandes cavidades. Esta reparação consiste no enchimento destes vazios com agregados inertes e posterior injeção de uma calda que vai encher os vazios dos agregados. Para simular em laboratório estes betões degradados encheram-se moldes metálicos cilíndricos com $\phi = 16$ cm e $h = 32$ cm com agregados de diferentes granulometrias tendo-se depois procedido à injeção destes moldes com caldas de diferentes composições a partir da extremidade inferior dos cilindros, que se mantinham verticais durante a injeção. O estudo incidiu apenas na

quantificação da resistência à compressão deste betão de reparação, tendo-se deixado para outra oportunidade o estudo complementar de outras características que se julgam igualmente importantes, como a resistência à tracção, o módulo de elasticidade, retracção, permeabilidade (durabilidade) e aderência entre o betão antigo e o betão de reparação. Seguidamente ir-se-á tratar da parte intermédia deste conjunto de ensaios, cujo objecto está mais próximo do tema da presente dissertação.

4.2 - RELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MEDIÇÃO DA FLUIDEZ: ENSAIO DO CONE DE MARSH E ENSAIO DE IMERSÃO

4.2.1 - Ensaio do cone de Marsh

Este ensaio foi realizado de acordo com a normalização vigente [36], tendo já sido descrito anteriormente (2.3.1 a)).

4.2.2 - Ensaio de imersão

Como o L.C.P.C. não possuía o equipamento do ensaio de imersão, visto que em França o ensaio corrente de fluidez é o ensaio do cone de Marsh, optou-se pela improvisação de um ensaio comparável, baseado no mesmo princípio.

À semelhança do ensaio de imersão normalizado, o equipamento do ensaio consistiu fundamentalmente numa proveta e num imersor que penetra na proveta cheia com calda, medindo-se o tempo de penetração de uma determinada extensão do imersor.

Para este efeito foi construído um imersor conforme indicado na Figura 4.1, tendo-se utilizado uma proveta com diâmetro interior 33 mm e altura 51 cm.

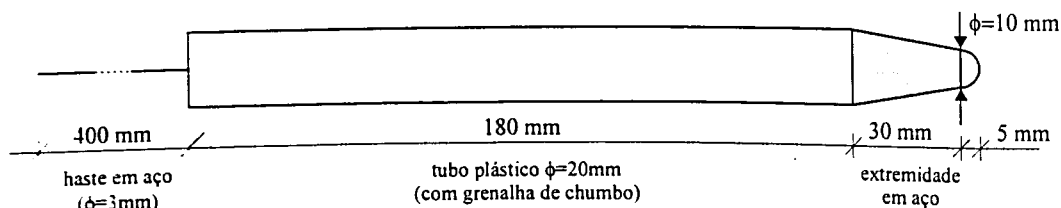


Figura 4.1 - Geometria do imersor.

Inicialmente procedeu-se ao estudo da massa mais conveniente para o imersor, tendo-se para o efeito utilizado várias massas de grenalha de chumbo em diferentes tipos de caldas (massa do imersor sem grenalha = 70 gramas).

Concluiu-se pela utilização de 243 gramas de grenalha de chumbo, considerada mais adequada para a gama de fluidez mais corrente nas caldas de injeção das bainhas de pré-esforço. Dispensa-se a apresentação dos quadros e gráficos elaborados que relacionavam as medidas da fluidez pelo cone Marsh e por este ensaio de imersão para diferentes caldas e diferentes massas do imersor.

Estes ensaios preliminares permitiram também tirar outras duas conclusões:

- A descida do imersor não era uniforme, pois quando chegava ao fundo da proveta, principalmente para as caldas menos fluidas, a velocidade de descida diminuía. Para obviar a este facto fixou-se um dispositivo transversal na parte superior da haste do imersor, para que ele parasse antes de atingir o fundo da proveta.

- Verificou-se que era necessário aumentar a altura de queda do imersor dentro da proveta, por um lado devido à conclusão precedente e por outro a fim de evitar ter de variar a massa de grenalha de chumbo consoante a calda era mais ou menos fluída. Assim optou-se pela massa de grenalha de chumbo de 243 gramas conforme já referido e alterou-se a proveta, passando-se a utilizar uma proveta com diâmetro interior de 32 mm (em vez de 33 mm) e uma altura interior de 70 cm (em vez de 51 cm). Com esta alteração a altura de queda do imersor passou para 40 cm, ficando imobilizado a 8,5 cm do fundo (70 - 40 - 21,5). Anteriormente a queda era completa (até ao fundo), numa extensão de 29,5 cm (51 - 21,5).

Após estas alterações procedeu-se a nova série de ensaios, tendo-se utilizado a massa de grenalha de chumbo de 243 gr. com vários tipos de caldas, com diferentes valores de A/C, medindo-se os tempos para metade da altura de queda (20 cm) e para a queda completa (40 cm). Constatou-se porém, que na gama de fluidez recomendada (15 a 25 segundos no cone de Marsh), os tempos do ensaio de imersão eram relativamente baixos. Para modificar estes tempos, poder-se-ia quer aumentar a altura de queda, quer diminuir a massa de grenalha de chumbo. Optou-se por esta última hipótese, tendo-se experimentado novamente várias massas da grenalha de chumbo (150, 175, 200 e 243 gr.) e concluído pela utilização de 200 gr..

Novamente se considera dispensável a apresentação detalhada dos resultados obtidos. Após a afinação das condições de realização deste ensaio, passou-se ao estudo comparativo dos dois métodos de medição da fluidez.

4.2.3 - Relação entre os resultados dos ensaios do cone Marsh e do ensaio de imersão

Para a obtenção da relação entre os resultados do ensaio do cone de Marsh e do ensaio de imersão nas condições anteriormente descritas foram feitas medições em caldas com diferentes composições. No Quadro 4.1 encontram-se indicadas quais as composições utilizadas e os resultados obtidos nos ensaios em causa.

Foram utilizados quatro tipos de composição, e em cada tipo fez-se variar a relação A/C para se fazer variar a fluidez.

Os tipos de composição considerados foram:

Tipo 1 - cimento + água

Tipo 2 - cimento + água + adjuvante "Melment"

Tipo 3 - cimento + água + sílica de fumo + adjuvante "Chryso GT"

Tipo 4 - cimento + água + adjuvante "Chryso GT".

Para uma mais fácil visualização dos resultados foi elaborado o Gráfico 4.1 no qual se relacionam os dois ensaios de medição da fluidez das caldas de injeção, tendo-se marcado os pontos representativos dos resultados obtidos e posteriormente traçadas as curvas que traduzem essa relação para cada tipo de composição.

Verificou-se que consoante a composição da calda, para um mesmo tempo de escoamento medido no cone Marsh obtinham-se tempos de queda no ensaio de imersão diferentes.

Assim, afigurou-se que não se estava a medir a mesma característica, pois não se verifica uma relação única entre os resultados obtidos. Punha-se então a questão de qual dos dois ensaios media melhor a fluidez das caldas de injeção.

Quadro 4.1a - Comparação entre a medição da fluidez de diferentes caldas de injeção com o cone de Marsh e com o ensaio de imersão (massa da grenalha de chumbo 200 gr.)

Composição da calda		Ensaio do cone de Marsh (seg.)		Ensaio de imersão (seg.)	
Constituintes	Dosagens	Medidas individuais	Média	Medidas individuais (meia altura e queda total)	Média
Cimento + água	A/C = 0.46 ; t = 0 (cimento – 5.5 kg água – 2.32 l)	11.7	11.7	2.56/2.09/2.30/2.02/2.11 5.13/5.49/5.03/5.47/5.34	2.22 5.29
	+ 0.055 l água	10.3	10.3	1.13/1.66/1.06/1.78/1.47/1.34 2.92/3.87/2.34/3.63/3.53/3.18	1.41 3.25
	+ 0.055 l água	9.7/9.9	9.8	1.35/1.19/1.14/0.86/1.06/1.16 2.56/2.44/2.54/1.91/2.31/2.56	1.13 2.39
	+ 0.825 l água	8.7	8.7	0.88/0.77/0.77/0.83/0.75/0.78 1.73/1.51/1.62/1.67/1.51/1.47	0.80 1.59
	+ 0.0825 l água	8.0	8.0	0.61/0.74/0.67/0.60/0.61/0.64 1.18/1.27/1.17/1.11/1.18/1.19	0.65 1.18
	+ 650 gr. cim.	15.9	15.9	5.47/4.37/4.62/5.89/4.84/4.83 12.90/10.89/12.37/13.74/13.16/12.64	5.00 12.62
	+ 75 gr. cim.	19.2	19.2	9.46/8.92/8.60/8.41/9.34/8.91 20.39/24.69/21.67/23.23/20.40/21.09	8.94 21.91
	+ 75 gr. cim.	27.4	27.4	13.49/10.59/13.92/12.78/11.40/10.88 - /25.31/ - /28.91/29.11	12.18 27.78
	+ 25 gr. cim.	38.0	38.0	16.75/16.80/16.82/17.34/16.84 46.45/48.85/ - / - / -	16.91 47.65
	+ 25 gr. cim.	1' 12,7"	1' 13"	24.06/18.30/20.00/22.73/19.35/17.52 - / - / - / - / 55.5	20.33 -
	A/C = 0.375 (cimento – 3.5 kg água – 1.3155 l)	26.4	26.4	10.87/11.11/10.77/12.32/11.60 27.40/27.41/ - /31.65/28.78	11.33 28.81
	-	30.7	30.7	13.54/13.24/14.03/13.34/13.50 33.25/ - /35.95/36.59/ -	13.53 35.26
	-	33.1	33.1	14.30/13.87/15.10/14.16 - /41.46/ - /44.0	14.36 42.73
	-	37.8	37.8	16.89/15.71/16.76 - / - / -	16.45 -
	-	39.4	39.4	16.82/16.04/16.38/16.39 - / - / - /46.01	16.41 -
-	57.0	57.0	22.68/22.11/23.06 - / - / -	22.62 -	

Quadro 4.1b - Comparação entre a medição da fluidez de diferentes caldas de injeção com o cone de Marsh e com o ensaio de imersão (massa da grenalha de chumbo 200 gr.)

(continuação)

Composição da calda		Ensaio do cone de Marsh (seg.)		Ensaio de imersão (seg.)	
Constituintes	Dosagens	Medidas individuais	Média	Medidas individuais (meia altura e queda total)	Média
Cimento + água + adjuvante Melment (3% cim.)	A/C = 0.36 ; t = 0 (cimento – 5.5 kg água – 1.848 kg adj. – 165 gr.)	14.5	14.5	1.13/1.25/1.19/1.20 2.26/2.34/2.26/2.55	1.19 2.35
	+ 100 gr. cim. + 3 gr. adjuv.	13.5	13.5	1.25/1.07/1.05/1.20/1.16/1.02 2.67/1.99/2.16/2.60/2.55/2.42	1.13 2.40
	+ 200 gr. cim. + 6 gr. adjuv.	14.4	14.4	1.28/1.46/1.33/1.66 3.13/3.13/3.19/3.25	1.43 3.18
	+ 200 gr. cim. + 6 gr. adjuv.	17.9	17.9	1.96/2.71/2.26/2.32 5.30/6.17/5.58/5.32	2.31 5.59
	+ 200 gr. cim. + 6 gr. adjuv.	23.5	23.5	4.84/4.42/4.80/4.48 13.73/12.85/13.55/14.27	4.64 13.60
	A/C = 332; t = 0 (cimento – 6 kg água – 1.848 kg adj. – 180 gr.)	19.5	19.5	2.32/2.23/2.47/2.29/2.31 5.04/5.01/5.64/5.36/5.75	2.32 5.36
	+ 200 gr. cimento + 6 gr. adjuv.	25.0	25.0	4.06/4.31/3.96 10.72/11.64/11.45	4.11 11.27
	+ 200 gr. cimento + 6 gr. adjuv.	39.9	39.9	17.93 55.70	- -
	+ 30 gr. adjuv.	18.4	18.4	2.01/1.34/1.63/1.37/1.79 4.19/3.19/3.50/3.22/3.57	1.63 3.53
	+ 300 gr. cimento + 12 gr. adjuv.	38.9	38.9	15.42/17.18/ - / -	16.30
Cimento + água + adjuv. Chryso GT + sílica de fumo	A/C = 0.33; t = 0 (cimento – 5 kg s.f. – 0.560 kg adj. – 0.168 kg água – 1.717 kg)	11.4	11.4	0.82/0.70/0.91/0.77/0.80 1.48/1.43/1.58/1.46/1.49	0.80 1.49
	+ 100 gr. cimento + 11 gr. s.f. + 3.5 gr. adj.	11.6	11.6	0.70/0.77/0.72/0.84 1.36/1.29/1.29/1.46	0.76 1.35
	+ 300 gr. cimento + 33 gr. s.f. + 10.5 gr. adj.	13.9	13.9	0.93/0.90/1.04/1.04/0.99 1.88/2.09/2.07/1.93/1.97	0.98 1.99
	+ 300 gr. cimento + 33 gr. s.f. + 10.5 gr. adj.	16.7	16.7	1.19/1.27/1.23/1.10/1.20 2.48/2.34/2.23/2.32/2.33	1.20 2.34
	+ 300 gr. cimento + 33 gr. s.f. + 10.5 gr. adj.	21.3	21.3	2.01/1.90/2.10/1.65/1.80 4.12/3.84/4.57/3.58/3.84	1.89 3.99

Quadro 4.1c - Comparação entre a medição da fluidez de diferentes caldas de injeção com o cone de Marsh e com o ensaio de imersão (massa da grenalha de chumbo 200 gr.)

(continuação)

Composição da calda		Ensaio do cone de Marsh (seg.)		Ensaio de imersão (seg.)	
Constituintes	Dosagens	Medidas individuais	Média	Medidas individuais (meia altura e queda total)	Média
Cimento + água + adjuv. Chryso GT + sílica de fumo	+ 300 gr. cimento + 33 gr. s.f. + 10.5 gr. adj.	30.2	30.2	3.40/3.19/3.28/3.60 7.62/7.62/6.89/7.88	3.37 7.50
	A/C = 265; t = 0 (cimento – 5.04 kg s.f. – 0.560 kg adj. – 0.168 kg água – 1.368 kg)	26.2	26.2	2.32/2.45/2.39/2.02 4.76/5.17/4.87/4.30	2.30 4.78
	+ 252 gr. cimento + 28 gr. s.f. + 8.4 gr. adj.	35.5	35.5	5.14/5.04/4.79/4.85 11.46/12.25/11.24/11.92	4.96 11.72
	-	1' 06.9"	1' 07"	22.63/18.30/22.24 - /1'05.6"/ -	21.06 -
Cimento + água + adjuv. Chryso GT (3% cim.)	A/C = 0.33; t = 0 (cimento – 5 kg adj. – 0.150 kg água – 1.545 kg)	14.3/14.0	14.2	0.81/0.82/0.74/0.82/0.81 1.62/1.66/1.47/1.65/1.60	0.80 1.60
	+ 200 gr cimento + 6 gr. adjuv.	15.8	15.8	0.78/0.91/0.92/0.91/0.84 1.53/1.69/1.66/1.66/1.67	0.87 1.64
	+ 300 gr. Cimento + 9 gr. adjuv.	21.5	21.5	1.19/1.07/1.06/1.06/1.08 2.36/2.19/2.14/2.40/2.33	1.09 2.28
	+ 250 gr. cimento + 7.5 gr adjv.	27.8	27.8	1.44/1.35/1.35/1.36/1.28 2.98/2.70/2.90/2.79/2.59	1.36 2.79
	+ 200 gr. cimento + 6 gr. adjuv.	35.2	35.2	1.99/1.98/1.91/1.62/1.89 3.79/3.88/3.85/3.36/4.13	1.88 3.80

4.2.4 - Comparação com o ensaio de injectabilidade na coluna de areia

Tendo em conta as diferenças obtidas com os dois métodos, completou-se o estudo utilizando um ensaio concebido pelo "LCPC" para a formulação de caldas de injeção para pequenas fissuras, aplicável a todos os produtos destinados a reparação por injeção das estruturas de betão. Trata-se do ensaio de injectabilidade na coluna de areia, já referido anteriormente [43].

O ensaio consiste em injectar a calda a testar, sob pressão constante, num tubo plástico transparente cheio de areia calibrada, mantido na posição vertical. A injeção faz-se a partir da extremidade inferior do tubo, medindo-se o tempo necessário para encher o tubo com a calda, e registando-se também os tempos necessários para se atingirem níveis intermédios (de 5 em 5 cm de altura de enchimento).

Dadas as condições de ensaio adiante descritas, optou-se pela medição apenas do tempo de enchimento total, medindo-se complementarmente o caudal da calda à saída do tubo.

4.2.4.1 - Escolha da granulometria da areia

O ensaio da coluna de areia destinou-se originalmente ao estudo de polímeros e de caldas de injeção para fissuras de pequena espessura.

A granulometria da areia prevista na norma NF P18-891 (0,63 - 1,25 mm), não sendo conveniente para caldas habituais de injeção das bainhas de pré-esforço, obrigou à pesquisa de uma outra granulometria da areia que pudesse ser injectada com uma calda para bainhas de pré-esforço com uma fluidez de acordo com as recomendações.

Experimentaram-se seis fracções granulométricas com duas composições distintas de calda. As fracções granulométricas consideradas foram as seguintes:

1/2 mm; 2/4 mm; 2,5/4 mm; 4/6,3 mm; 4/8 mm; 6,3/8 mm.

Quanto às duas composições de caldas utilizadas, uma era apenas constituída por cimento e água, com relação A/C = 0,415 e a outra, além do cimento e água, com A/C = 0,33, incluía também o adjuvante Chryso GT na sua composição (3% da massa de cimento).

Os resultados obtidos encontram-se expressos no Quadro 4.2. Pela sua análise concluiu-se que as três fracções mais grossas são as utilizáveis. Escolheu-se a fracção 4/8 mm, mais fácil de obter por peneiração do que as outras duas fracções (maior quantidade de fracção obtida a partir da mesma quantidade da areia base disponível).

Quadro 4.2 - Injecção da coluna com diferentes granulometrias de areias (pressão de injecção = 0.75 kgf/cm²)

Composição das caldas	Ensaio do cone de Marsh (seg.)	Ensaio de imersão (seg.)		Tempo de enchimento da coluna com as granulometrias					
		Medidas individuais	Média	1/2 mm	2/4 mm	2.5/4 mm	4/6.3 mm	4/8 mm	6.3/8 mm
Cimento - 4 kg Água - 1.236 kg Adjuv. Chryso GT - 0.120 kg	14.3	0.88/0.90/0.79/0.72/0.82 1.76/1.80/1.66/1.59/1.73	0.82 1.71	-	4 min. 24 seg.	3 min. 14 seg.	16.4 seg.	14.7 seg.	9.5 seg.
Cimento - 4 kg Água - 1.660 kg (A/C = 0.415)	13.8	2.38/1.93/1.95/2.46/2.48 5.70/5.23/5.54/5.41/5.26	2.24 5.43	-	-	Parag. a 25 cm	44.5 seg.	19.3 seg.	13.6 seg.

4.2.4.2 - Afinação das condições de ensaio com a granulometria escolhida

Os ensaios foram realizados de acordo com a norma francesa correspondente - NF P18-891 [43]. Porém foi necessário introduzir algumas alterações de menor importância, devido à diferente fracção granulométrica utilizada, que se passam a referir:

- Substituição das malhas do peneiro de 0,5 mm de abertura colocadas no interior da coluna contendo a areia compactada, por malhas do peneiro de 3 mm de abertura.
- Utilização destas malhas quadradas de abertura 3 mm convenientemente dobradas em forma aproximadamente semi-esférica para impedir a obturação pela areia da entrada e da saída da calda na coluna.
- Utilização de rolhas de borracha colocadas nas extremidades da coluna com orifícios mais largos (com maior diâmetro) que os previstos na norma, de modo que a perda de carga do escoamento nos orifícios continue muito pequena relativamente à perda no escoamento através da areia.

Estas alterações permitiram obter resultados coerentes.

Acrescenta-se que a amassadura das caldas foi efectuada com um misturador de hélice com velocidade de rotação de 1450 rot./min. e nas seguintes condições:

água + adjuvante Chryso GT (eventualmente): 30 segundos

+ cimento : + 4 minutos

A pressão de injeção escolhida foi constante em todas as injeções e igual a 0,75 kgf/cm² (valor constante da Norma NF P18-891).

4.2.4.3 - Experimentação de diferentes caldas

A fim de comparar os resultados obtidos na injeção da coluna de areia com os resultados dos dois ensaios de medida da fluidez já estudados - ensaio do cone de Marsh e ensaio de imersão - escolheram-se dois tipos de composição de caldas com os quais se obteve anteriormente maior diferença de resultados de medida da fluidez com os dois ensaios de referência (Gráfico 3.1).

Tratam-se das seguintes composições:

1 - cimento + água

2 - cimento + água + adjuvante Chryso GT.

Os diferentes ensaios de injectabilidade foram efectuados na coluna de areia seca e na coluna de areia húmida.

- a) Areia seca: os resultados de injectabilidade obtidos na coluna (tubo) de areia seca encontram-se indicados nos Quadros 4.3.
- b) Areia húmida: a única alteração no método de ensaio descrito para a areia seca é a humedificação prévia da areia. Os resultados obtidos na injeção dos dois tipos de composição de caldas na coluna de areia húmida encontram-se apresentados no Quadro 4.4.

Quadro 4.3a - Injecção da coluna cheia de areia seca

Composição das caldas		Ensaio do cone de Marsh (seg.)	Ensaio de imersão (seg.)		Coluna de areia 4/8 mm	
Constituintes	Dosagens		Medidas individuais	Média	Tempo de enchimento (seg.)	Caudal (gr./min.)
Cimento - água	A.C = 0.50; t = 0 (cimento - 4 kg água - 2 kg	8.7	0.55/0.68/0.55/0.51 0.99/1.06/1.00/0.92	- 0.99	6.3	762
	+ 300 gr. cimento	10.8	1.12/0.92/0.96/0.93 2.04/2.08/2.13/2.06	- 2.08	10.9	342
	+ 225 gr. cimento	13.8	1.94/1.45/1.98/1.56 4.74/3.93/4.43/4.27	- 4.34	27.0	115
	+ 100 gr. cimento	15.1	2.47/2.55/2.52/2.37 6.08/6.35/5.42/6.33	- 6.05	38.4	59
	- 75 gr. cimento	17.2	4.02/4.06/3.45/3.35 10.11/9.61/8.18/9.04	- 9.24	1' 21"	8
	A.C = 441; t = 0 (cim. - 4.3 kg água - 1.9 kg)	16.9	3.20/2.99/3.16/3.01 7.44/6.41/6.86/6.69	- 6.85	51	44
	A.C = 422; t = 0 (cim. - 4.5 kg água - 1.9 kg)	14.1	2.79/2.00/2.54/2.60 6.62/6.49/6.88/6.06	- 6.51	32	84
	+ 75 gr. cimento	16.2	3.40/2.40/2.83/2.46/3.13 8.49/6.99/7.38/7.26/8.32	- 7.69	45	17
Cimento - água + adjuvante Chryso GT	cimento - 4.5 kg água - 1.615 kg adj. - 0.135 kg	10.7	0.66/0.61/0.60/0.65 1.02/1.06/1.09/1.00	- 1.04	9.5	816
	+ 450 gr cimento + 13.5 gr. adj.	15.1	0.92/0.85/0.85/0.93 1.59/1.59/1.58/1.64	- 1.60	14.1	511
	+ 250 gr cimento - 7.5 gr. adj.	19.2	0.94/0.96/0.99/0.90 1.79/1.78/1.87/1.71	- 1.79	23.6	401
	+ 175 gr cimento + 5.25 gr. adj.	22.3	1.07/1.15/1.01/1.12 2.22/2.31/2.48/2.20	- 2.30	1' 45"	229
	+ 200 gr cimento + 6 gr. adj.	28.9	1.34/1.38/1.28/1.35 2.52/2.62/2.56/2.58	- 2.57	1' 27"	208
	cimento - 4.5 kg água - 1.325 kg adj. - 0.135 kg	16.4	0.89/0.83/0.93/0.87 1.62/1.63/1.67/1.54	- 1.62	24.4	456
	+ 300 gr cimento + 9 gr. adj.	24.2	1.40/1.36/1.16/1.26 2.67/2.58/2.66/2.57	- 2.62	1' 36"	227
	- 200 gr cimento + 6 gr. adj.	32.1	1.36/1.29/ - / 1.39 2.82/2.80/2.57/2.74	- 2.73	3' 35"	143
	+ 100 gr cimento + 3 gr. adj.	34.0	1.83/1.66/1.70/1.76 3.27/3.30/3.19/3.28	- 3.26	-	122
	+ 100 gr cimento + 3 gr. adj.	37.8	2.65/2.44/2.56/2.20 5.24/4.75/4.82/4.27	- 4.77	-	107 (155 para pr. inj. = 1.0 kgf/cm ²)
	cimento - 4.5 kg água - 1.265 kg adj. - 0.135 kg	22.4	1.35/1.40/1.28/1.30 2.57/2.63/2.43/2.43	- 2.52	1' 30"	245
	+ 400 gr cimento + 12 gr. adj.	36.7	1.70/1.71/1.76/1.77 3.31/3.34/3.48/3.31	- 3.36	-	112
	+ 200 gr cimento + 6 gr. adj.	1' 00"	6.67/5.48/5.81/6.75/6.58 14.14/11.31/12.09/14.09/13.79	- 13.1	-	29

Quadro 4.3b - Injeção da coluna cheia de areia seca (continuação)

Composição das caldas		Ensaio do cone de Marsh (seg.)	Ensaio de imersão (seg.)		Coluna de areia 4/8 mm	
Constituintes	Dosagens		Medidas individuais	Média	Tempo de enchimento (seg.)	Caudal (gr./min.)
Cimento + água + adjuvante Chryso GT	cimento – 4,5 kg água – 1.215 kg adj. – 0.135	26.8	1.79/1.86/1.75/1.64 3.18/3.35/3.23/3.23	- 3.25	-	222
	cimento – 4,5 kg água – 1.215 kg adj. – 0.135	25.8	1.42/1.24/1.35/1.22 2.53/2.35/2.43/2.60	- 2.48	-	253
	+ 200 gr. cimento + 6 gr. adj.	39.5	2.10/2.11/2.23/2.34 4.40/4.29/4.21/4.30	- 4.30	-	80
	+ 100 gr. cimento + 3 gr. adj.	43.6	2.54/2.38/2.31/2.31 5.09/4.68/4.67/4.66	- 4.78	-	108
	+ 150 gr. cimento + 4.5 gr. adj.	1' 05"	4.03/3.63/3.48/3.60/3.44 9.10/7.59/7.56/8.09/7.44	- 8.00	-	11

Quadro 4.4 - Injeção da coluna cheia de areia húmida

Composição das caldas		Ensaio do cone de Marsh (seg.)	Ensaio de imersão (seg.)		Coluna de areia 4/8 mm	
Constituintes	Dosagens		Medidas individuais	Média	Tempo de enchimento (seg.)	Caudal (gr./min.)
cimento + água	cimento – 4.2 kg água – 2.1 kg	8.6	1.03/1.03/0.94/1.00	1.00	2.24	1327
	+ 300 gr. cimento	10.1	1.24/1.31/1.42/1.49/1.45	1.38	2.32	655
	+ 250 gr. cimento	11.9	2.10/2.63/2.93/2.26/2.80	2.54	4.99	252
	+ 130 gr. cimento	13.1	3.76/3.48/3.76/3.75/4.14	3.78	5.61	203
	+ 100 gr. cimento	13.4	4.58/4.52/4.29/4.76/4.75	4.58	8.22	120
	+ 100 gr. cimento	17.0	7.92/7.20/8.58/8.97/7.58	8.05	9.71	80
Cimento + água + adjuvante Chryso GT	cimento – 4.5 kg água – 1.615 kg adj. – 0.135 kg	10.2	1.02/0.98/1.03/1.02	1.01	2.69	1110
	+ 450 gr. cimento + 13.5 gr adj.	14.2	1.50/1.49/1.52/1.51	1.51	5.57	541
	+ 300 gr. cimento + 9 gr adj.	17.8	1.99/1.94/1.95/1.91	1.95	7.70	461
	+ 200 gr. cimento + 6 gr adj.	21.2	2.33/2.31/2.45/2.31	2.35	8.96	376
	+ 200 gr. cimento + 6 gr adj.	24.3	2.96/2.73/2.69/2.76/2.77	2.78	12.88	273
	+ 200 gr. cimento + 6 gr adj.	31.0	3.95/3.72/3.73/3.69/3.71	3.76	16.75	228
	+ 200 gr. cimento + 6 gr adj.	47.5	5.71/5.71/5.93/5.61	5.74	26.46	125
	+ 150 gr. cimento + 4.5 gr adj.	1'18.2"	11.5/11.7/12.0/12.3	11.9	42.59	63

4.2.4.4 – Conclusões – Comparação dos ensaios

Os Gráficos 4.2 a 4.9 permitem comparar os resultados dos ensaios de injeção da coluna de areia (tempo de enchimento e caudal) com as medidas de fluidez efectuadas (ensaio do cone de Marsh e ensaio de imersão).

A análise destas curvas permite concluir:

- a) Por um lado que os resultados obtidos com a areia húmida têm menor dispersão do que os obtidos com a areia seca.
- b) Por outro lado que somente a comparação entre o caudal de calda à saída da coluna e o tempo de ensaio de imersão verificam uma relação independente da composição da calda estudada (Gráficos 4.5 e principalmente 4.9, no qual as curvas praticamente coincidem).

Assim, o ensaio de imersão parece caracterizar melhor a aptidão de uma calda, qualquer que seja, a penetrar por injeção num dado meio e, portanto, será preferível a utilização deste ensaio aquando da formulação das composições das caldas em laboratório.

Uma vez escolhida a composição e a respectiva fluidez, poder-se-á usar o cone de Marsh, de mais fácil utilização, para realizar o controle da fluidez “in situ”.

Ensaio de Imersão / Ensaio de cone Marsh

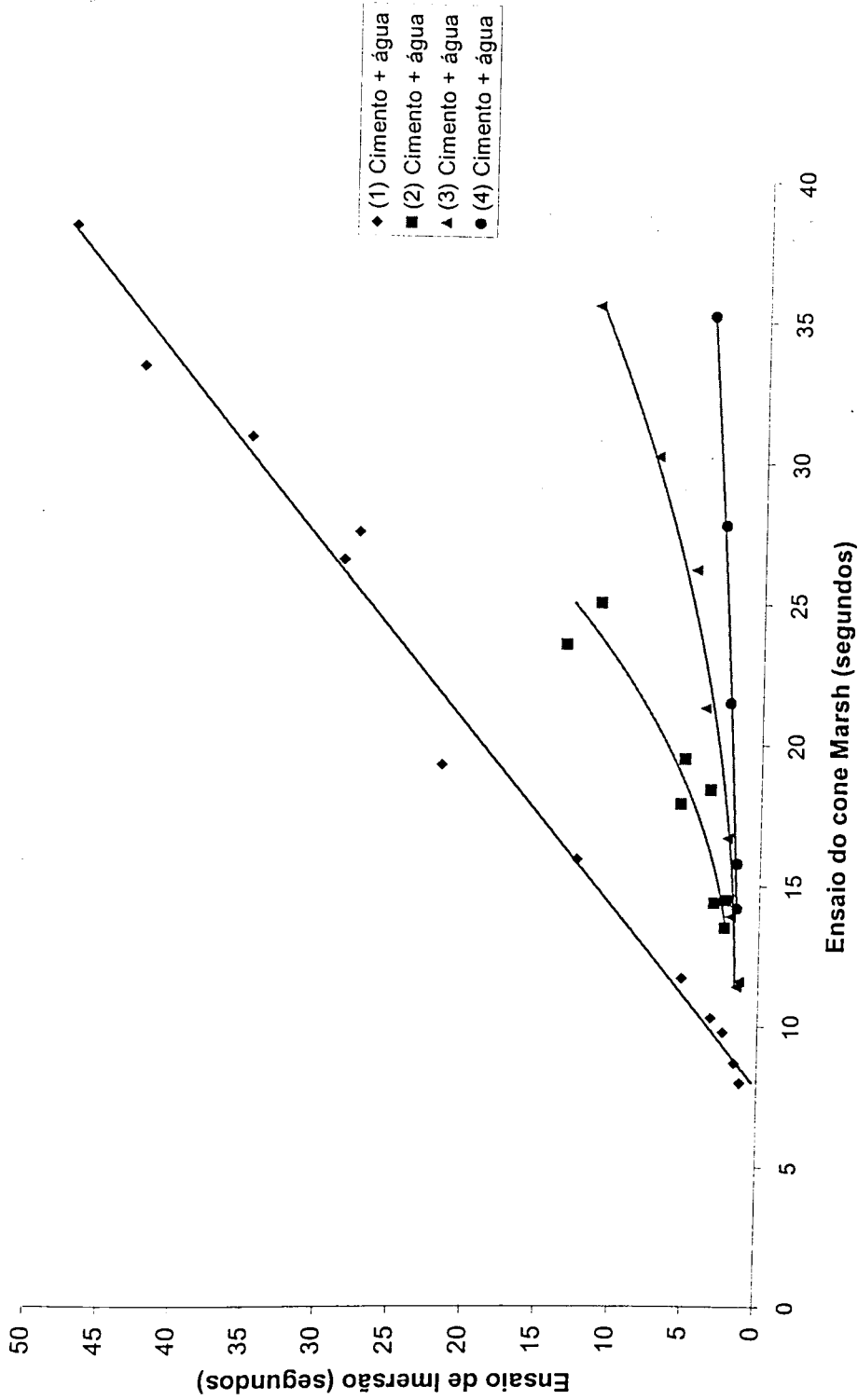


Gráfico 4.1 – Comparação entre dois ensaios de medição da fluidez das caldas de injeção.

Tempos de enchimento da coluna / Fluidiez no cone Marsh

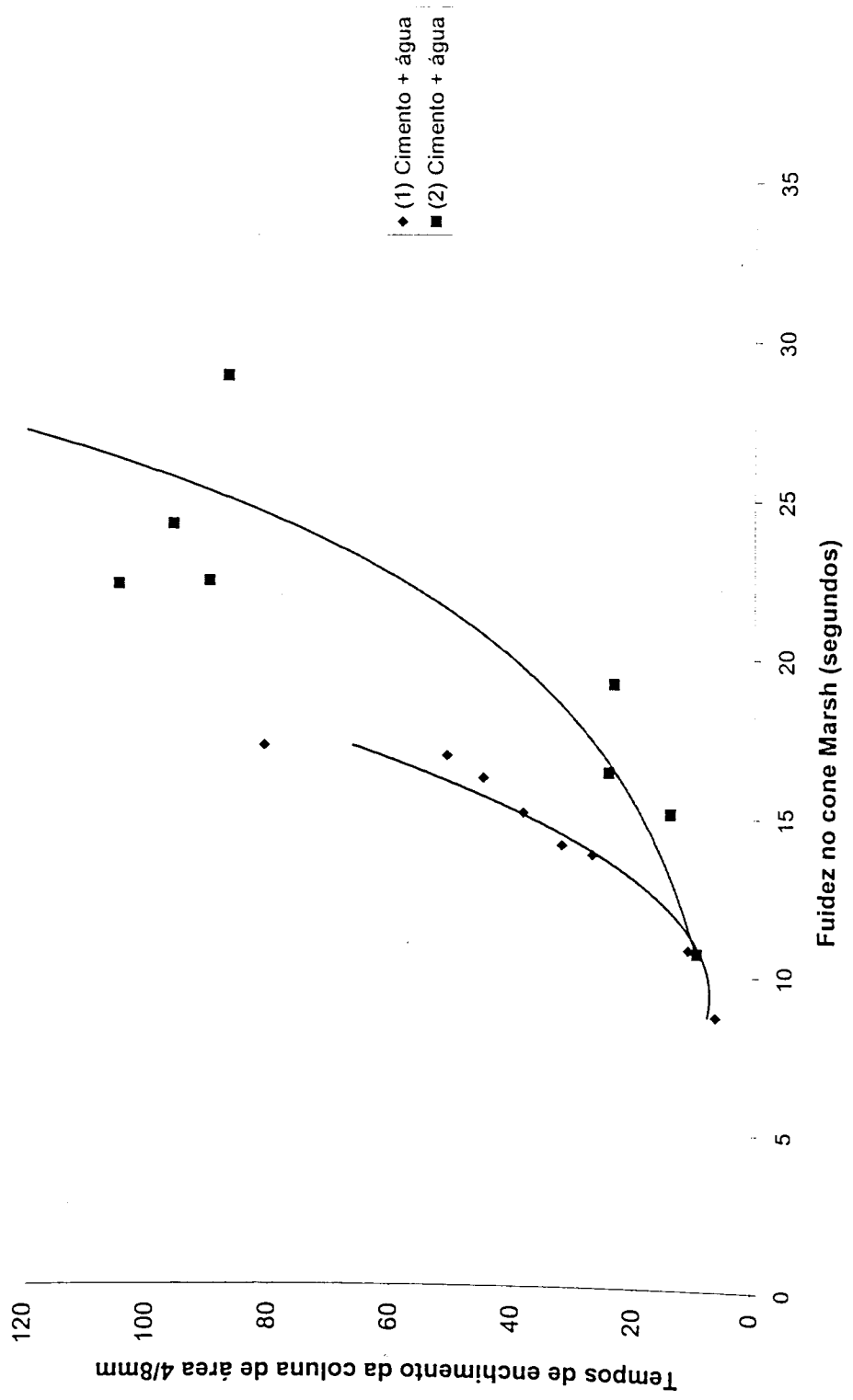


Gráfico 4.2 – Areia seca: tempos de enchimento da coluna /fluidiez no cone Marsh.

Caudal na coluna / Fluidex no cone Marsh

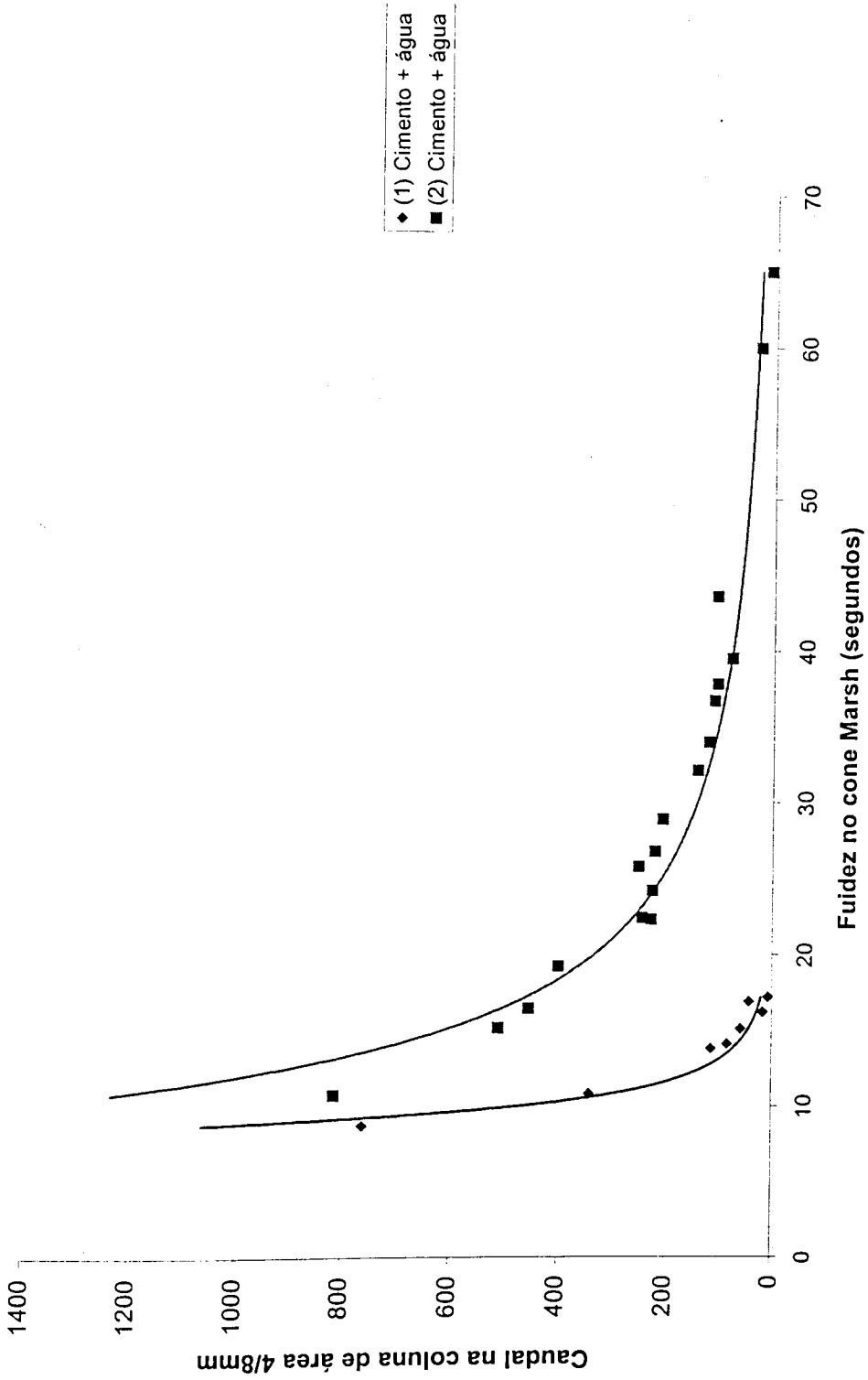


Gráfico 4.3 – Areia seca: Caudal na coluna / fluidez no cone Marsh.

Tempos de enchimento da coluna / Fluidez no ensaio de imersão

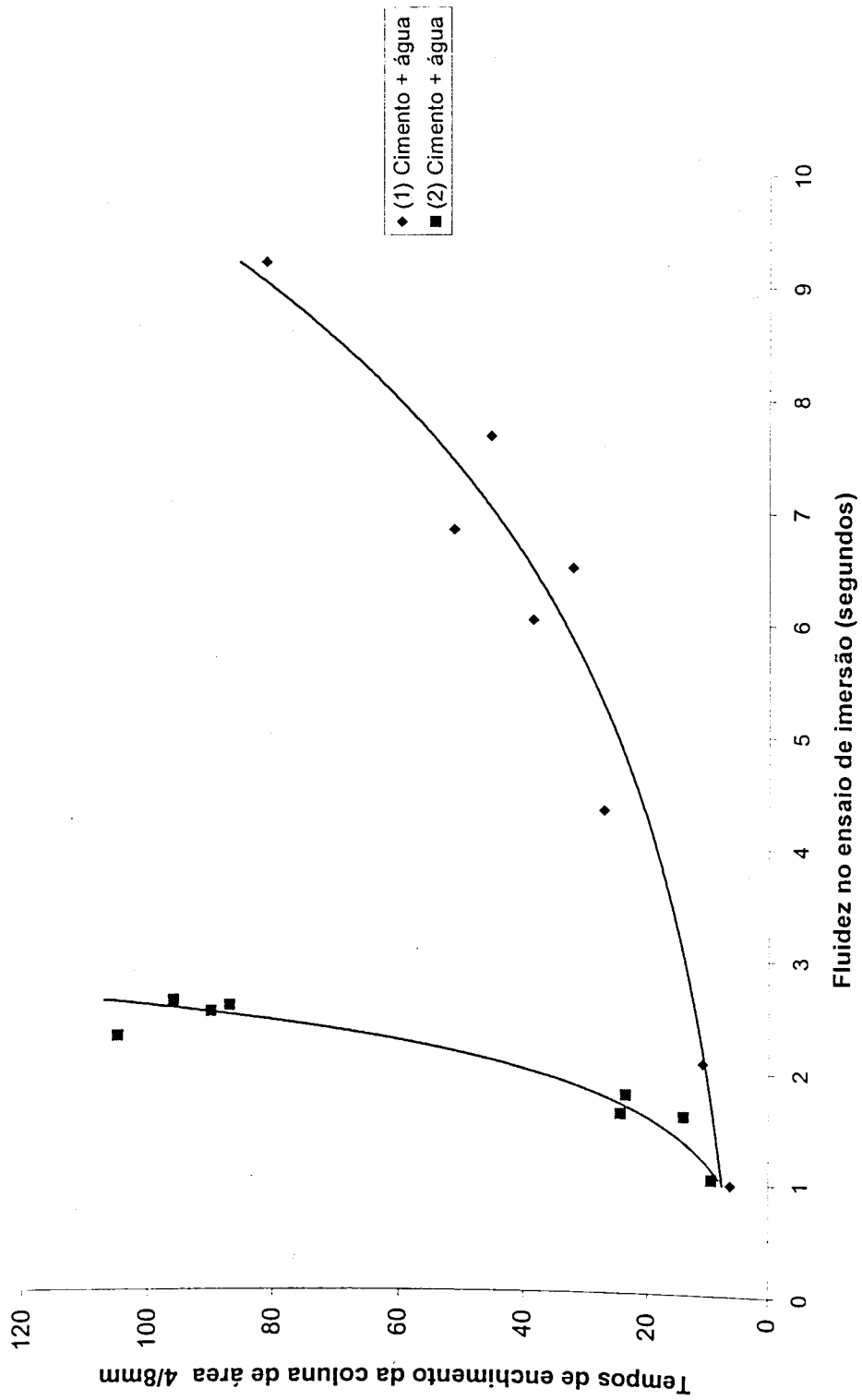


Gráfico 4.4 – Areia seca: tempos de enchimento da coluna / fluidez no ensaio de imersão.

Caudal na coluna / Fluidez no ensaio de imersão

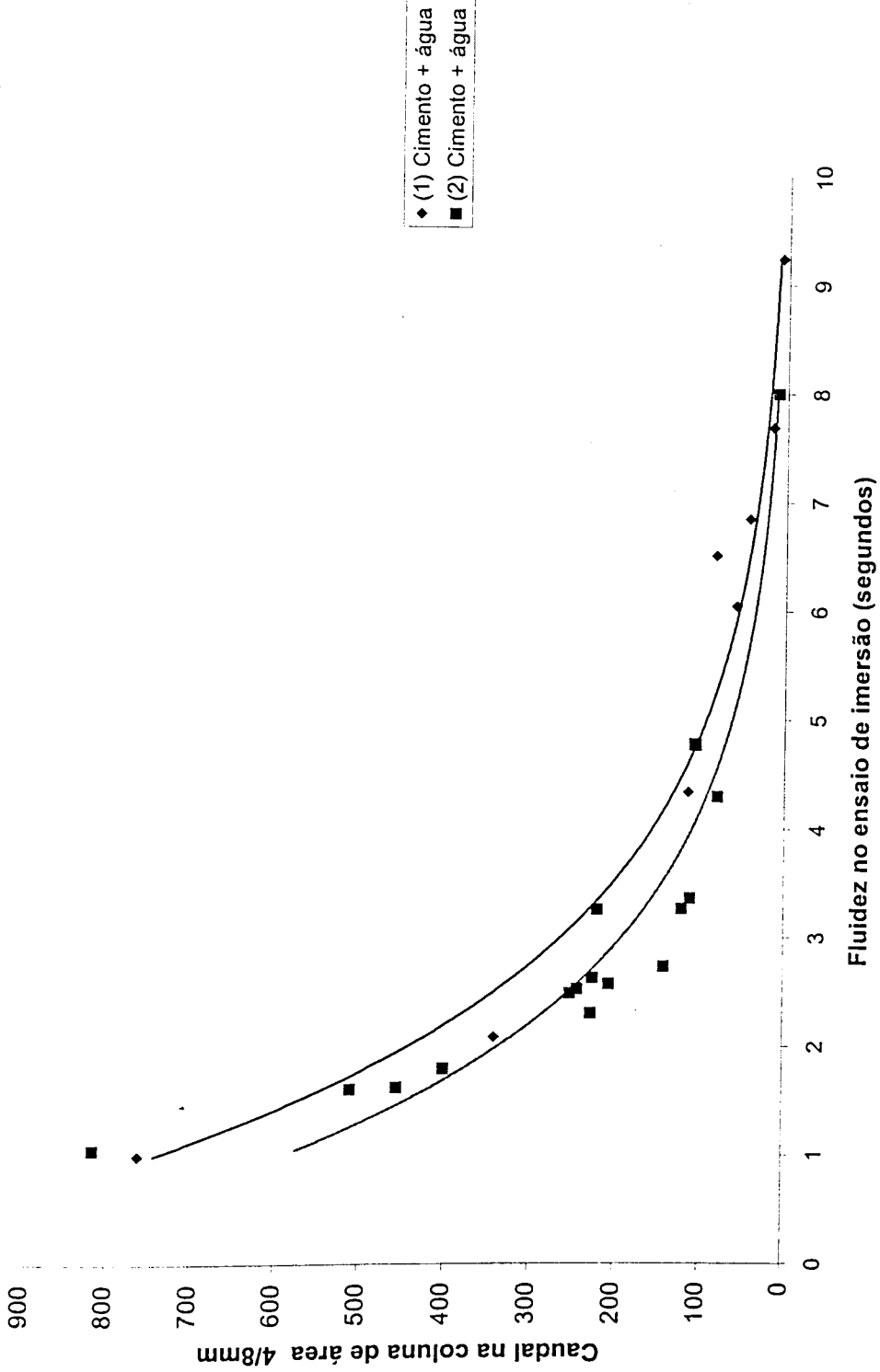


Gráfico 4.5 – Areia seca: caudal na coluna / fluidez no ensaio de imersão.

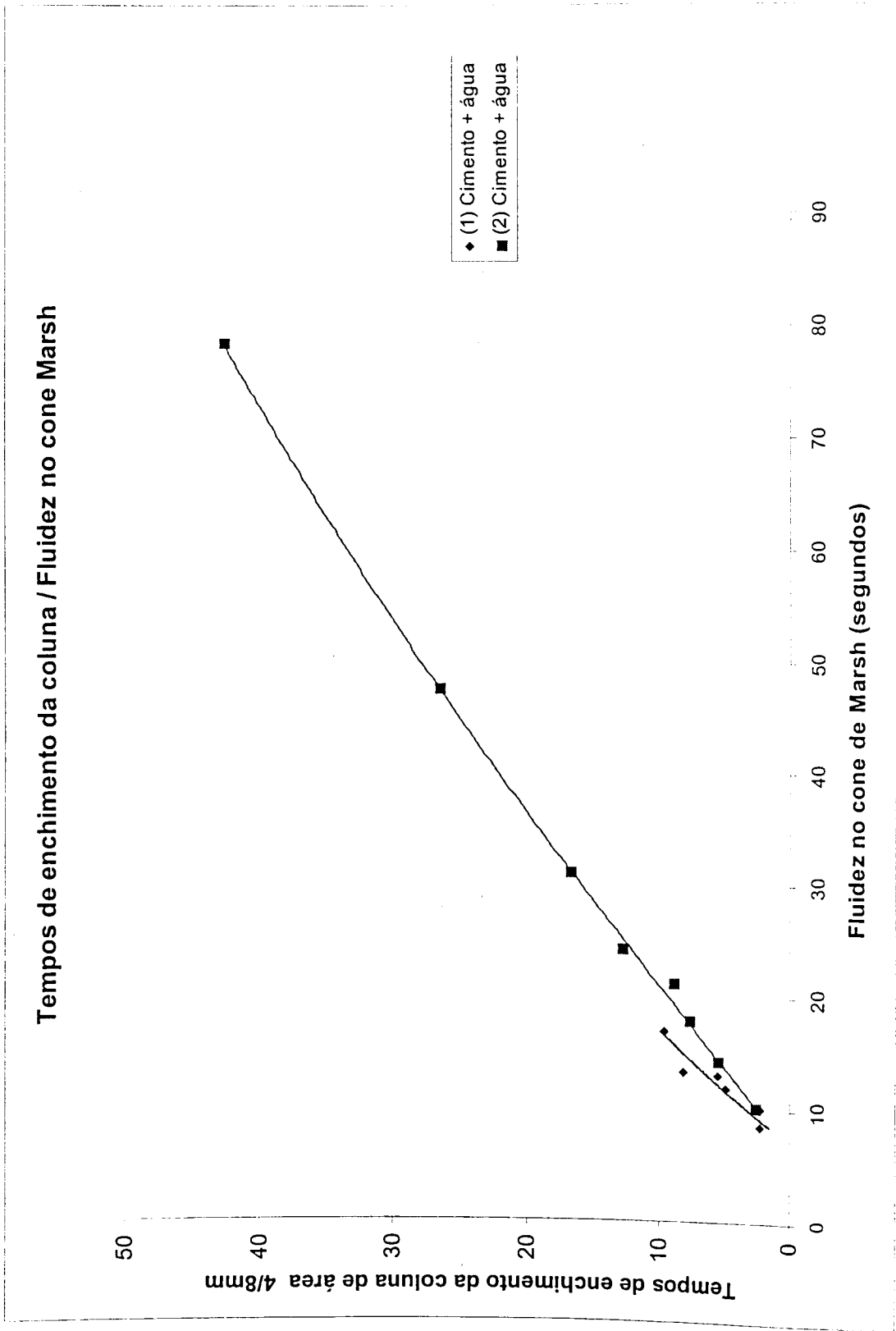


Gráfico 4.6 – Areia húmida: tempos de enchimento da coluna / fluidez no cone Marsh.

Caudal na coluna / Fluidez no cone Marsh

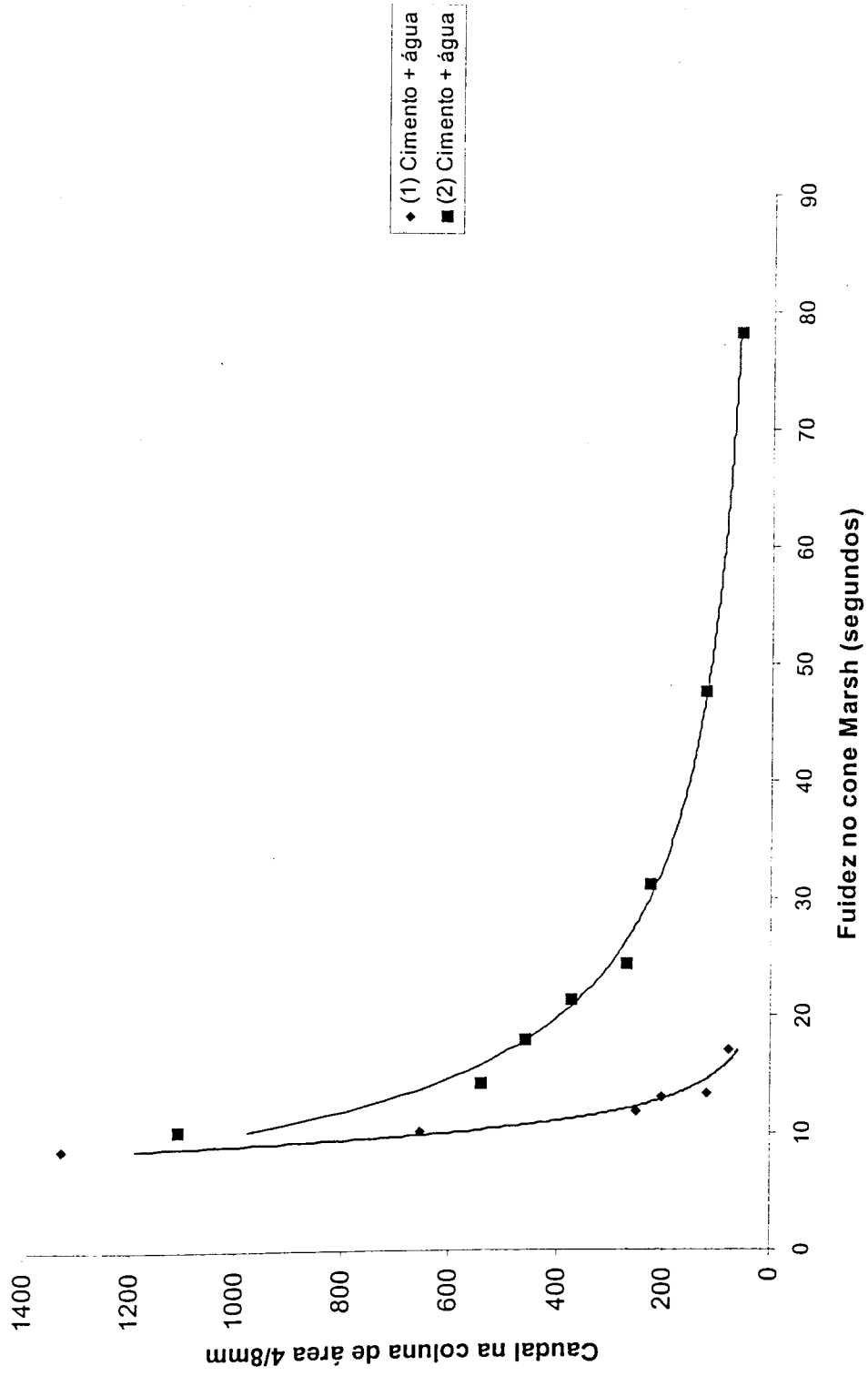


Gráfico 4.7 – Areia húmida: caudal na coluna / fluidez no cone Marsh.

Tempos de enchimento da coluna / Fluidez no ensaio de imersão

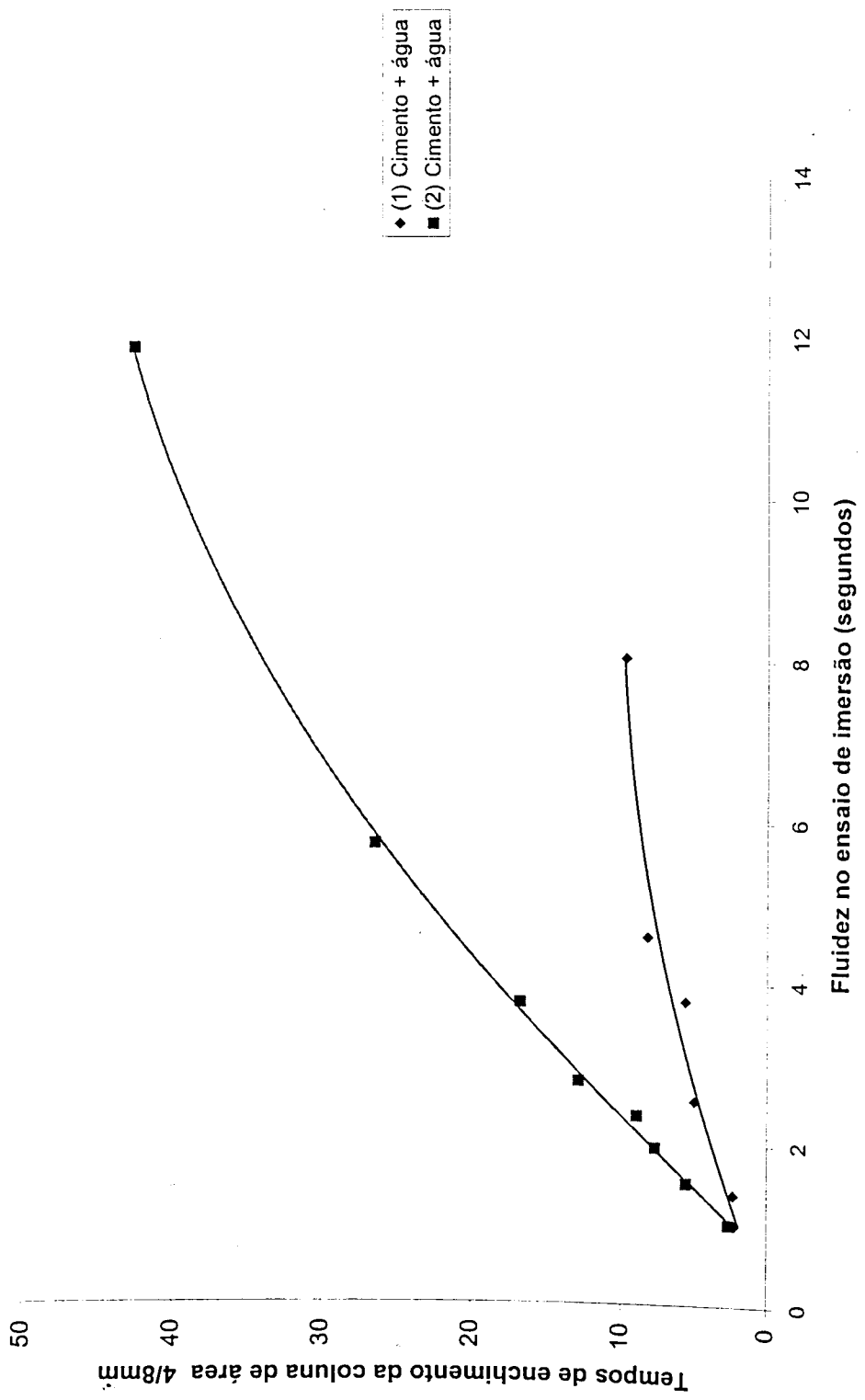


Gráfico 4.8 – Areia húmida: tempos de enchimento da coluna / fluidez no ensaio de imersão.

Caudal na coluna / Fluidez no ensaio de imersão

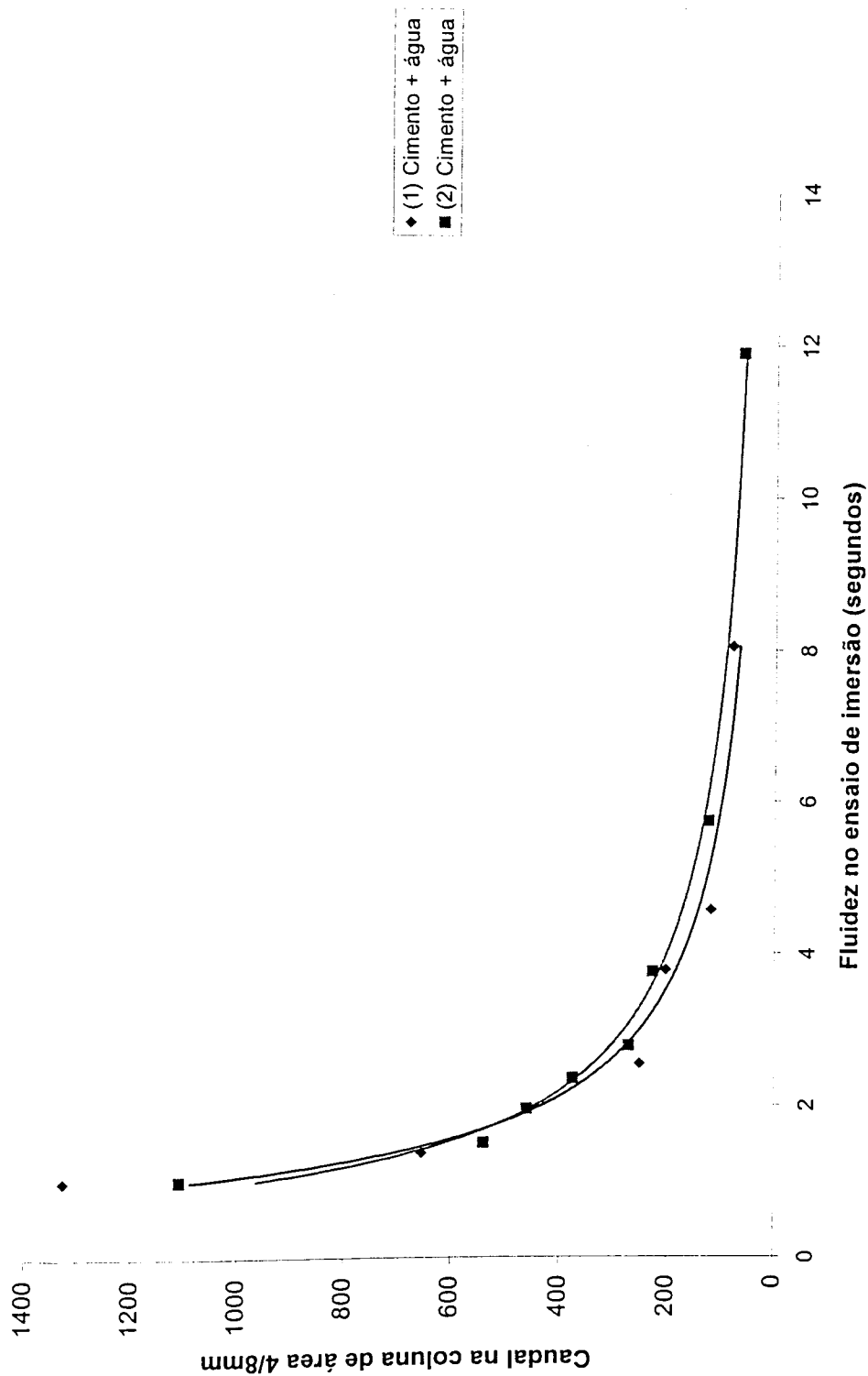


Gráfico 4.9 – Areia seca: caudal na coluna / fluidez no ensaio de imersão.

Capítulo 5

ANÁLISE EXPERIMENTAL - ENSAIOS REALIZADOS NO LEM-FEUP E SUAS CONCLUSÕES

5.1 - INTRODUÇÃO

Na sequência dos ensaios realizados em França (LCPC) cujos resultados se apresentaram no capítulo anterior, o autor do presente trabalho prosseguiu com a realização de ensaios sobre caldas de injeção de bainhas de pré-esforço no Laboratório de Ensaio de Materiais da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LEM-FEUP).

O objectivo dos ensaios a realizar no LEM era a confirmação ou não das conclusões obtidas nos ensaios realizados no LCPC, mas agora com o ensaio de imersão executado de acordo com as normas e não através de um ensaio improvisado, embora comparável, baseado no mesmo princípio, como o foi no LCPC. Para esse efeito foi adquirido equipamento de ensaio alemão (Königsbrunn), da marca “SUSPA-Spannbeton GmbH”, encomendado em conformidade com o projecto da norma europeia pr EN 445, em fase de inquérito (Grout for prestressing tendons - test methods), de 1991-06-21 [51]. Este mesmo equipamento de ensaio ficou consagrado na norma definitiva EN 445, de Março de 1996 (versão portuguesa NP EN 445-1997 e 2000) [36].

De igual modo, para não subsistirem dúvidas quanto a resultados do ensaio do cone para medição da fluidez, e atendendo a que os cones disponíveis no laboratório embora tivessem as dimensões normalizadas apresentavam uma “costura” de soldadura ao longo de todo o seu comprimento (fabrico local), foi adquirido equipamento de ensaio novo, da marca “Perrier”, em conformidade com as normas referidas no parágrafo anterior, que incluiu um cone de ensaio e um peneiro amovível, de encaixe na parte superior do cone, com malha de abertura 1,5 mm.

Os ensaios a realizar no LEM seriam então fundamentalmente a medição da fluidez de diferentes caldas, com diferentes constituintes (com ou sem adjuvantes) e

com diferentes valores da relação A/C, pelos dois métodos considerados na normalização europeia - ensaio do cone e ensaio de imersão - e de seguida a sua injeção na coluna de areia para medição de injectabilidade. Para além destes ensaios far-se-iam também a medição da exsudação e da resistência à compressão das caldas.

Todos estes ensaios, com excepção do ensaio de injectabilidade na coluna de areia, encontram-se normalizados na norma NP-EN 445 [36], não tendo sido alteradas as condições de execução dos ensaios previstos no respectivo projecto de norma pr EN 445, cujo draft data de 1992-04-06 [52], existente à data da execução dos ensaios (1993/1994).

O ensaio de injectabilidade na coluna de areia encontra-se normalizado, como já foi referido anteriormente, na norma francesa NF P 18-891 [43], destinando-se a ser aplicado a todos os produtos de reparação por injeção das estruturas do betão. Para estudo das caldas de injeção das bainhas de pré-esforço, são necessárias algumas alterações às condições de execução deste ensaio, que se abordam seguidamente.

5.2 - CONDIÇÕES DE EXECUÇÃO DO ENSAIO DE INJECTABILIDADE

5.2.1 - Esquema do ensaio

O esquema do ensaio de injectabilidade realizado no LEM encontra-se representado na Figura 5.1.

Este esquema de ensaio foi baseado no esquema de ensaio da norma NF P18-891, com algumas alterações de pormenor. Passa-se a descrever o equipamento de ensaio, de montante para jusante do escoamento:

- Fonte de ar comprimido (garrafa de 45 kg)
- Válvula reguladora de pressão (antes da montagem desta válvula não era possível regular a pressão com precisão e mantê-la constante durante a injeção).
- Tubo flexível transparente que liga a válvula reguladora ao recipiente metálico, com encaixe terminal por pressão na tampa do recipiente metálico/reservatório de injeção.
- Recipiente metálico/reservatório de injeção, com diâmetro interior de 10,6 cm e altura interior de 19,6 cm, munido de tampa circular com dispositivo de fecho

constituído por três parafusos laterais de ajuste com porcas de orelhas. Para garantia de estanqueidade do recipiente, a tampa tem um entalhe circular inferior com um “Oring” de borracha, onde encaixa o corpo do recipiente metálico.

- Manómetro de controlo colocado na tampa do recipiente metálico.

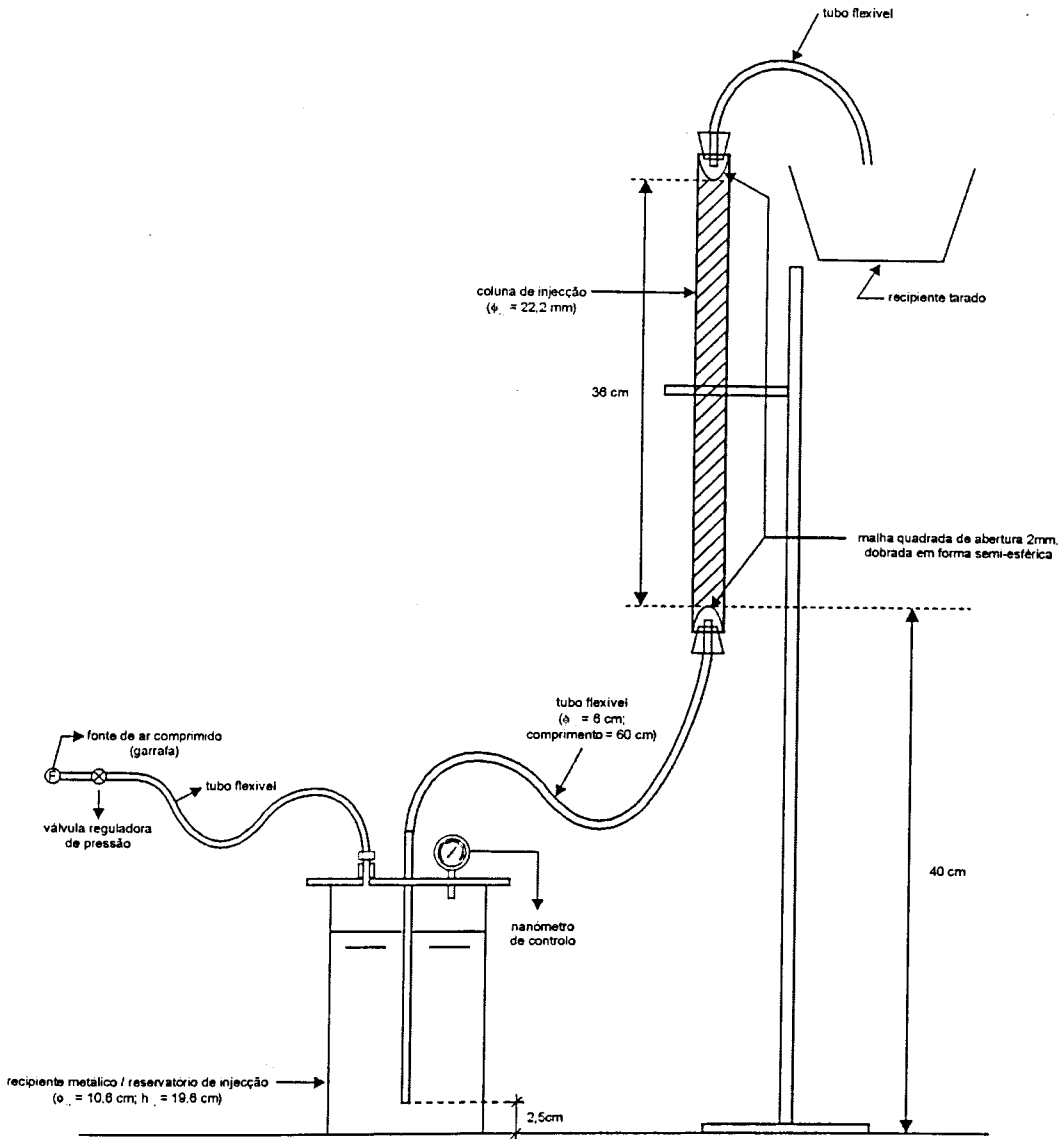


Figura 5.1 - Esquema do ensaio de injectabilidade.

- Tubo metálico, centrado com a tampa do recipiente metálico e solidarizado com esta. Com a tampa colocada no recipiente, este tubo metálico mergulha na calda aí colocada, ficando a sua extremidade a cerca de 2,5 cm do fundo do recipiente.

- Tubo flexível transparente, com diâmetro interior de 6 mm e comprimento de 60 cm, que conduz a calda do recipiente metálico até à coluna de injeção.

- Coluna de injeção, constituída por um tubo transparente em perspex, com diâmetro interior 22,2 mm e comprimento de cerca de 40 cm. Este tubo é fechado nas suas extremidades por rolhas de borracha que foram perfuradas, tendo sido aí colocados (no seu interior) tubos de cobre com diâmetro interno de 6 mm. No interior da coluna de injeção é colocada areia calibrada ou esferas de aço calibradas, numa extensão de 36 cm, materializando o meio poroso através do qual se pretende medir a maior ou menor facilidade de escoamento da calda. Entre as rolhas de borracha das extremidades e a areia ou esferas calibradas colocadas no interior da coluna, são interpostas malhas quadradas de abertura 2 mm, dobradas em forma aproximadamente semi-esférica, de modo a impedir o entupimento do escoamento por obturação das extremidades interiores dos tubos de cobre inseridos nas rolhas de borracha.

- Tubo flexível transparente para condução da calda do topo da coluna de injeção ao recipiente que a recolhe.

- Recipiente para recolha da calda que se escoa da coluna de injeção. Este recipiente é previamente tarado para se poder quantificar a quantidade de calda que se escoa durante um minuto (caudal de escoamento da calda, em gramas/minuto).

5.2.2 - Amassadura da calda

A amassadura da calda foi efectuada dentro de um balde plástico graduado interiormente até 10 litros de capacidade. Como agitador de hélice utilizou-se uma vareta de agitação acoplada a um berbequim "Black & Decker", ref^a P16-12 com duas velocidades de rotação: a mais baixa, de 560 rot/min, e a mais elevada de 1400 rot/minuto (velocidades em vazio).

As condições de amassadura foram as seguintes:

- Colocação de água dentro do balde;
- Colocação do adjuvante (eventual) na água; agitação durante 30 segundos com a velocidade lenta;
- Sem interrupção da agitação, adição do cimento, passagem para a velocidade de rotação rápida, que se mantém durante 3 minutos.

5.2.3 - Areia calibrada

À semelhança da “areia calibrada” seleccionada no Capítulo anterior, com dimensões de 4 a 8 mm, foi agora utilizada, numa primeira fase, uma outra “areia calibrada”, facultada pela Unibetão, com a curva granulométrica constante da Figura 5.2. Trata-se de um godo miúdo, com a maioria das partículas (84,3%) compreendidas entre as dimensões dos peneiros nº 4 e 3/8” (4,75 – 9,5 mm).

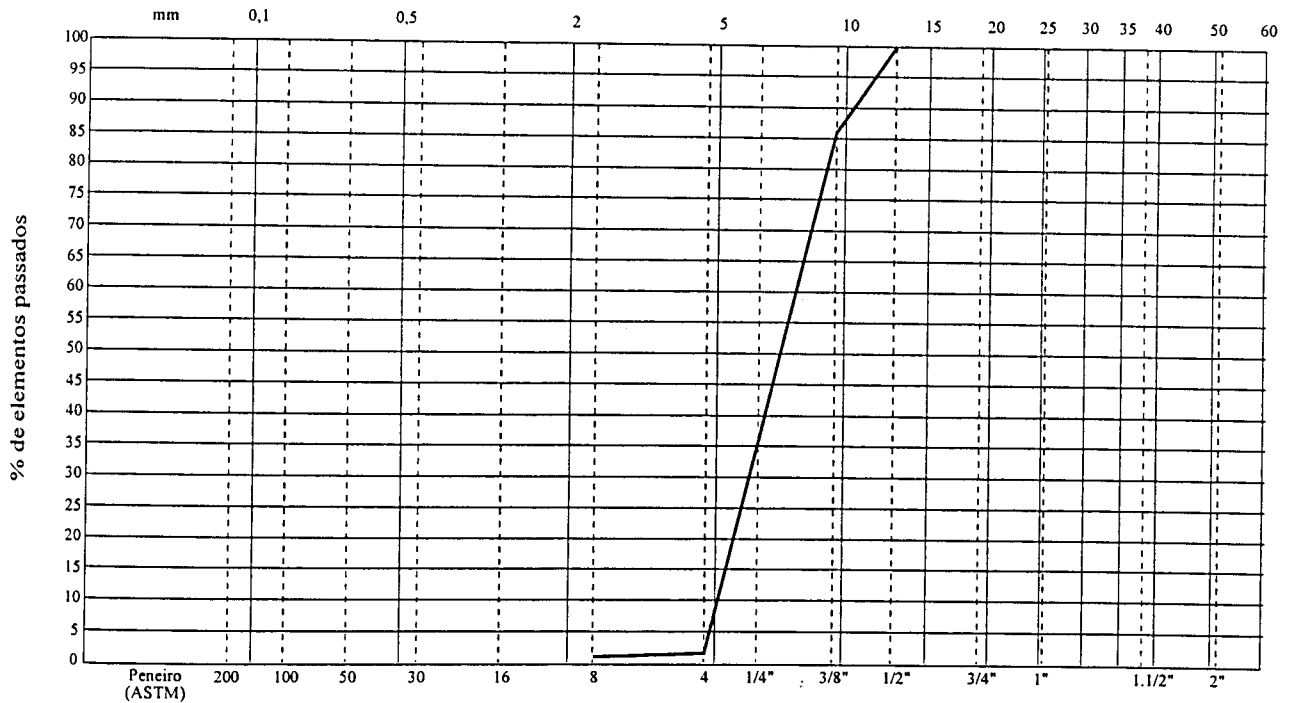


Figura 5.2 - Curva granulométrica da “areia calibrada” utilizada.

Também à semelhança do Capítulo 4, e de acordo com os estudos aí efectuados, optou-se pela injeção em meios exclusivamente húmidos, atendendo à maior dispersão dos resultados que se obteria em meio seco. Por conseguinte, a areia foi sempre previamente humedecida antes de efectuar cada injeção.

Numa segunda fase, após se terem verificado perturbações no escoamento da calda através da “areia calibrada” devido à heterogeneidade desta no que respeita à forma dos seus grãos e à respectiva porosidade, procedeu-se à substituição da “areia calibrada” por esferas de aço calibradas (esferas de rolamentos), com diâmetros de 5,6 mm e de 4 mm.

5.2.4 - Enchimento da coluna de areia

Cada coluna de areia é cheia em 3 camadas de alturas aproximadamente iguais, de modo a obter uma altura total de areia compactada de $36 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ cm}$. O processo de enchimento é o seguinte:

- Verte-se a areia humedecida na coluna de modo a encher o primeiro terço da sua altura;

- Compacta-se a areia, aplicando 50 choques laterais (com o auxílio de um varão de aço de $\phi = 12 \text{ mm}$) repartidos na altura da camada e rodando a coluna em torno do seu eixo longitudinal;

- Procede-se do mesmo modo para a 2ª e 3ª camadas; após o assentamento da última camada verifica-se que a altura total da areia compactada é igual a $36 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ cm}$.

- Se este valor não for verificado é necessário esvaziar a coluna e voltar a encher pelo mesmo processo.

5.2.5 – Pressão de injeção

Tendo em conta que os estudos do capítulo anterior conduziram à adopção de uma areia calibrada 4/8 mm conjugada com uma pressão de injeção de $0,75 \text{ kgf/cm}^2$, e atendendo a que a areia agora utilizada tem uma granulometria ligeiramente superior, adopta-se uma pressão ligeiramente inferior: $0,6 \text{ kgf/cm}^2$ (valor imediatamente inferior a $0,75 \text{ kg/cm}^2$, de mais fácil leitura no manómetro).

5.2.6 - Procedimento do ensaio

Após a realização da amassadura da calda e a realização dos ensaios de medição da fluidez, a calda é vertida no recipiente metálico de modo a enchê-lo quase até ao topo, ficando apenas uma folga de 1 a 2 cm de altura por encher.

Em seguida coloca-se a tampa e procede-se ao seu fecho.

Com a comunicação entre o recipiente metálico e a coluna de injeção fechada (tubo flexível de ligação dobrado), abre-se a válvula reguladora de pressão de ar, e ajusta-se a posição de abertura até a pressão indicada no manómetro estabilizar em $0,6 \text{ kgf/cm}^2$.

Após isto acontecer, dá-se início à injeção, abrindo a ligação do recipiente metálico para a coluna de injeção, desdobrando o respectivo tubo flexível de ligação. Verifica-se que a calda se escoar ao longo deste tubo flexível e destrava-se o cronómetro quando a calda atinge a areia calibrada, travando-se este no final do percurso da calda através da areia calibrada (36 cm de extensão).

Imediatamente a seguir começa a sair calda do tubo flexível final, caindo no recipiente da recolha da calda. No instante em que começa a sair calda do tubo flexível final destrava-se um segundo cronómetro, retirando-se o recipiente de recolha da calda após se perfazer um minuto, determinando-se finalmente a massa do recipiente com a calda recolhida (recipiente previamente tarado).

Como resultados deste ensaio de injectabilidade obtém-se o tempo de enchimento da coluna de areia, em segundos, e o caudal de escoamento da calda expresso em gramas de calda escoada/minuto.

5.2.7 - Diferenças relativamente ao ensaio normalizado (NF P 18-891)

As diferenças do ensaio de injectabilidade realizado relativamente ao normalizado, que se apresentam de seguida, não são significativas e devem-se, como já referido, à necessidade de adaptar às caldas de injeção das bainhas de pré-esforço este ensaio previsto para produtos de reparação por injeção das estruturas de betão.

- a) Areia calibrada com granulometria diferente: em vez da fracção 0,63/1,25 mm da areia normal (NP EN 196-1), usa-se o godo miúdo referido em 5.2.3., com dimensões predominantes 4,75/9,50 mm.
- b) Pressão de injeção diferente: foi usada a pressão de 0,6 kgf/cm², em vez de 0,75 kgf/cm².
- c) Malhas diferentes colocadas nas extremidades da areia calibrada: em vez de discos de malha com abertura 0,5 mm, foram usadas malhas de abertura 2 mm, dobradas em forma aproximadamente semi-esférica pela razão já apontada em 5.2.1.
- d) Usou-se um recipiente metálico que era simultaneamente o reservatório de injeção, em vez de colocar o recipiente metálico dentro do reservatório de injeção.

- e) Mediu-se apenas o tempo de enchimento da coluna de areia e não tempos referentes a enchimentos parciais.

5.3 - TIPOS DE ENSAIOS REALIZADOS E SUA SEQUÊNCIA

Em geral, para cada amassadura realizada procedeu-se do seguinte modo:

- Execução da amassadura da calda, nas condições indicadas em 5.2.2;
- Realização do ensaio do cone para medição da fluidez da calda;
- Realização do ensaio de imersão, também para medição da fluidez da calda;
- Execução do ensaio de injectabilidade na coluna de areia;
- Enchimento de uma proveta de 100 ml com calda até \cong 95 ml para medição da exsudação ao fim de 3 horas:
- Enchimento de cubos de aresta 10 cm para determinação da resistência à compressão (tensão de rotura por compressão) aos 7 e aos 28 dias de idade.

As duas últimas acções (ensaios de determinação da exsudação e da resistência à compressão) apenas foram realizadas após a afinação das condições de execução do ensaio de injectabilidade.

5.4 - ENSAIOS INICIAIS

Inicialmente procedeu-se à realização de algumas amassaduras experimentais de caldas, constituídas apenas por cimento e água, tendo em vista fundamentalmente testar as condições de execução do ensaio de injectabilidade.

Como materiais utilizados na confecção das caldas usou-se água da rede pública de abastecimento e cimento facultado pela Secil, do tipo I, classe de resistência 32,5, proveniente de uma mesma moagem.

Este cimento foi armazenado em bidões de plástico com fecho estanque, de capacidade de cerca de 200 litros.

Para realização do ensaio de injectabilidade na coluna de areia, foi utilizado como enchimento da coluna o godo miúdo com curva granulométrica indicada na Figura 5.2.

Numa primeira fase foram realizados alguns testes, de que se dispensa a apresentação de resultados, que permitiram afinar alguns pormenores de ensaio, destacando-se os que obviaram a dois inconvenientes verificados:

- Dificuldade de controlar a pressão de injeção e de mantê-la constante durante toda a injeção. Esta dificuldade foi ultrapassada com a colocação de uma válvula reguladora de pressão à saída da botija de gás, nunca mais se registando qualquer problema com esta questão.

- Entupimentos ocasionais na injeção da coluna de areia: constatou-se rapidamente que estes entupimentos se verificavam quando não se tinha o cuidado de fechar a tampa do bidão de cimento, o que provocava o seu envelhecimento e consequente formação de grumos na calda com ele fabricada.

Após esta primeira fase realizaram-se alguns ensaios cujos resultados se resumem no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 - Resultados dos ensaios iniciais de injectabilidade;

Composição da calda: cimento + água

Relação A/C	Fluidez		Injectabilidade		
	Ensaio do cone	Ensaio de imersão	Pressão de injeção	Tempo de enchimento da coluna	Caudal
	(seg.)	(seg.)	(kgf/cm ²)	(seg.)	(gr./min.)
0,44	12,1(*)	-	0,70	4,5	518
0,42	16,6(*)	31,3	0,75	3,1	871
			0,40	7,6	209
0,42	12,7	-	0,60	9,3	357
0,38	25,9	-	0,60	32,7	58
0,46	9,2	-	0,60	2,9	833

(*) Cone provisório (com costura de soldadura).

De acordo com o indicado no Capítulo 4 (4.2.4.1), os estudos aí efectuados para caldas de injeção de bainhas de pré-esforço com uma fluidez de acordo com as recomendações para as caldas correntes conduziram à adopção de uma areia com dimensões 4/8 mm para uma pressão de injeção de 0,75 kgf/cm² no ensaio de injectabilidade na coluna de areia. Atendendo a que a areia agora utilizada tem uma granulometria ligeiramente superior, dada pelas dimensões predominantes 4,75/9,50 mm, logicamente dever-se-ia utilizar uma pressão ligeiramente inferior. Uma vez que o manómetro utilizado tinha a sua escala principal de leitura graduada com intervalos de

0,20 kgf/cm², optou-se pela pressão de 0,60 kgf/cm² para pressão de injeção, valor imediatamente abaixo de 0,75 kgf/cm², com melhor precisão na leitura.

A razão precedente foi determinante na escolha da pressão de injeção; no entanto, como se pode observar no Quadro 5.1, na fase inicial ainda se fez variar a pressão de injeção. Com esses poucos valores disponíveis elaborou-se o gráfico 5.1 que nos dá as curvas de variação dos resultados do ensaio de injectabilidade (tempo de enchimento da coluna e caudal de escoamento) com a pressão de injeção para a composição de calda com A/C = 0,42.

Poder-se-ia ter desenvolvido mais este estudo, mas tal não foi considerado atendendo à razão determinante na escolha da pressão de 0,60 kgf/cm² referida no parágrafo anterior e ao desinteresse que se veio a verificar na utilização desta “areia calibrada”.

Com base nos valores do Quadro 51, para além do Gráfico 5.1, foi também elaborado o Gráfico 5.2, no qual se apresenta a variação dos resultados do ensaio de injectabilidade e do ensaio de fluidez (cone) com a relação A/C da calda, para a pressão de injeção de 0,60 kgf/cm².

Apesar da coerência de resultados que se verifica neste gráfico 5.2, o mesmo já não se pode dizer do gráfico 5.1, no que respeita aos tempos de enchimento da coluna de areia, no qual para o valor intermédio da pressão não se obtém valor intermédio do tempo de enchimento.

Porém, foi a observação visual da injeção da calda ao longo da coluna de areia que criou mais desconfiança no que respeita ao prosseguimento dos ensaios. De facto, verificava-se que o escoamento de calda através de “areia calibrada” não era uniforme, sendo por vezes bastante irregular, o que levou a supor que a porosidade ao longo da coluna não era uniforme, embora a porosidade média pudesse ser adequada. Quando comparadas as condições de realização deste ensaio com as condições do ensaio de injectabilidade normalizado na NF P 18-891, há diferenças que se nos afiguram como causas destas anomalias verificadas no processamento do escoamento da calda através da areia:

- A utilização de uma areia com granulometria predominante 4,75/9,50 mm em vez de 0,63/1,25 mm obrigaria à utilização de uma coluna de areia com maiores dimensões para ter igual garantia de homogeneidade global, o que não aconteceu:

utilizou-se a mesma coluna, que nos 36 cm de extensão cheia com areia corresponde a um volume de apenas 139,3 cm³.

- Por outro lado, a “areia calibrada” utilizada no LEM era um godo miúdo com origem fluvial, cujas partículas têm formas que se afastam da esférica. A areia do ensaio normalizado é uma fracção (0,63/1,25 mm) extraída da areia normal prevista para os ensaios de determinação das resistências mecânicas dos cimentos em prismas de argamassa normal - NP EN 196-1 [44].

Esta areia normal, agora designada por areia normalizada CEN, EN 196-1, é uma areia que na especificação do LNEC nº 29 – Cimentos, determinação da resistência mecânica [53], era descrita como uma areia natural, siliciosa, de grãos arredondados e com uma composição granulométrica especificada. Trata-se, portanto, de uma areia de grãos arredondados, e consequentemente uma areia que confere maior homogeneidade na sua porosidade do que o godo miúdo com partículas afastadas da forma esférica e algumas delas mesmo achatadas ou alongadas. Para resolução desta questão, optou-se por continuar a usar a mesma coluna e abandonar a utilização deste godo miúdo como “areia calibrada” no ensaio de injectabilidade das caldas de injeção correntes das bainhas de pré-esforço.

Para garantia de um meio com porosidade constante ao longo da coluna, pensou-se na utilização de material de forma esférica, com diâmetro único. Optou-se por esferas de aço por se tratar do tipo de material existente dentro das bainhas de pré-esforço. Escolheram-se esferas de aço com diâmetros de 5,6 mm e 4,0 mm, utilizadas em rolamentos (S.K.F.).

5.5 - ENSAIOS INTERMÉDIOS

Constituem os ensaios designados por intermédios o conjunto de ensaios iniciais realizados sobre caldas, nos quais se incluía a determinação da injectabilidade na “coluna de areia” nas condições indicadas no final do subtítulo anterior (5.4), isto é, substituindo a areia por esferas de aço no enchimento da coluna.

Testou-se a realização do ensaio de injectabilidade com esferas de diâmetro 5,6 mm e posteriormente com esferas de 4 mm.

Inicialmente, ao testar a utilização de esferas de diâmetro 5,6 mm, fez-se o ensaio de injeção da coluna em meio seco, mas posteriormente todos os restantes ensaios foram realizados em meio húmido.

As caldas foram confeccionadas com o cimento (I-32,5) e água (abastecimento público) anteriormente referidos, e o ensaio de injectabilidade foi realizado sempre com a pressão de injeção de 0,6 kgf/cm².

5.5.1 - Ensaio de injeção em meio seco/esferas de aço com $\phi = 5,6$ mm

Estes ensaios foram realizados com a coluna de injeção cheia com esferas de aço com $\phi = 5,6$ mm, compactadas nas condições indicadas em 5.2.4, sendo necessários 630 gramas de esferas para encher os 36 cm de extensão da coluna que estão prescritos na norma NF P 18-891.

Os resultados dos ensaios efectuados encontram-se resumidos no Quadro 5.2.

Quadro 5.2 - Ensaio intermédios realizados com coluna seca e esferas de $\phi = 5,6$ mm

Relação A/C	Fluidez		Ensaio de injectabilidade	
	Ensaio do cone	Ensaio de imersão	Tempo de enchimento da coluna	Caudal
-	(seg.)	(seg.)	(seg.)	(gr./min.)
0.40	18,57	40,66	13,06	210
0.44	10,49	23,36	3,56	746
0.37	39,42	63,12	21,06	64
0.38	25,12	54,86	12,25	134
0.39	23,68	48,27	9,52	171

Tratam-se apenas de ensaios de medição da fluidez e da injectabilidade, sendo a fluidez medida pelos dois métodos considerados - ensaio do cone e ensaio de imersão.

Apenas se utilizou um tipo de composição: mistura somente de cimento e água em diversas proporções.

A partir dos valores constantes deste quadro foram elaborados os Gráficos 5.3 e 5.4 nos quais se relacionam os valores da razão A/C com os resultados dos ensaios de fluidez e de injectabilidade, respectivamente.

A análise destes gráficos evidencia alguma incoerência de resultados no que respeita ao tempo de enchimento da coluna no ensaio de injectabilidade (Gráfico 5.4).

Como já no Capítulo 4 (4.2.4.4) se havia constatado uma maior dispersão de resultados obtidos com a areia seca do que os obtidos com a areia húmida, optou-se por realizar as injeções com as esferas húmidas. Assim, doravante todas as injeções serão realizadas com as esferas húmidas, e para isso as esferas são molhadas e enxugadas imediatamente antes de se iniciarem os ensaios. Na sequência da realização de ensaios sucessivos, procede-se à lavagem das esferas num peneiro e ao seu enxugamento prévio antes de prosseguir com os ensaios.

5.5.2 - Ensaios de injeção em meio húmido/esferas de aço com $\phi = 5,6$ mm

Estes ensaios incidiram sobre quatro tipos de composições de caldas, e dentro de cada tipo de composição para vários valores da razão A/C.

Os tipos de composição estudados foram os seguintes:

- a) Cimento + água.
- b) Cimento + água + 0,6 % adjuvante SK 163.
- c) Cimento + água + 1,5 % adjuvante SK 163.
- d) Cimento + água + 2,5 % adjuvante SK 163.

Por conseguinte, para além dos componentes cimento e água já indicados anteriormente, junta-se agora um adjuvante, da marca “SIKA”, com a designação de SIKAMENT 163, utilizando-se a abreviatura SK 163.

De acordo com a ficha técnica 1.14 da publicação da SIKA intitulada “Prontuário/Catálogo de fichas técnicas - 2000/01, Edição nº 4” [54], trata-se de um redutor de água de alta gama/superplastificante, à base de polímeros orgânicos, destinado a melhorar as resistências iniciais e finais do betão através da forte redução do factor A/C, com dosagens recomendadas de 0,5 a 2,0 litros por cada 100 kg de cimento. É recomendada a sua adição à água de amassadura antes da sua adição à mistura seca dos inertes e cimento.

Também é recomendado para caldas de injeção, permitindo reduzir fortemente a água de amassadura e aumentar a fluidez, diminuindo as tendências para exsudação e retracção e aumentando as resistências mecânicas.

No que respeita à dosagem para as caldas de injeção é recomendado, em geral, a partir da dosagem de 1% do peso do cimento (cerca de 0,8 litros/100 kg de cimento, visto ter massa volúmica de $1,20 \pm 0,02 \text{ kg/dm}^3$).

As dosagens de 0,6%, 1,5% e 2,5% utilizadas, anteriormente indicadas, são dosagens em massa, relativamente à massa de cimento.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados encontram-se indicados nos Quadros 5.3 a 5.6.

Para cada tipo de composição foram realizadas várias amassaduras com diferentes valores da relação A/C, tendo-se determinado para cada amassadura a fluidez (ensaio do cone e ensaio de imersão) e a injectabilidade (tempo de enchimento da coluna e caudal da calda escoada).

Quadro 5.3 - Ensaio intermédios realizados com coluna húmida e esferas $\phi = 5,6 \text{ mm}$;
Composição tipo da calda: cimento + água

Relação A/C	Fluidez		Ensaio de injectabilidade	
	Ensaio do cone (seg.)	Ensaio de imersão (seg.)	Tempo de enchimento da coluna (seg.)	Caudal (gr./min.)
-	47,14	64,63	30,24	65
0.37	35,71	62,79	28,81	62
0.375	32,59	58,95	27,94	87
0.38	28,74	54,14	19,10	107
0.385	25,49	48,97	21,91	127
0.39	22,20	46,80	19,29	143
0.395	16,34	41,24	12,91	213
0.40	14,26	37,36	11,31	260
0.41	11,65	30,86	6,84	476
0.42	9,90	21,27	4,52	776
0.44	8,82	15,99	3,58	1197

Quadro 5.4 - Ensaio intermédios realizados com coluna húmida e esferas $\phi = 5,6$ mm;
Composição tipo da calda: cimento + água + 0,6% SK 163

Relação A/C	Fluidez		Ensaio de injectabilidade	
	Ensaio do cone	Ensaio de imersão	Tempo de enchimento da coluna	Caudal
-	(seg.)	(seg.)	(seg.)	(gr./min.)
0.32	27,92	53,41	32,11	85
0.325	26,59	41,43	22,47	150
0.33	25,30	37,99	22,99	178
0.34	20,11	31,57	14,34	270
0.36	15,48	23,47	9,54	479
0.38	11,67	17,63	6,34	711
0.40	9,66	12,97	3,84	1129

Quadro 5.5 - Ensaio intermédios realizados com coluna húmida e esferas $\phi = 5,6$ mm;
Composição tipo da calda: cimento + água + 1,5 % SK 163

Relação A/C	Fluidez		Ensaio de injectabilidade	
	Ensaio do cone	Ensaio de imersão	Tempo de enchimento da coluna	Caudal
-	(seg.)	(seg.)	(seg.)	(gr./min.)
0.28	56,83	57,41	-(*)	-
0.29	44,66	48,49	30,44	148
0.30	38,36	41,57	22,72	199
0.32	23,76	30,32	12,77	367
0.34	15,59	22,08	7,31	615
0.36	13,40	18,84	5,71	814
0.38	11,70	15,76	5,24	970

(*) A calda só subiu 8 cm dos 36 cm de extensão de esferas.

Quadro 5.6 - Ensaio intermédios realizados com coluna húmida e esferas $\phi = 5,6$ mm;
Composição tipo da calda: cimento + água + 2,5% SK 163

Relação A/C	Fluidez		Ensaio de injectabilidade	
	Ensaio do cone	Ensaio de imersão	Tempo de enchimento da coluna	Caudal
-	(seg.)	(seg.)	(seg.)	(gr./min.)
0.27	60,23	59,34	46,51	122
0.28	49,83	51,22	34,95	162
0.29	42,70	44,64	26,50	188
0.30	33,14	38,17	19,47	291
0.32	21,41	28,99	11,24	457
0.34	14,45	21,12	5,98	782
0.36	12,09	17,03	5,06	1035

Com base nos resultados apresentados nestes quadros, foram elaborados os Gráficos 5.5 a 5.9, à semelhança do estudo efectuado no Capítulo 4 a ensaios análogos.

O gráfico 5.5 relaciona os resultados obtidos nos dois ensaios de medição da fluidez das caldas, para as diferentes composições estudadas. A sua análise permite confirmar, à semelhança do Capítulo 4, que não há uma relação única entre os resultados do ensaio do cone e do ensaio de imersão, havendo relações diversas consoante o tipo de composição.

Os Gráficos 5.6 a 5.9 relacionam os resultados do ensaio de injectabilidade (tempo de enchimento da coluna e caudal da calda) com os correspondentes resultados dos ensaios de medição da fluidez (ensaio do cone e ensaio de imersão). A conclusão da análise destes gráficos também é semelhante à dos gráficos equivalentes do Capítulo 4 (Gráficos 4.6 a 4.9), isto é, apenas a comparação entre o caudal da calda à saída da coluna e o tempo do ensaio de imersão verifica uma relação praticamente independente da composição da calda estudada. Neste caso a conclusão não é tão nítida como a obtida no Capítulo 4, uma vez que a dispersão verificada no Gráfico 5.9 é superior à do Gráfico 4.9, no qual as curvas praticamente coincidem, contrariamente ao Gráfico 5.9 no qual as curvas são distintas, embora numa faixa relativamente estreita.

5.5.3 - Ensaios de injeção em meio húmido/esferas de aço com $\phi = 4$ mm

Estes ensaios foram realizados exactamente nas mesmas condições, e com as mesmas composições-tipo de caldas, das referidas no subcapítulo anterior (5.5.2), com a diferença essencial da utilização de esferas de aço de 4 mm de diâmetro em vez de 5,6 mm no enchimento da coluna do ensaio de injectabilidade. O conjunto das esferas de $\phi = 4$ mm, utilizadas para o enchimento normalizado dos 36 cm da coluna tinha uma massa de 646 gramas.

Para além dos ensaios realizados anteriormente, foi também realizado o ensaio de determinação da exsudação ao fim de 3 horas, em todas as amassaduras de caldas realizadas.

Em seguida, nos Quadros 5.7 a 5.10 resumem-se os resultados obtidos nestes ensaios:

Quadro 5.7 - Ensaio intermédios realizados com coluna húmida e esferas $\phi = 4$ mm;

Composição tipo da calda: cimento + água

Relação A/C	Fluidez		Injectabilidade		Exsudação
	Ensaio do cone	Ensaio de Imersão	Tempo de enchimento da coluna	Caudal	
-	(seg.)	(seg.)	(seg.)	(gr./min.)	(%)
0,40	13,31	48,14	27,66	39	1,3
0,42	10,57	32,32	13,65	127	1,9
0,44	9,53	21,88	9,24	198	2,4
0,46	8,70	16,32	6,17	387	3,1
0,48	8,08	12,70	5,05	543	3,7
0,52	7,41	7,88	3,20	848	5,2

Quadro 5.8 - Ensaio intermédios realizados com coluna húmida e esferas $\phi = 4$ mm;
Composição tipo da calda: cimento + água + 0,6% SK 163

Relação A/C	Fluidez		Injectabilidade		Exsudação
	Ensaio do cone	Ensaio de Imersão	Tempo de enchimento da coluna	Caudal	
-	(seg.)	(seg.)	(seg.)	(gr./min.)	(%)
0,35	15,31	28,36	24,82	73	0,9
0,36	12,95	25,28	19,84	82	0,9
0,37	12,37	22,05	16,09	101	1,4
0,38	10,68	18,83	12,20	205	1,4
0,40	9,34	14,20	10,06	264	1,9
0,42	8,79	11,34	5,96	366	3,4
0,44	8,03	8,70	4,35	723	3,4

Quadro 5.9 - Ensaio intermédios realizados com coluna húmida e esferas $\phi = 4$ mm;
Composição tipo da calda: cimento + água + 1,5% SK 163

Relação A/C	Fluidez		Injectabilidade		Exsudação
	Ensaio do cone	Ensaio de Imersão	Tempo de enchimento da coluna	Caudal	
-	(seg.)	(seg.)	(seg.)	(gr./min.)	(%)
0,32	25,27	34,39	40,79	61	0
0,33	20,99	29,78	30,71	64	0
0,34	18,75	26,92	27,85	75	0
0,35	16,95	24,52	23,63	76	0
0,36	13,79	20,59	13,56	198	0
0,40	10,09	13,21	7,33	370	3,8
0,44	8,32	8,42	4,01	642	6,2

Quadro 5.10 - Ensaio intermédios realizados com coluna húmida e esferas $\phi = 4$ mm;
Composição tipo da calda: cimento + água + 2,5% SK 163

Relação A/C	Fluidez		Injectabilidade		Exsudação
	Ensaio do cone	Ensaio de Imersão	Tempo de enchimento da coluna	Caudal	
-	(seg.)	(seg.)	(seg.)	(gr./min.)	(%)
0.32	21,52	33,20	33,51	85	0
0.34	17,63	24,20	23,58	90	0
0.36	13,48	19,49	15,13	150	-
0.38	10,66	14,49	9,32	287	0,25
0.40	9,70	12,18	6,95	375	-
0.42	8,86	9,47	5,16	548	6,0
0,44	8,24	7,31	3,11	997	8,8

À semelhança do subcapítulo anterior (5.5.2), com base nestes quadros foram elaborados os Gráficos 5.10 a 5.14, semelhantes aos correspondentes 5.5 a 5.9, que permitem extrair conclusões também idênticas.

Para além destes gráficos elaborou-se também o Gráfico 5.15, no qual se relaciona a razão A/C com a exsudação para cada composição tipo de calda estudada, tendo-se obtido relações idênticas às verificadas noutros estudos semelhantes [4]. Verifica-se que à medida que se aumenta a dosagem do adjuvante se consegue reduzir a exsudação para caldas com a mesma injectabilidade. No entanto, nas caldas com maior dosagem de adjuvante, quando se aumenta a razão A/C demasiado, a exsudação surge com valores rapidamente crescentes, de uma maneira muito mais acentuada do que nas caldas com baixo teor de adjuvante ou sem adjuvante.

Por outro lado há que referir que tendo-se utilizado agora esferas de $\phi = 4$ mm em vez de $\phi = 5,6$ mm para enchimento da coluna de injeção, e utilizando-se a mesma pressão de injeção ($0,6 \text{ kgf/cm}^2$), caldas com as mesmas características tiveram agora maior dificuldade de escoamento através da coluna do que anteriormente.

Em ambos os casos, para cada tipo de composição foram estudadas caldas com razões A/C diversas, de modo a percorrer a máxima diversidade de injectabilidade: desde A/C mais baixa possível, quase não se conseguindo fazer a injeção até ao outro extremo de caldas com grande facilidade de injeção, com valores do caudal escoado superior a 1000 gramas por minuto, com maiores valores de A/C.

Verificou-se que na injeção através das esferas de $\phi = 4$ mm, se foi conduzido a usar uma gama de razões A/C de valores mais elevados do que com as esferas de $\phi = 5,6$ mm, para cada tipo de composição.

Para se analisar os tipos de caldas que se conseguem estudar com estas diferentes condições de injeção (esferas $\phi = 5,6$ mm ou $\phi = 4$ mm), elaborou-se o Gráfico 5.16, no qual se apresenta para cada condição de execução da injeção e para cada tipo de composição, a relação que se verifica entre a razão A/C da calda e a respectiva fluidez medida pelo ensaio de imersão.

Utilizou-se o ensaio de imersão para quantificação da fluidez devido à maior confiança nos seus resultados quando se comparam caldas com diferentes constituintes, particularmente adjuvantes, conforme se concluiu no Capítulo 4.

Balizando neste gráfico a zona das caldas utilizáveis em injeções de bainhas de pré-esforço, de acordo com a norma NP EN 447 [38] - fluidez no ensaio de imersão imediatamente após a mistura ≥ 30 segundos e razão A/C $\leq 0,44$ - verifica-se que as caldas estudadas nas condições de injeção com enchimento da coluna com esferas de $\phi = 4$ mm estão quase totalmente fora desta zona, contrariamente ao sucedido quando da utilização de esferas de $\phi = 5,6$ mm. Isto significa que se se quizesse estudar caldas com fluidez própria para injeção das bainhas de pré-esforço com a coluna de injeção com esferas de $\phi = 4$ mm, ter-se-ia que utilizar uma pressão de injeção superior.

Como já se verificou serem adequadas ao estudo das caldas de injeção correntes as condições de injeção utilizadas com enchimento da coluna com esferas de aço de $\phi = 5,6$ mm, optou-se por estas condições para a realização dos designados “ensaios finais” que se apresentam seguidamente. Como foi referido, poder-se-iam, utilizar as esferas com $\phi = 4$ mm com uma pressão de injeção superior a $0,6 \text{ kgf/cm}^3$, mas seria necessário ainda previamente pesquisar qual a pressão mais apropriada.

5.6 - ENSAIOS FINAIS

Uma vez definidas condições de execução do ensaio de injectabilidade adequadas para o estudo de caldas de injeção correntes utilizáveis em injeções de bainhas de pré-esforço, procedeu-se a uma nova campanha de ensaios, desta vez mais alargada no que

respeita à maior diversidade de composições-tipo utilizadas para a confecção das caldas e também à maior diversidade de ensaios a que estas foram submetidas.

As composições tipo estudadas foram agora as seguintes:

- a) Cimento + água;
- b) Cimento + água + 0,5% SK 163;
- c) Cimento + água + 1,0% SK 163;
- d) Cimento + água + 1,5% SK 163;
- e) Cimento + água + 2,0% SK 163;
- f) Cimento + água + 2,5% SK 163;

Para além dos ensaios de medição da fluidez (ensaio do cone e ensaio de imersão) e de injectabilidade (medição do tempo de enchimento da coluna e do caudal de calda escoada) anteriormente realizados para cada amassadura de calda efectuada, foram agora acrescentados os ensaios de exsudação medida ao fim de 3 horas e de determinação da resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias de idade.

As caldas foram fabricadas com os mesmos componentes, registando-se apenas que o cimento embora continuando a ser do tipo I, classe de resistência 32,5, corresponde a um novo fornecimento, com a mesma origem (Secil).

No que respeita às condições de realização do ensaio de injectabilidade, relembra-se que este foi executado em meio húmido (circuito de injeção previamente humidificado), e as esferas utilizadas no enchimento da coluna tinham o diâmetro de 5,6 mm.

Quanto às condições gerais de realização das amassaduras das caldas e dos correspondentes ensaios, estas foram idênticas às anteriormente consideradas, com excepção da que se passa a expôr em seguida.

Durante a realização dos ensaios intermédios foi necessário por vezes (poucas) repetir o ensaio de imersão ou o ensaio de injectabilidade devido a entupimentos provocados eventualmente pela presença de grumos de cimento. Para evitar a repetição destes inconvenientes, resolveu-se nestes ensaios finais realizar imediatamente após a amassadura da calda a sua passagem total através do peneiro nº 12 da série ASTM (malha quadrada de abertura 1,68 mm), antes, portanto, da realização dos diferentes

ensaios. Anteriormente apenas se fazia a peneiração da calda utilizada na execução do ensaio do cone para medição da fluidez, conforme prevê a norma NP EN 445 [36] (peneiro de abertura 1,5 mm colocado sobre o cone), ficando a restante calda por passar no peneiro.

Este novo procedimento de crivagem prévia global da calda evitou os entupimentos referidos e além disso melhorou as condições de enchimento da coluna no ensaio de injectabilidade, como adiante se verificará.

Apresentam-se nos quadros seguintes (Quadros 5.11 a 5.16) os resultados obtidos nestes ensaios:

Quadro 5.11 - Ensaio finais; composição tipo da calda: cimento + água.

Razão A/C	Fluidez		Injectabilidade		Exsudação (%)	Resist. à. Compressão	
	Ensaio do cone (seg.)	Ensaio de imersão (seg.)	Tempo ench. coluna (seg.)	Caudal (gr./min)		7 d (MPa)	28 d (MPa)
0.48	8.16	12.44	2.02	1742	1,64	29.2	36.8
0.46	8.53	17.35	2.51	1272	1,56	31.1 (9d)	41.9
0.44	9.24	27.09	3.52	774	1,23	33.5 (9d)	43.4
0.42	10.18	41.04	5.06	416	0,92	36.8	46.6
0.41	10.85	55.51	7.34	227	0,84	37.9	45.2
0.40	12.24	70.35	11.79	130	0,64	41.2	50.0
0.39	13.51	87.86	21.45	72	0,52	43.6	52.4
0.385	14.54	93.91	23.70	57	0,55	44.9	43.8

Quadro 5.12 - Ensaio finais; composição tipo da calda: cimento + água + 0,5% SK163.

Razão A/C	Fluidez		Injectabilidade		Exsudação (%)	Resist. à. Compressão	
	Ensaio do cone (seg.)	Ensaio de imersão (seg.)	Tempo ench. coluna (seg.)	Caudal (gr./min)		7 d (MPa)	28 d (MPa)
0.44	8.08	13.49	2.34	1474	1,03	32,4	39.0
0.42	8.61	21.13	2.81	945	0,69	34.4	43.9
0.40	9.22	32.41	4.66	425	0,68	35.6	47.0
0.39	10.07	49.27	6.17	262	0,49	39.6	50.5
0.38	11.00	67.49	9.55	121	0,42	39.8	52.9
0.37	12.09	94.48	18.92	55	0,23	40.4	56.1

Quadro 5.13 - Ensaio finais; composição tipo da calda: cimento + água + 1,0% SK163.

Razão A/C	Fluidez		Injectabilidade		Exsudação (%)	Resist. à. Compressão	
	Ensaio do cone (seg.)	Ensaio de imersão (seg.)	Tempo ench. coluna (seg.)	Caudal (gr./min)		7 d (MPa)	28 d (MPa)
0.40	8.23	10.41	2.23	2165	1.33	39.8	51.3
0.38	8.77	13.49	2.76	1696	1.00	40.8	53.6
0.36	9.67	18.58	3.90	1179	0.92	43.9	57.3
0.34	11.55	29.75	5.09	732	0.57	48.1	68.2
0.33	12.90	38.18	6.63	548	0.48	46.6	62.6
0.32	15.89	57.61	12.35	213	0.35	43.3	68.3
0.31	18.87	74.90	16.35	120	0.30	52.4	71.2
0.305	22.47	101.88	24.00	57	0.19	52.0	63.5
0.30	25.14	127.48	- (*)	-	0.20	57.2	76.7

(*) - Enchimento incompleto da coluna.

Quadro 5.14 - Ensaios finais; composição tipo da calda: cimento + água + 1,5% SK163.

Razão A/C	Fluidez		Injectabilidade		Exsudação (%)	Resist. à Compressão	
	Ensaio do cone (seg.)	Ensaio de imersão (seg.)	Tempo ench. coluna (seg.)	Caudal (gr./min)		7 d (MPa)	28 d (MPa)
0.36	9.02	14.20	2.82	1842	0.38	51.1	54.2
0.34	10.26	19.49	4.03	1377	0.31	52.4	66.6
0.32	12.55	26.76	5.05	1001	0.23	50.5	69.7
0.30	17.43	41.46	8.95	532	0.16	57.3	61.8
0.28	32.58	69.84	15.70	261	0.08	55.7	73.6
0.27	51.36	101.06	26.33	122	0.05	58.3	77.9
0.265	70.54	132.57	38.81	59	0.03	57.8	70.2

Quadro 5.15 - Ensaios finais; composição tipo da calda: cimento + água + 2,0% SK163.

Razão A/C	Fluidez		Injectabilidade		Exsudação (%)	Resist. à Compressão	
	Ensaio do cone (seg.)	Ensaio de imersão (seg.)	Tempo ench. coluna (seg.)	Caudal (gr./min)		7 d (MPa)	28 d (MPa)
0.34	10.06	17.84	3.96	1333	0.17	55.6	74.8
0.32	11.51	25.02	5.13	1078	0.10	65.2	81.3
0.30	15.46	37.30	7.52	675	0.08	62.8	82.4
0.28	26.10	56.55	12.14	390	0.05	69.9	82.6
0.27	38.24	74.25	16.83	272	0.02	61.6	73.1
0.26	54.56	100.04	23.69	175	0.01	61.6	70.2
0.255	72.93	114.23	30.13	129	0.01	62.7	75.7
0.25	116.67	144.19	41.60	90	0.00	68.0	74.0

Quadro 5.16 - Ensaios finais; composição tipo da calda: cimento + água + 2,5% SK163.

Razão A/C	Fluidez		Injectabilidade		Exsudação (%)	Resist. à Compressão	
	Ensaio do cone (seg.)	Ensaio de imersão (seg.)	Tempo ench. coluna (seg.)	Caudal (gr./min)		7 d (MPa)	28 d (MPa)
0.34	9.70	16.31	3.54	1463	0.16	51.5	72.0
0.32	10.86	21.93	4.46	1128	0.09	59.5	83.1
0.30	13.88	32.12	6.77	796	0.07	62.9	77.0
0.28	19.70	48.17	10.48	452	0.03	65.4	87.9
0.27	26.41	62.70	12.63	366	0.02	74.3	-
0.26	38.70	84.61	20.17	229	0.01	74.6	-
0.25	57.68	113.17	28.87	145	0.00	76.5	-
0.245	86.52	138.83	36.99	96	0.00	71.2	-

Com base nestes quadros foram elaborados os Gráficos 5.17 a 5.23 nos quais se relacionam diversos parâmetros, traçando-se em cada gráfico as curvas de relacionamento desses parâmetros para cada composição tipo:

Gráfico 5.17 - Relação entre a fluidez medida pelo ensaio de imersão e pelo ensaio do cone

Gráfico 5.18 - Relação entre a injectabilidade, medida pelo tempo de enchimento da coluna, e a fluidez, medida pelo ensaio do cone.

Gráfico 5.19 - Relação entre a injectabilidade, medida pelo caudal de calda escoado na coluna, e a fluidez, medida pelo ensaio do cone.

Gráfico 5.20 - Relação entre a injectabilidade, medida pelo tempo de enchimento da coluna, e a fluidez, medida pelo ensaio de imersão.

Gráfico 5.21 - Relação entre a injectabilidade, medida pelo caudal de calda escoado na coluna, e a fluidez, medida pelo ensaio de imersão.

Gráfico 5.22 - Relação entre a exsudação, medida ao fim de 3 horas, e a razão A/C das caldas.

Gráfico 5.23 - Relação entre a resistência à compressão, medida aos 7 e 28 dias de idade, e a razão A/C das caldas.

A análise do Gráfico 5.17 permite tirar uma conclusão semelhante à extraída dos correspondentes gráficos dos ensaios intermédios (Gráficos 5.5 e 5.10). De facto constata-se que não existe uma relação única entre a fluidez medida pelo escoamento do cone e a fluidez medida pelo ensaio de imersão, havendo sim diversas relações, consoante a composição-tipo utilizada.

A análise dos gráficos 5.18 a 5.21, nos quais se relaciona a injectabilidade com a fluidez, permite concluir que a relação entre a injectabilidade (medida quer pelo tempo de enchimento da coluna, quer pelo caudal de escoamento da calda através da coluna) e a fluidez é praticamente independente da composição-tipo da calda utilizada, se a fluidez for medida pelo ensaio de imersão, havendo a concentração das diferentes curvas das composições-tipo uma faixa muito estreita. O mesmo já não acontece quando a fluidez é medida pelo ensaio do cone, havendo nesse caso uma grande dispersão de resultados em função das composições-tipo utilizadas. Esta constatação permite inferir que a fluidez medida pelo ensaio de imersão mede também a injectabilidade das caldas, praticamente independentemente da sua composição, enquanto que a fluidez medida pelo ensaio do cone também mede a injectabilidade, mas de modo diferente consoante a composição da calda.

Esta conclusão saiu reforçada com estes ensaios finais, uma vez que a relação praticamente única entre a injectabilidade e a fluidez medida pelo ensaio de imersão só se verificava anteriormente quando a injectabilidade era medida pelo caudal de escoamento na coluna (Gráficos 5.9 e 5.14, e agora 5.21). No entanto, agora essa relação praticamente única também se verificou com nitidez quando a injectabilidade

foi medida pelo tempo de enchimento da coluna (Gráfico 5.20), o que não se verificou nos ensaios intermédios (Gráficos 5.8 e 5.13).

Julga-se que isto se ficou a dever ao novo procedimento já referido de imediatamente após a amassadura se passar toda a calda por um peneiro (neste caso o peneiro nº 12 - ASTM), para além de se tratar de um novo fornecimento do mesmo tipo de cimento, visto terem sido estas as diferenças relativamente às situações anteriores.

A análise do Gráfico 5.22, que relaciona a exsudação com a relação A/C das caldas, permite concluir que, à semelhança dos ensaios intermédios com a coluna do ensaio de injectabilidade cheia com esferas de aço de $\phi = 4$ mm (5.5.3), nos quais também se procedeu à medição da exsudação ao fim de 3 horas, à medida que se aumenta a dosagem do adjuvante se consegue reduzir a exsudação para caldas com a mesma injectabilidade. Porém, comparando os gráficos correspondentes (o actual 5.22 e o anterior 5.15), verifica-se que quando se aumenta a razão A/C, a exsudação cresce agora mais lentamente do que anteriormente, em que o crescimento era muito rápido (curvas de declive bastante mais acentuado), e principalmente os valores máximos da exsudação atingidos eram bastante superiores aos correspondentes da calda com composições idênticas agora medidas, que nunca excederam o limite máximo de 2,0% estabelecido na norma NP EN 447, o que anteriormente não se verificava.

Esta diferença de comportamento das caldas relativamente à exsudação deverá ter por causas, à semelhança do anteriormente referido quanto ao tempo de enchimento da coluna/ensaio de imersão, as diferenças de condições de execução dos ensaios finais relativamente aos intermédios: passagem prévia de toda a calda por um peneiro imediatamente após a amassadura e a utilização de um novo fornecimento de cimento, embora do mesmo tipo e classe de resistência (I – 32,5). De facto, os primeiros ensaios em que se fez medição sistemática da exsudação foi na parte final dos ensaios intermédios, em que o cimento utilizado tinha mais idade, agravado pelo facto de não se fazer a peneiração prévia total da calda. Concerteza que estes factores fizeram aumentar os valores da exsudação em caldas com a mesma composição relativamente à situação actual, já que o fenómeno da exsudação se traduz na segregação da calda e os grumos de cimento constituem núcleos de segregação, tendo maior tendência de formação na primeira situação, agravada pela sua não eliminação por peneiração.

Finalmente, quanto à análise do Gráfico 5.23, no qual se apresentam os valores das resistências à compressão obtidos aos 7 e 28 dias de idade para as diferentes composições-tipo, em função da razão A/C, há que referir que globalmente se enquadram dentro das expectativas, verificando-se que todos os valores de resistência à compressão aos 28 dias são superiores ao limite mínimo de 30 MPa estabelecido na norma NP EN 447. Como é habitual, as resistências em cada idade vão aumentando à medida que se reduz a razão A/C, não havendo grande variação da resistência para os mesmos valores da razão A/C nas diferentes composições-tipo, isto é, obtêm-se quase curvas únicas para cada idade que relacionam a resistência com a razão A/C.

Acessoriamente regista-se que, no que respeita à influência do adjuvante utilizado nas diferentes características das caldas, e atendendo à maior diversidade de composições-tipo utilizadas, se verifica que as diferentes características das caldas são pouco afectadas com a utilização do adjuvante numa dosagem de 0,5% (referida à massa de cimento), tendo a calda um comportamento muito próximo da calda sem adjuvante. Em contraposição, as caldas com adjuvante nas percentagens de 1,5%, 2,0% e 2,5% têm comportamento bastante diferente das caldas sem adjuvante, mas muito próximo entre si. As caldas com 1,0% de adjuvante estão numa situação intermédia.

Isto significa que não vale a pena usar-se este adjuvante na percentagem de 0,5%, mas já vale a pena utilizar-se na percentagem de 1,0% e ainda mais na percentagem de 1,5%. Acima deste valor já não há interesse utilizar-se este adjuvante, pois as características das caldas quase que já não melhoram, sendo o benefício quase inexistente.

Esta constatação está de acordo com o indicado na ficha técnica do produto anteriormente referida (5.5.2), na qual é recomendado para as caldas de injeção a sua utilização numa dosagem a partir de 1% do peso do cimento (cerca de 0,8 litros/100 kg de cimento). Nesta ficha técnica é também referida a “dosagem de conformidade” (EN-447) de 0,8 a 1,2 litros/100 kg de cimento (cerca de 1,0% a 1,5%, referida à massa de cimento).

5.7 - ESTUDO ANALÍTICO DAS CURVAS DE CORRELAÇÃO

Este estudo abrange as curvas de relacionamento da injectabilidade, medida através do tempo de enchimento da coluna ou do caudal de calda na coluna, com a fluidez da calda, medida pelo ensaio do cone ou pelo ensaio de imersão.

Para cada gráfico de relacionamento da injectabilidade com a fluidez foram traçadas curvas deste relacionamento para cada uma das composições-tipo das caldas consideradas. Verificou-se que o tipo de regressão que melhor ajustava as curvas aos pontos era a regressão logarítmica para o relacionamento do tempo de enchimento da coluna com a fluidez no ensaio do cone (Gráficos 5.6, 5.11 e 5.18) e a regressão potencial para os restantes relacionamentos - caudal na coluna com a fluidez no ensaio do cone (Gráficos 5.7, 5.12 e 5.19), tempo de enchimento da coluna com a fluidez no ensaio de imersão (Gráficos 5.8, 5.13 e 5.20) e caudal na coluna com a fluidez no ensaio de imersão (Gráficos 5.9, 5.14 e 5.21).

As expressões das correlações das propriedades das caldas referidas foram calculadas pelo método dos mínimos quadrados, como seguidamente se indica.

A equação da regressão logarítmica é do tipo $y = A + B \ln x$, determinando-se os seguintes parâmetros:

$$B = \frac{n \cdot \sum (\ln x) \cdot y - \sum \ln x \cdot \sum y}{n \cdot \sum (\ln x)^2 - (\sum \ln x)^2} \quad (5.1)$$

$$A = \frac{\sum y - B \cdot \sum (\ln x)}{n} \quad (5.2)$$

Coefficiente de correlação r:

$$r = \frac{n \cdot \sum (\ln x) \cdot y - \sum \ln x \cdot \sum y}{\sqrt{\left\{ n \cdot \sum (\ln x)^2 - (\sum \ln x)^2 \right\} \cdot \left\{ n \cdot \sum y^2 - (\sum y)^2 \right\}}} \quad (5.3)$$

sendo r^2 o coeficiente de determinação.

A equação de regressão potencial é do tipo $y = A x^B$, ou $\ln y = \ln A + B \ln x$, determinando-se os parâmetros seguintes:

$$B = \frac{n \cdot \sum (\ln x)(\ln y) - \sum \ln x \cdot \sum \ln y}{n \cdot \sum (\ln x)^2 - (\sum \ln x)^2} \quad (5.4)$$

$$A = \frac{\sum \ln y - B \cdot \sum \ln x}{n} \quad (5.5)$$

$$r = \frac{n \cdot \sum (\ln x)(\ln y) - \sum \ln x \cdot \sum \ln y}{\sqrt{\{n \cdot \sum (\ln x)^2 - (\sum \ln x)^2\} \cdot \{n \cdot \sum (\ln y)^2 - (\sum \ln y)^2\}}} \quad (5.6)$$

De igual modo se calculou o valor do coeficiente de determinação como o quadrado do coeficiente de correlação.

Deste modo foram determinadas as equações de todas as curvas constantes dos gráficos anteriormente referidos e calculados os correspondentes coeficientes de determinação (r^2) que quantificam a dispersão dos pontos relativamente à respectiva curva de ajuste.

Nos Quadros 5.17 e 5.18 são apresentados os valores de todos os parâmetros A e B definidores das curvas em causa, bem como os correspondentes valores de r^2 .

Na sequência destes cálculos, determinou-se também, para cada um dos gráficos em estudo, uma curva única de relacionamento das duas variáveis, em vez das várias curvas traçadas anteriormente (uma por cada composição-tipo). Por conseguinte, traçou-se para cada gráfico uma única curva de ajuste à globalidade dos pontos com os quais anteriormente se definiram várias curvas.

No Quadro 5.19 encontram-se indicados os correspondentes valores de A, B e r^2 .

Para uma melhor visualização do ajuste das curvas aos respectivos pontos coordenados, elaboraram-se os Gráficos 5.6A a 5.9A, 5.11A a 5.14A e 5.18A a 5.21A, nos quais se encontram traçadas as curvas de regressão únicas referentes à totalidade dos pontos de cada gráfico. A numeração dos gráficos é idêntica aos correspondentes anteriores, acrescentando-se a letra A.

A análise dos Quadros 5.17 a 5.19 permite confirmar as conclusões obtidas no subcapítulo anterior (5.6), após a conclusão dos ensaios finais. Verifica-se, assim, que as curvas de relacionamento da injectabilidade com a fluidez, traçadas para cada composição-tipo nas diversas fases de ensaio e conjugando as duas variáveis consideradas para cada uma das características referidas, apresentam boas correlações,

Quadro 5.17 - Curvas de regressão dos ensaios intermédios

Relacionamento Injectabilidade/Fluidez	Composições-tipo das caldas	Ensaio intermédios									
		Coluna com esferas de $\phi = 5,6$ mm					Coluna com esferas de $\phi = 4$ mm				
		Gráfico	A	B	r ²	Gráfico	A	B	r ²		
Tempo de enchimento da coluna/Ensaio do cone	cimento + água	5.6	-34,652	17,208	0,9669	5.11	-82,934	41,807	0,9462		
	cim. + água + 0,6%SK163		-50,528	22,915	0,8838		-61,714	31,523	0,9806		
	cim. + água + 1,5%SK163		-41,144	17,977	0,9470		-68,403	32,830	0,9653		
	cim. + água + 2,5%SK163		-58,349	23,763	0,9087		-61,735	30,277	0,9818		
Caudal na coluna/Ensaio do cone	cimento + água	5.7	35364	-1,7320	0,9464	5.12	4E07	-5,3089	0,9968		
	cim. + água + 0,6%SK163		147887	-2,1337	0,9604		881614	-3,5482	0,9395		
	cim. + água + 1,5%SK163		27563	-1,3656	0,9975		77737	-2,3177	0,9451		
	cim. + água + 2,5%SK163		26019	-1,3043	0,9974		113888	-2,4472	0,9186		
Tempo de enchimento da coluna/Ensaio de imersão	cimento + água	5.8	0,0318	1,6390	0,9690	5.13	0,2596	1,1692	0,9831		
	cim. + água + 0,6%SK163		0,0784	1,5249	0,9930		0,0215	2,6350	0,9391		
	cim. + água + 1,5%SK163		0,0497	1,6397	0,9870		0,1017	1,6830	0,9856		
	cim. + água + 2,5%SK163		0,0236	1,8486	0,9927		0,1365	1,5875	0,9956		
Caudal na coluna/Ensaio de imersão	cimento + água	5.9	611066	-2,1732	0,9791	5.14	34860	-1,6800	0,9611		
	cim. + água + 0,6%SK163		133164	-1,8219	0,9911		44401	-1,9251	0,9733		
	cim. + água + 1,5%SK163		118095	-1,7103	0,9945		38336	-1,8570	0,9480		
	cim. + água + 2,5%SK163		157165	-1,7491	0,9947		27594	-1,7214	0,9723		

Quadro 5.18 – Curvas de regressão dos ensaios finais

Relacionamento Injectabilidade/Fluidez	Gráfico	Composições-tipo das caldas	Ensaio finais		
			A	B	r ²
Tempo de enchimento da coluna/Ensaio do cone	5.18	cimento + água	-81,425	38,446	0,9066
		cim. + água + 0,5%SK163	-78,611	37,773	0,8556
		cim. + água + 1,0%SK163	-42,730	20,383	0,9273
		cim. + água + 1,5%SK163	-34,988	16,051	0,9326
		cim. + água + 2,0%SK163	-32,158	14,512	0,9506
		cim. + água + 2,5%SK163	-32,849	15,039	0,9659
Caudal na coluna/Ensaio do cone	5.19	cimento + água	6E08	-6,0780	0,9921
		cim. + água + 0,5%SK163	3E10	-8,1215	0,9950
		cim. + água + 1,0%SK163	4E06	-3,5591	0,9948
		cim. + água + 1,5%SK163	55934	-1,5812	0,9931
		cim. + água + 2,0%SK163	15270	-1,1033	0,9932
		cim. + água + 2,5%SK163	20204	-1,2181	0,9912
Tempo de enchimento da coluna/Ensaio de imersão	5.20	cimento + água	0,0761	1,2065	0,9397
		cim. + água + 0,5%SK163	0,1299	1,0412	0,9500
		cim. + água + 1,0%SK163	0,1808	1,0347	0,9841
		cim. + água + 1,5%SK163	0,1205	1,1650	0,9951
		cim. + água + 2,0%SK163	0,1366	1,1296	0,9918
		cim. + água + 2,5%SK163	0,1494	1,1042	0,9938
Caudal na coluna/Ensaio de imersão	5.21	cimento + água	163570	-1,6894	0,9680
		cim. + água + 0,5%SK163	140567	-1,6775	0,9788
		cim. + água + 1,0%SK163	108814	-1,5593	0,9626
		cim. + água + 1,5%SK163	124376	-1,5062	0,9773
		cim. + água + 2,0%SK163	70376	-1,3128	0,9863
		cim. + água + 2,5%SK163	55461	-1,2523	0,9855

Quadro 5.19 - Curvas de regressão globais

Relacionamento Injectabilidade/Fluidez	Ensaio intermediário						Ensaio final		
	Coluna c/esferas de $\phi = 5,6$ mm		Coluna c/esferas de $\phi = 4$ mm		Gráfico	Parâmetros A, B e r^2	Gráfico	Parâmetros A, B e r^2	
	Gráfico	Parâmetros A, B e r^2	Gráfico	Parâmetros A, B e r^2					
Tempo de enchimento da coluna/Ensaio do cone	5.6	A	-42,033	5.11	A	-58,050	5.18	A	-25,221
		B	19,276		B	29,549		B	13,283
		r^2	0,8788		r^2	0,9285		r^2	0,8287
Caudal na coluna/Ensaio do cone	5.7	A	19962	5.12	A	61945	5.19	A	5872,4
		B	-1,3881		B	-2,3259		B	-0,9676
		r^2	0,7039		r^2	0,7466		r^2	0,4025
Tempo de enchimento da coluna/Ensaio de imersão	5.8	A	0,0711	5.13	A	0,1945	5.20	A	0,1183
		B	1,4961		B	1,4113		B	1,138
		r^2	0,8920		r^2	0,8765		r^2	0,9480
Caudal na coluna/Ensaio de imersão	5.9	A	189697	5.14	A	31055	5.21	A	76709
		B	-1,8593		B	-1,7513		B	-1,4107
		r^2	0,9516		r^2	0,9245		r^2	0,9034

traduzidas por elevados valores dos respectivos coeficientes de correlação. Nos Quadros 5.17 e 5.18 verifica-se que das 56 curvas traçadas apenas 2 têm valor de r^2 inferior a 0,90, enquanto que 18 têm valores superiores a 0,99.

Porém, analisando o Quadro 5.19, onde são apresentadas as curvas de regressão globais de cada gráfico, verifica-se que apenas a relação do caudal na coluna com a fluidez medida pelo ensaio de imersão apresenta em todas as fases do ensaio uma boa correlação, traduzida por r^2 sempre superior a 0,90, a que corresponde um coeficiente de correlação $r \cong 0,95$ (Gráficos 5.9A, 5.14A e 5.21A). No entanto, nos ensaios finais também a relação entre o tempo de enchimento da coluna com a fluidez medida pelo ensaio de imersão apresenta valor de r^2 superior a 0,90 (Gráfico 5.20A).

Todos os outros relacionamentos apresentam valores de r^2 inferiores a 0,90, indicadoras de piores correlações das grandezas envolvidas, particularmente a relação entre o caudal na coluna e a fluidez medida pelo ensaio do cone que apresenta valores bastante baixos de r^2 em todas as fases do ensaio (Gráficos 5.7A, 5.12A e 5.19A). Como excepção verifica-se que a curva de relacionamento do tempo de enchimento da coluna com a fluidez medida pelo ensaio do cone nos ensaios intermédios com a coluna com esferas de aço de $\phi = 4$ mm (Gráfico 5.11A) tem valor de r^2 maior que 0,90. No entanto este mesmo relacionamento nas outras fases de ensaio apresenta valores de r^2 bastante inferiores (Gráficos 5.6A e 5.18A).

Este subcapítulo (5.7) referente ao estudo analítico das correlações entre a injectabilidade e a fluidez apenas foi apresentado no final deste trabalho, devido a ter-se dado prioridade à análise gráfica dos resultados.

Aproveitou-se este estudo analítico para se elaborar também o Gráfico 5.23A, referente à relação entre as resistências à compressão aos 7 e 28 dias de idade com a razão A/C das caldas, já que a análise efectuada em 5.6 relativamente ao Gráfico 5.23 referia que não havia grande variação da resistência para os mesmos valores da razão A/C nas diferentes composições tipo, obtendo-se quase curvas únicas para cada idade relacionando a resistência com a razão A/C. São essas curvas únicas que agora foram traçadas, confirmando-se uma razoável correlação existente entre estas duas variáveis, independentemente da composição das caldas.

Verifica-se, porém, que esta correlação é bastante melhor para a relação entre a resistência à compressão aos 7 dias e a razão A/C das caldas, com $r^2 = 0,8827$, do que

com a relação entre a resistência aos 28 dias e a razão A/C, com $r^2 = 0,7945$ (regressão potencial).

As equações obtidas por regressão potencial para as curvas de relacionamento das resistências à compressão com a razão A/C das caldas foram as seguintes:

$$R_{C7\text{dias}} = 11,853 \cdot \left(\frac{A}{C}\right)^{-1,3019} \quad (5.7)$$

e

$$R_{C28\text{dias}} = 16,442 \cdot \left(\frac{A}{C}\right)^{-1,2133} \quad (5.8)$$

Invertendo a razão A/C para se dar uma forma semelhante à fórmula de Dutron/Bolomey $R = k \cdot \left(\frac{C}{A}\right)^{1,5}$ [55], obtém-se:

$$R_{C7\text{dias}} = 11,853 \cdot \left(\frac{C}{A}\right)^{1,3019} \quad (5.9)$$

e

$$R_{C28\text{dias}} = 16,442 \cdot \left(\frac{C}{A}\right)^{1,2133} \quad (5.10)$$

A variação dos parâmetros A e B destas equações devem-se às diferentes idades de ensaio (7 e 28 dias), uma vez que os restantes factores de variação considerados por Dutron/Bolomey não se alteram (condições de ensaio, forma e dimensões dos provetes, tipo de ligante).

Injectabilidade / Pressão de injeção

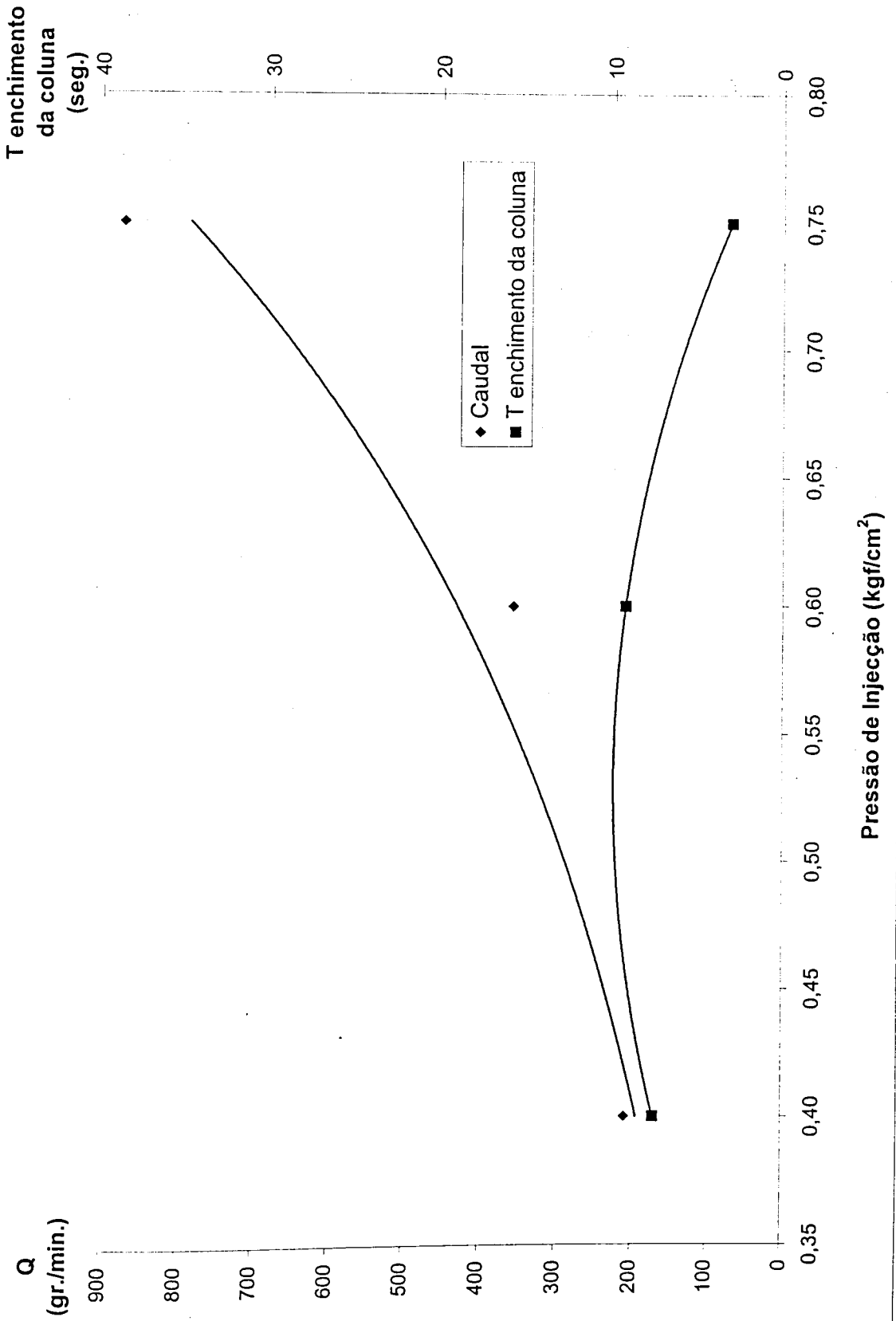


Gráfico 5.1 – Ensaio iniciais: variação dos resultados do ensaio de injectabilidade com a pressão de injeção.

Fluidez e Injectabilidade / Razão A/C

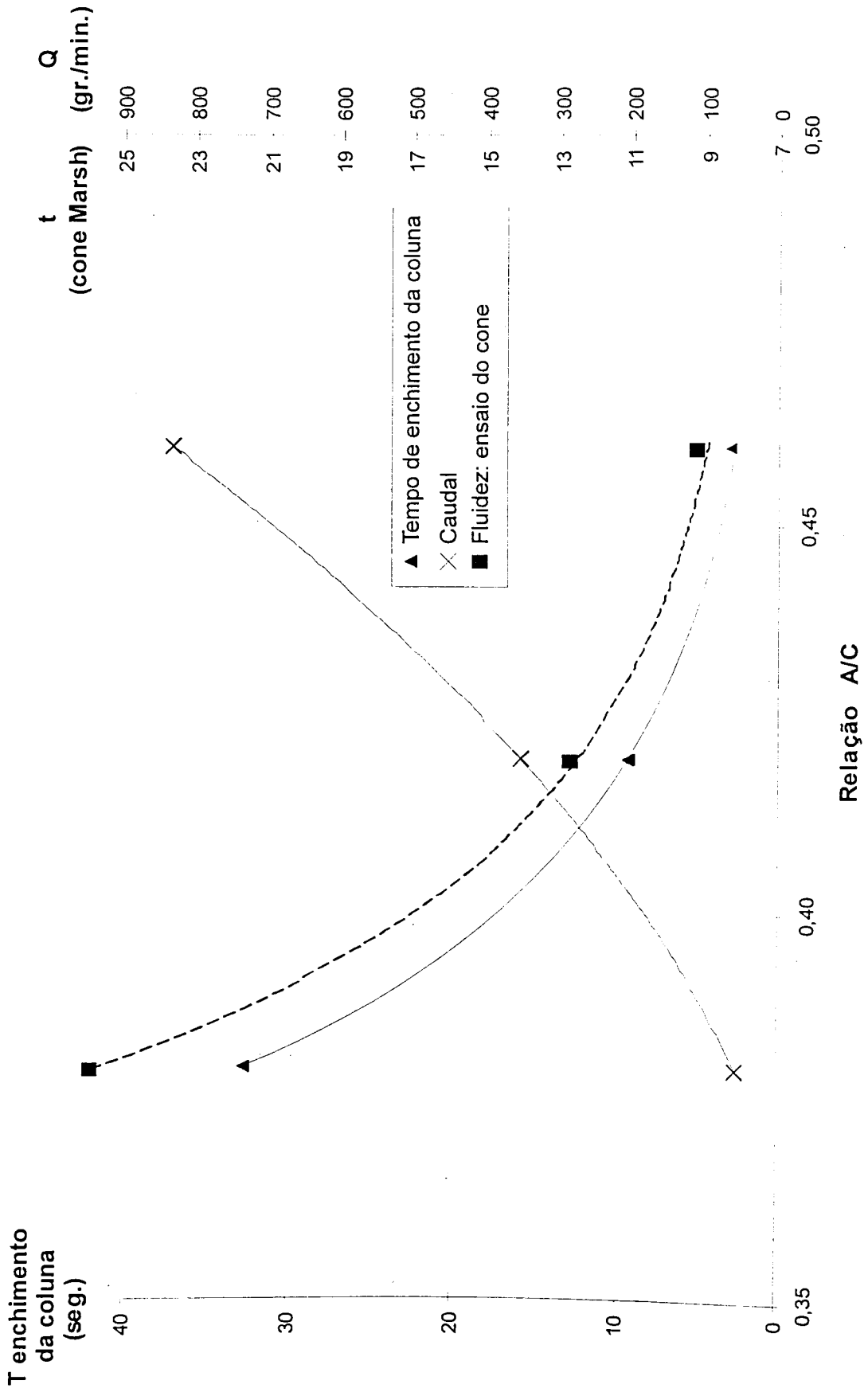


Gráfico 5.2 – Ensaio iniciais: características de fluidez e injectabilidade em função da relação A/C.

Fluidez / Razão A/C

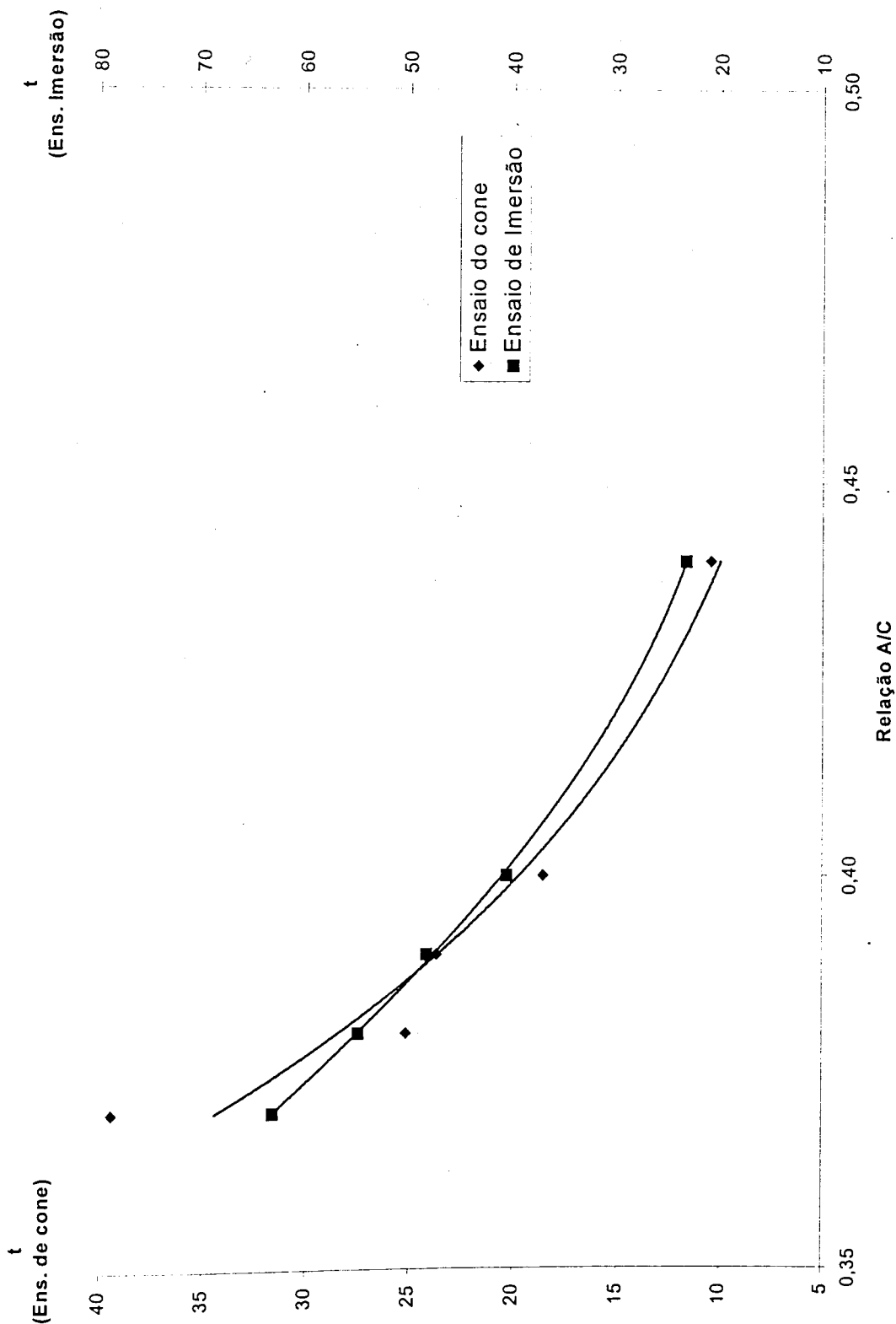


Gráfico 5.3 – Ensaio iniciais: relação entre a fluidez e a razão A/C.

Injectabilidade / Razão A/C

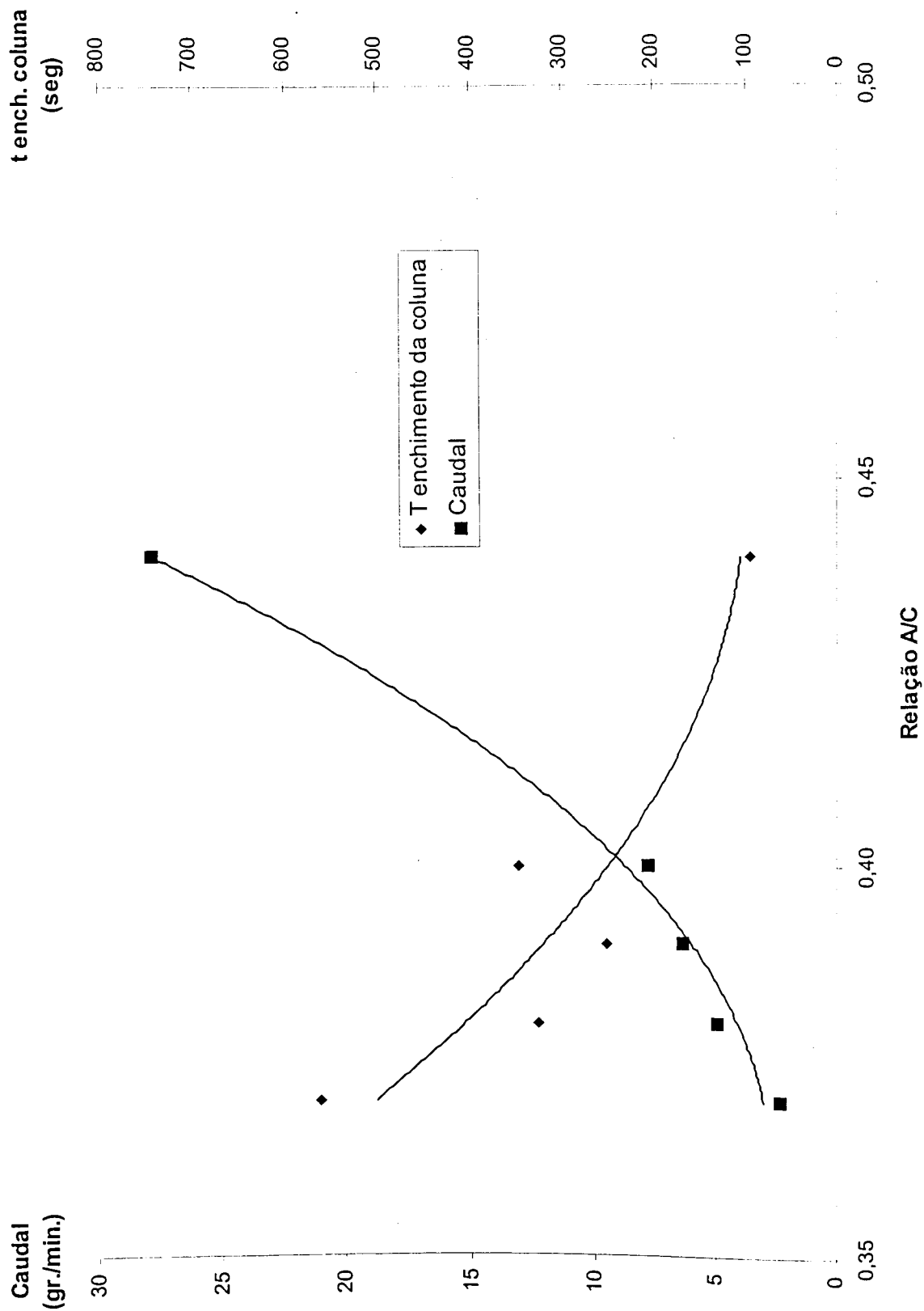


Gráfico 5.4 – Ensaios iniciais: relação entre a injectabilidade e a razão A/C.

Ensaio de Imersão / Ensaio do Cone

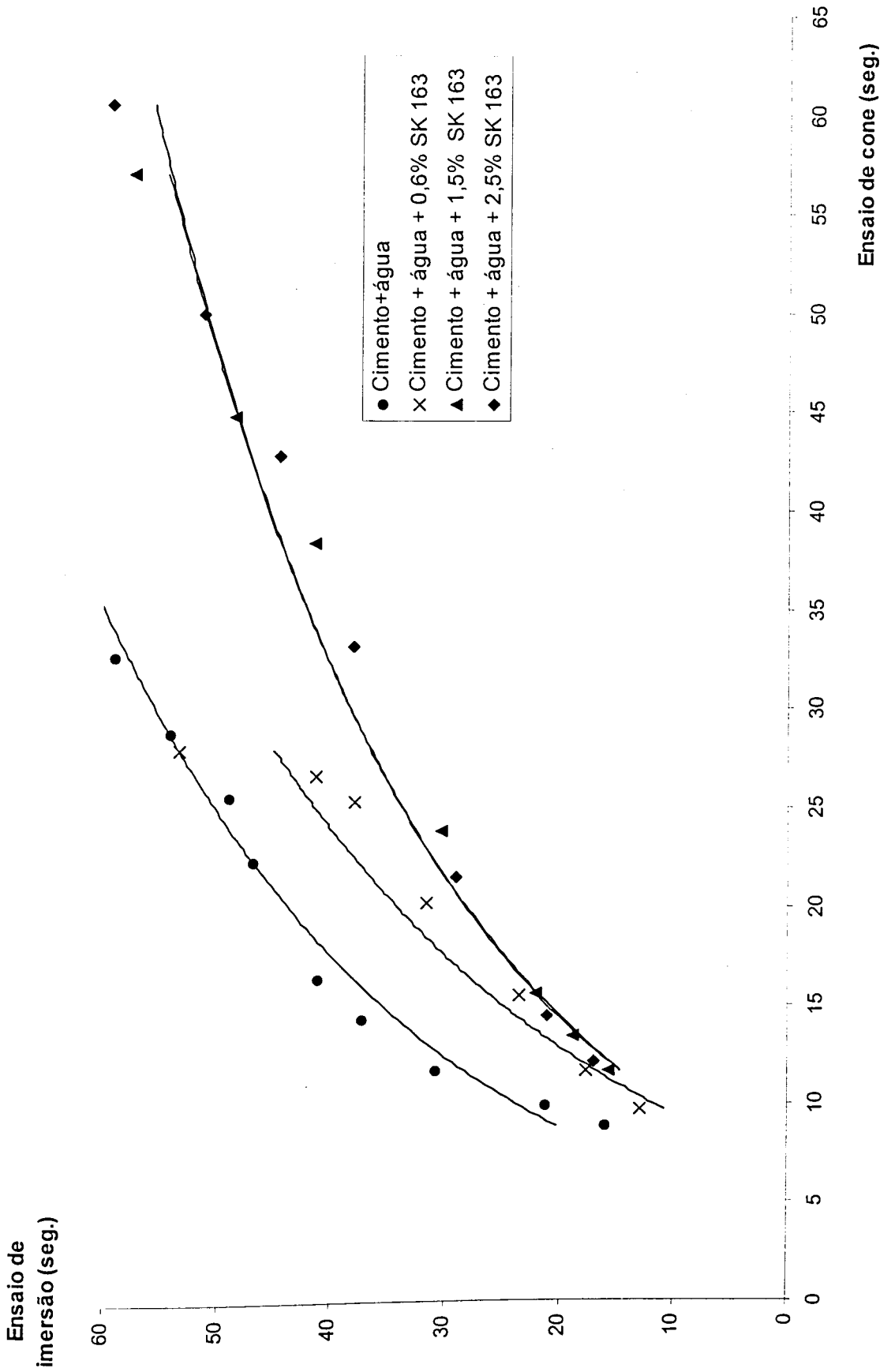


Gráfico 5.5 – Ensaios intermediários / Coluna com esferas de aço $\phi = 5,6\text{mm}$; Comparação entre dois ensaios de medição da fluidez das caldas.

Tempos de enchimento de coluna / Fluidez no ensaio do cone

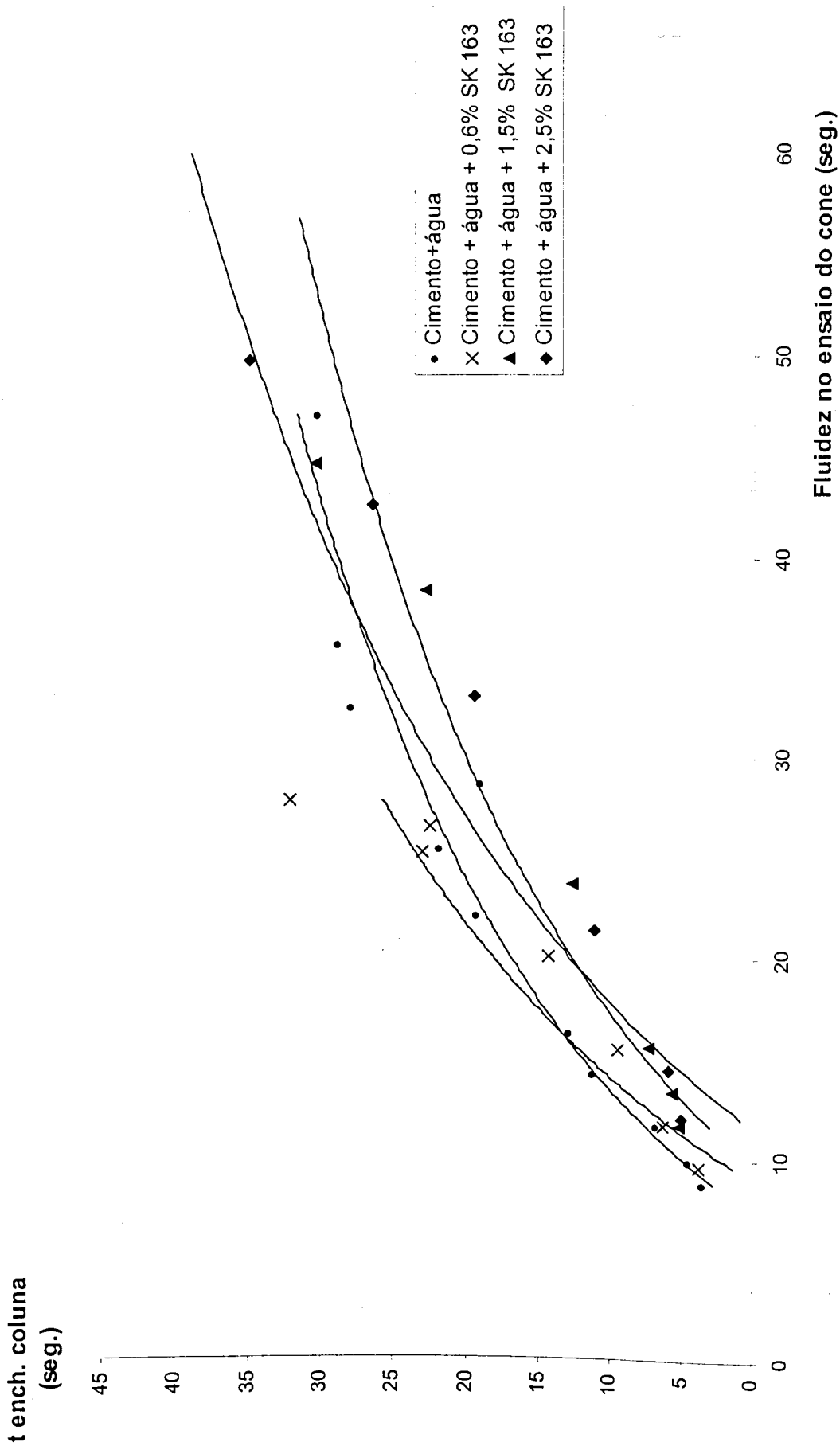


Gráfico 5.6 – Ensaio intermediários / coluna com esferas de aço $\phi = 5,6\text{mm}$; tempos de enchimento da coluna / fluidez no ensaio do cone.

Caudal na coluna / Fluidez no ensaio do cone

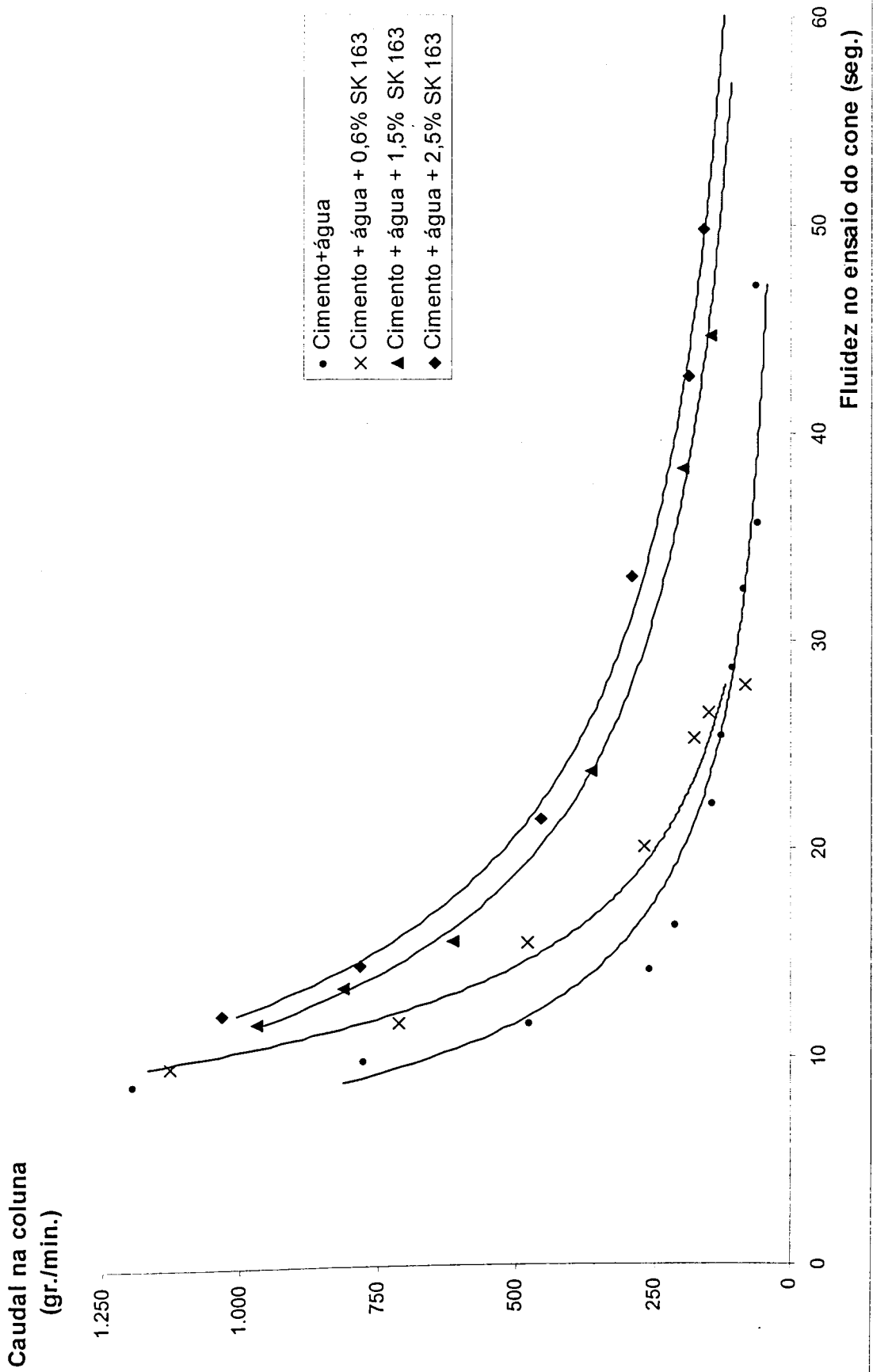


Gráfico 5.7 - Ensaio intermediários / coluna com esferas de aço $\phi = 5,6\text{mm}$; caudal na coluna / fluidez no ensaio do cone.

Tempo de enchimento da coluna / Fluidez no ensaio de imersão

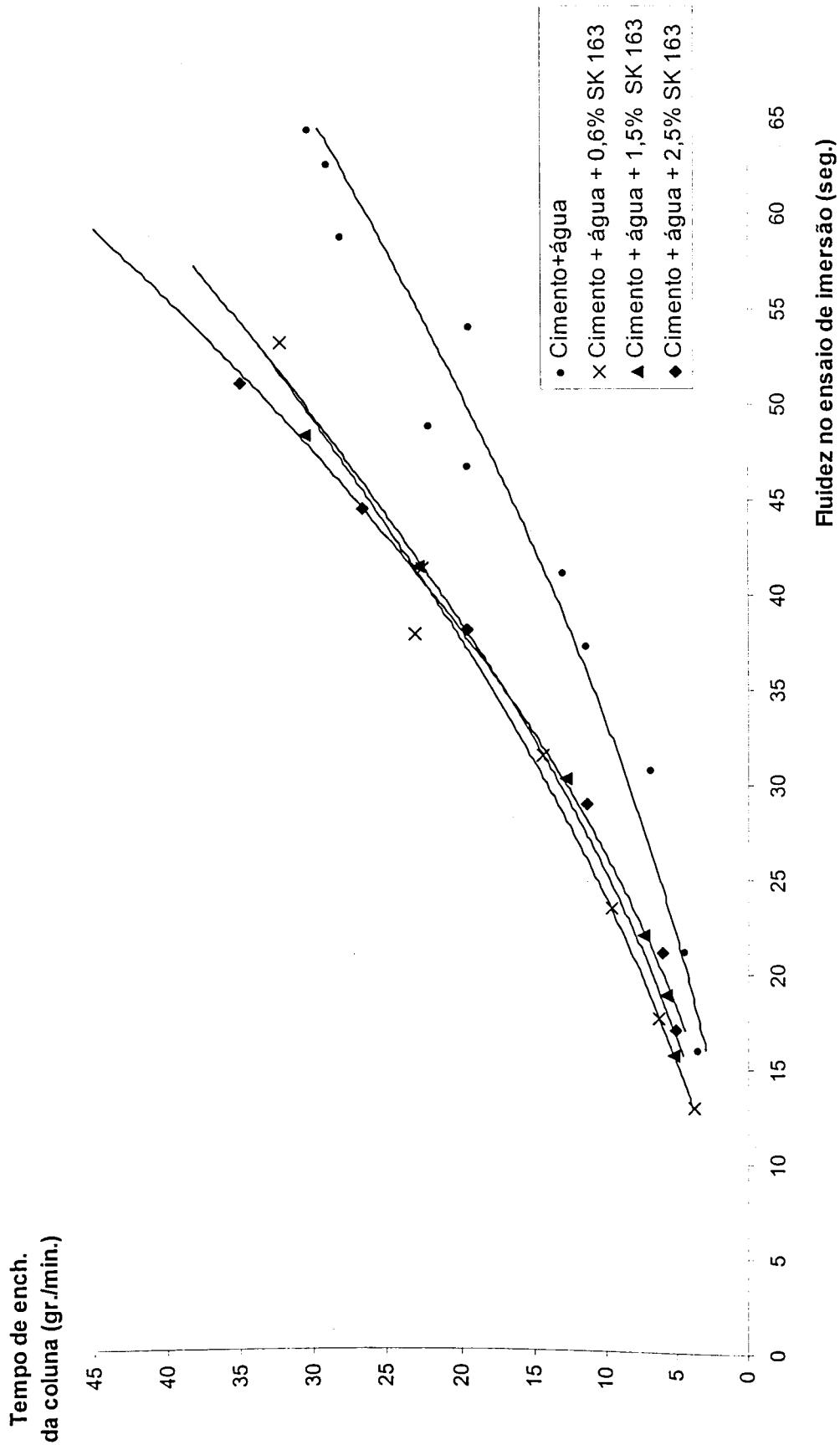


Gráfico 5.8 - Ensaios intermédios / coluna com esferas de aço $\phi = 5,6\text{mm}$; Tempos de enchimento da coluna / fluidez no ensaio de imersão.

Caudal na coluna / Fluidez no ensaio de imersão

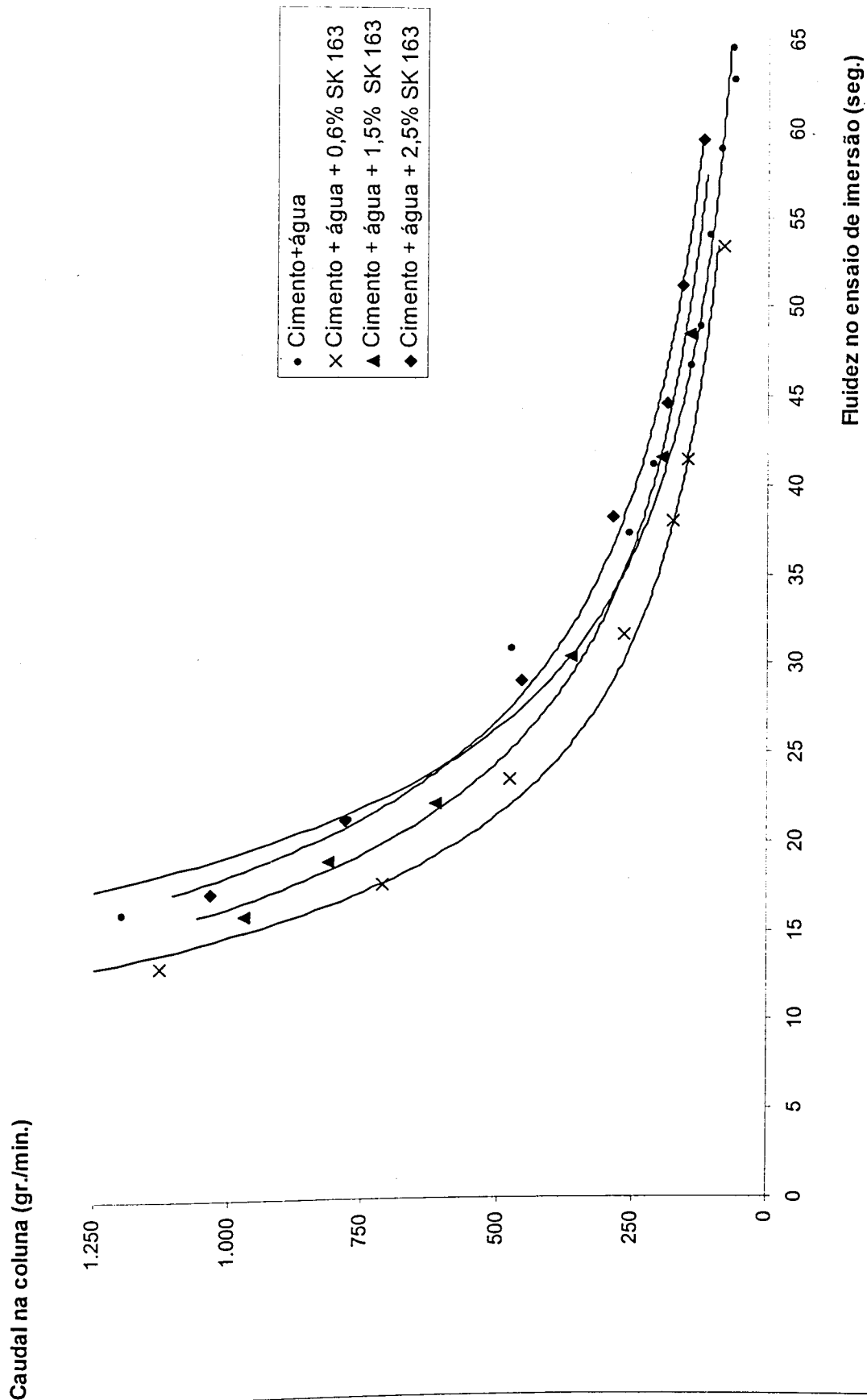


Gráfico 5.9 - Ensaios intermédios / coluna com esferas de aço $\phi = 5,6\text{mm}$; Caudal na coluna / fluidez no ensaio de imersão.

Ensaio de imersão / Ensaio do cone

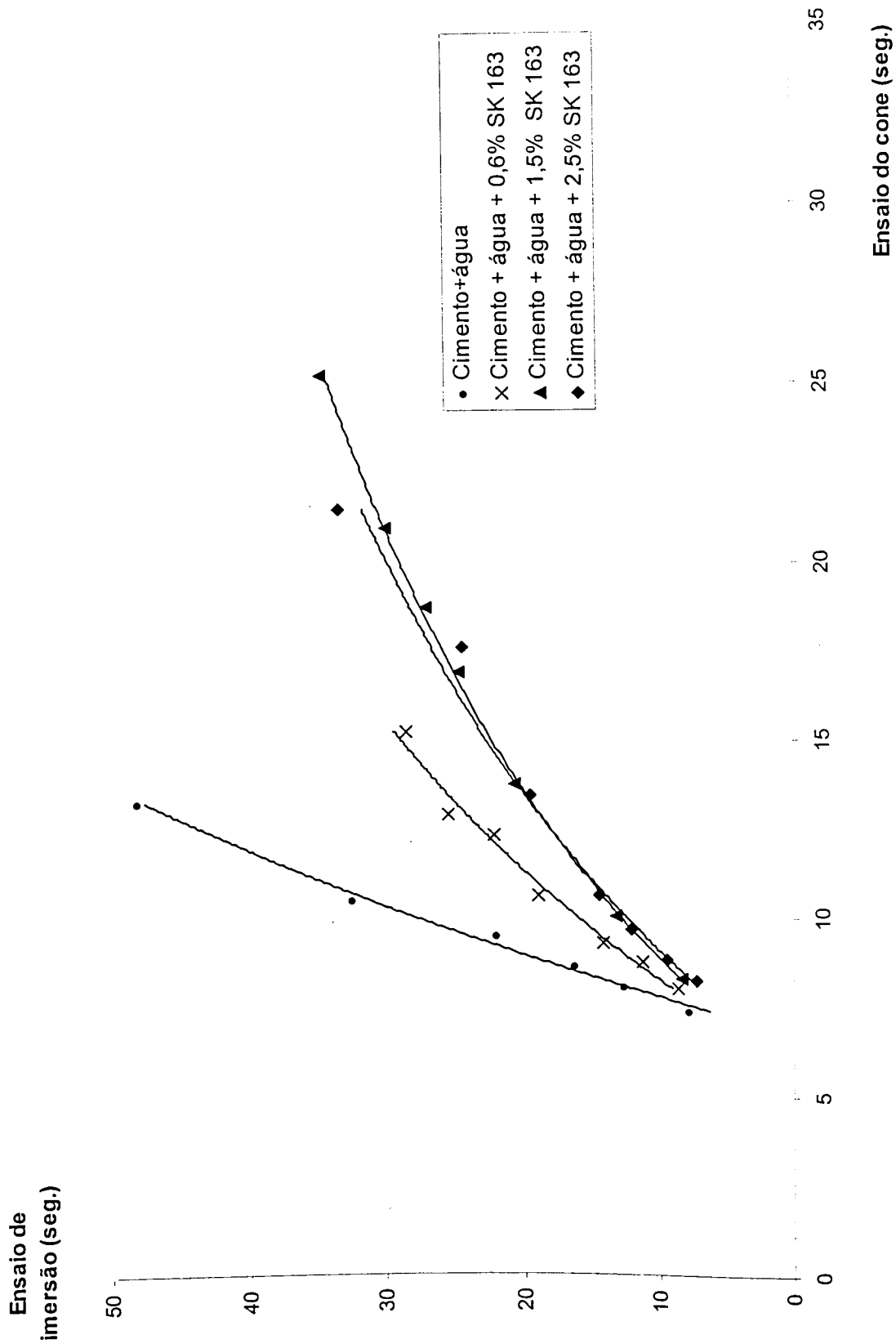


Gráfico 5.10 - Ensaio de imersão / Ensaio do cone. Comparação entre dois ensaios de medição de fluidez de caldas.

Tempos de enchimento da coluna / Fluidez no ensaio do cone

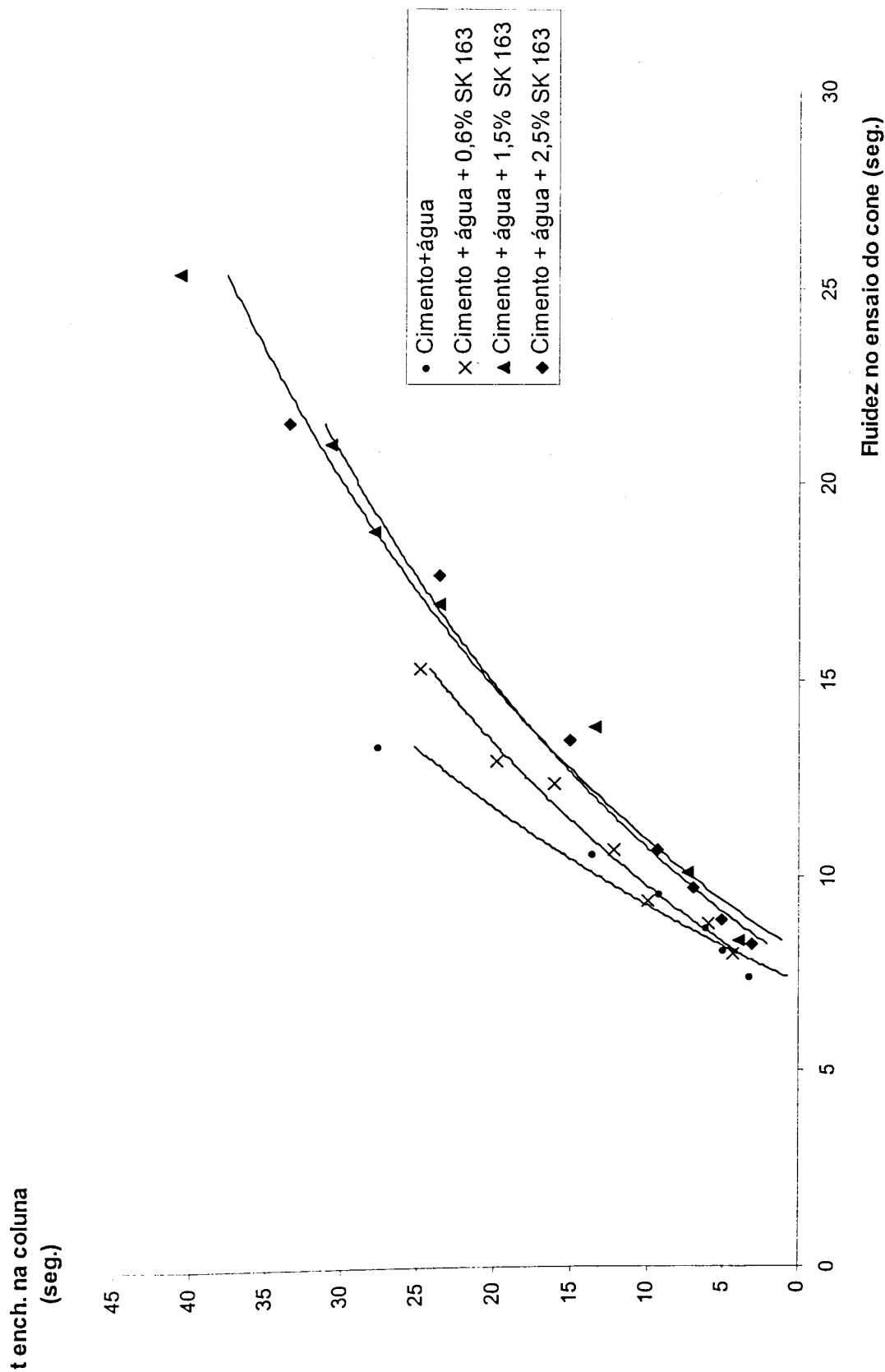


Gráfico 5.11 - Ensaios intermédios / coluna com esferas de aço $\phi = 4\text{mm}$; Tempo de enchimento da coluna / fluidez no ensaio do cone.

Caudal na coluna / Fluidiez no ensaio do cone

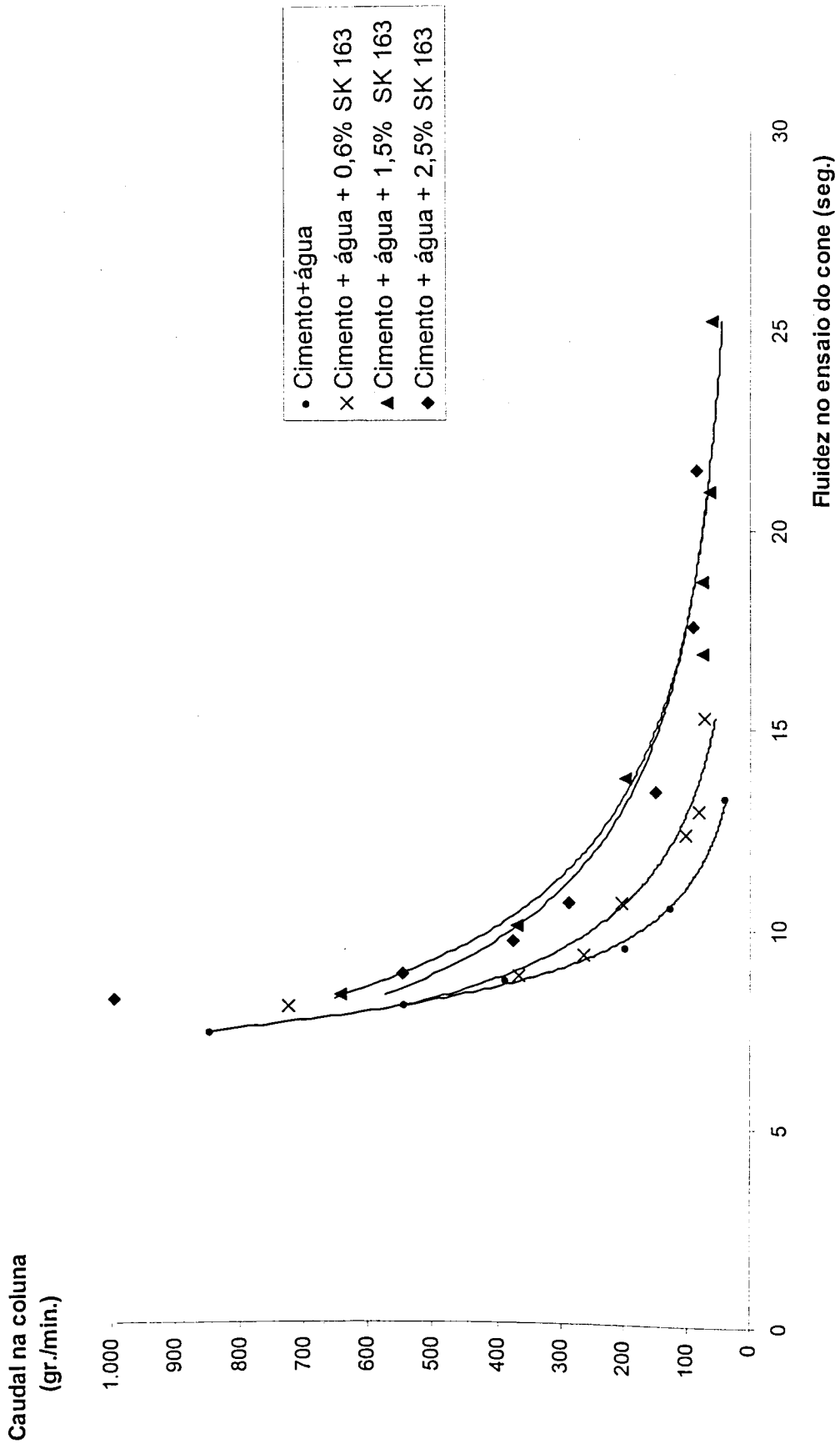


Gráfico 5.12 - Ensaio intermédios / coluna com esferas de aço $\phi = 4\text{mm}$; Caudal na coluna / fluidiez no ensaio do cone.

Tempos de enchimento da coluna / Fluidez no ensaio de imersão

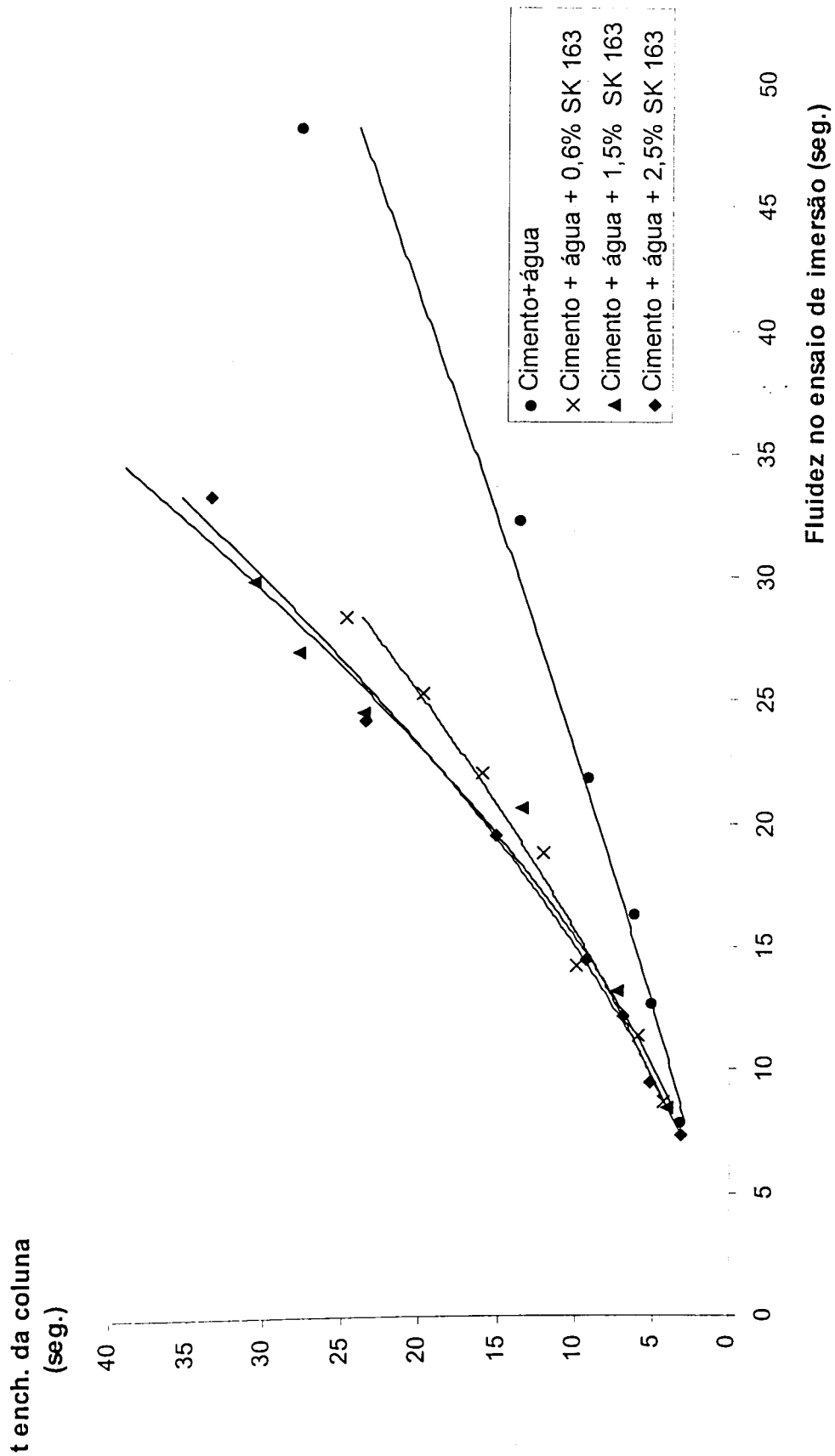


Gráfico 5.13 - Ensaio intermediários / coluna com esferas de aço $\phi = 4\text{mm}$; Tempos de enchimento da coluna / fluidez no ensaio de imersão.

Caudal na coluna / Fluidez no ensaio de imersão

Caudal na coluna
(gr./min.)

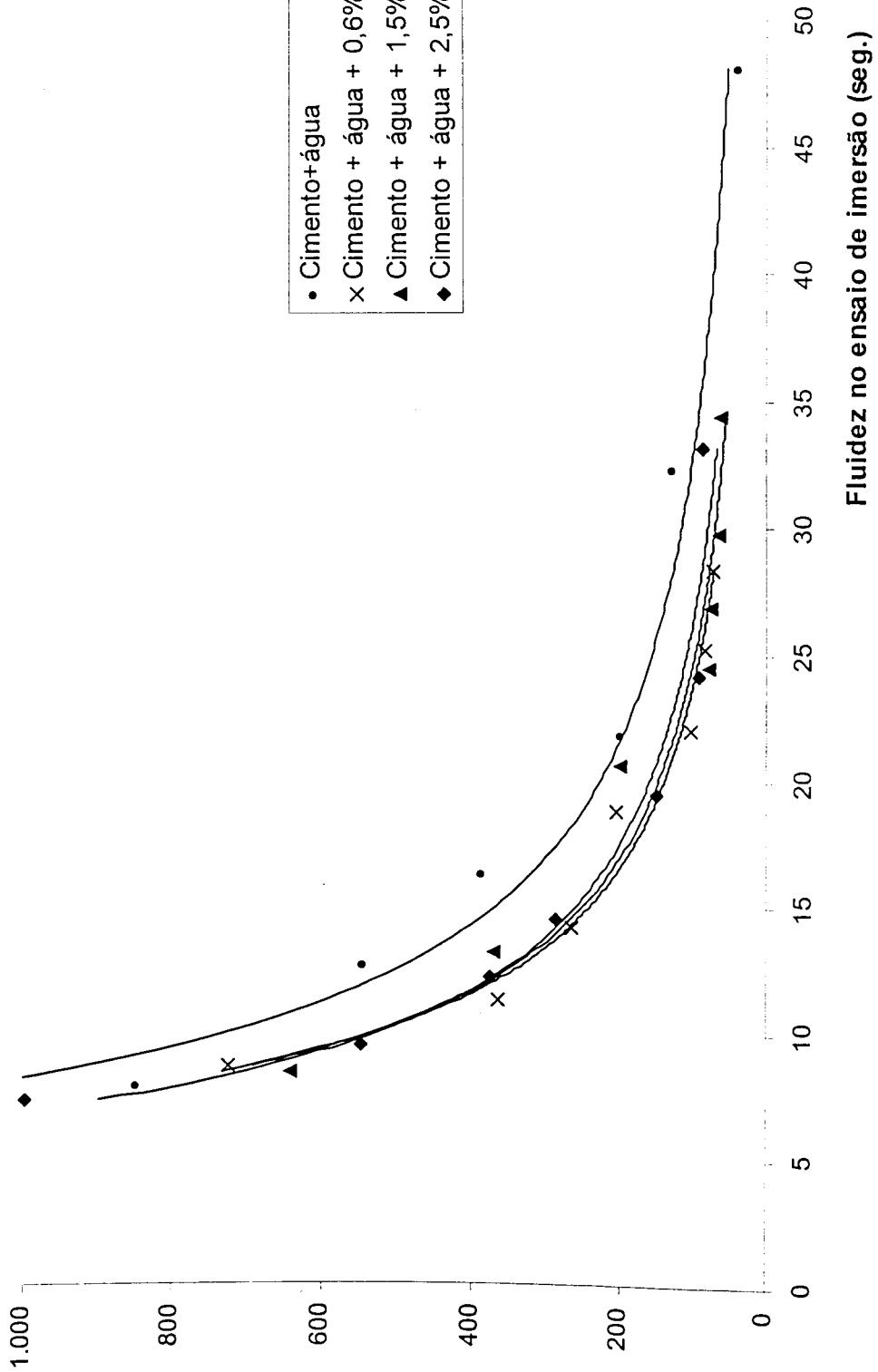


Gráfico 5.14 - Ensaios intermédios / coluna com esferas de aço $\phi = 4\text{mm}$; Caudal na coluna / fluidez no ensaio de imersão.

Exsudação / Razão A/C

Exsudação (%)

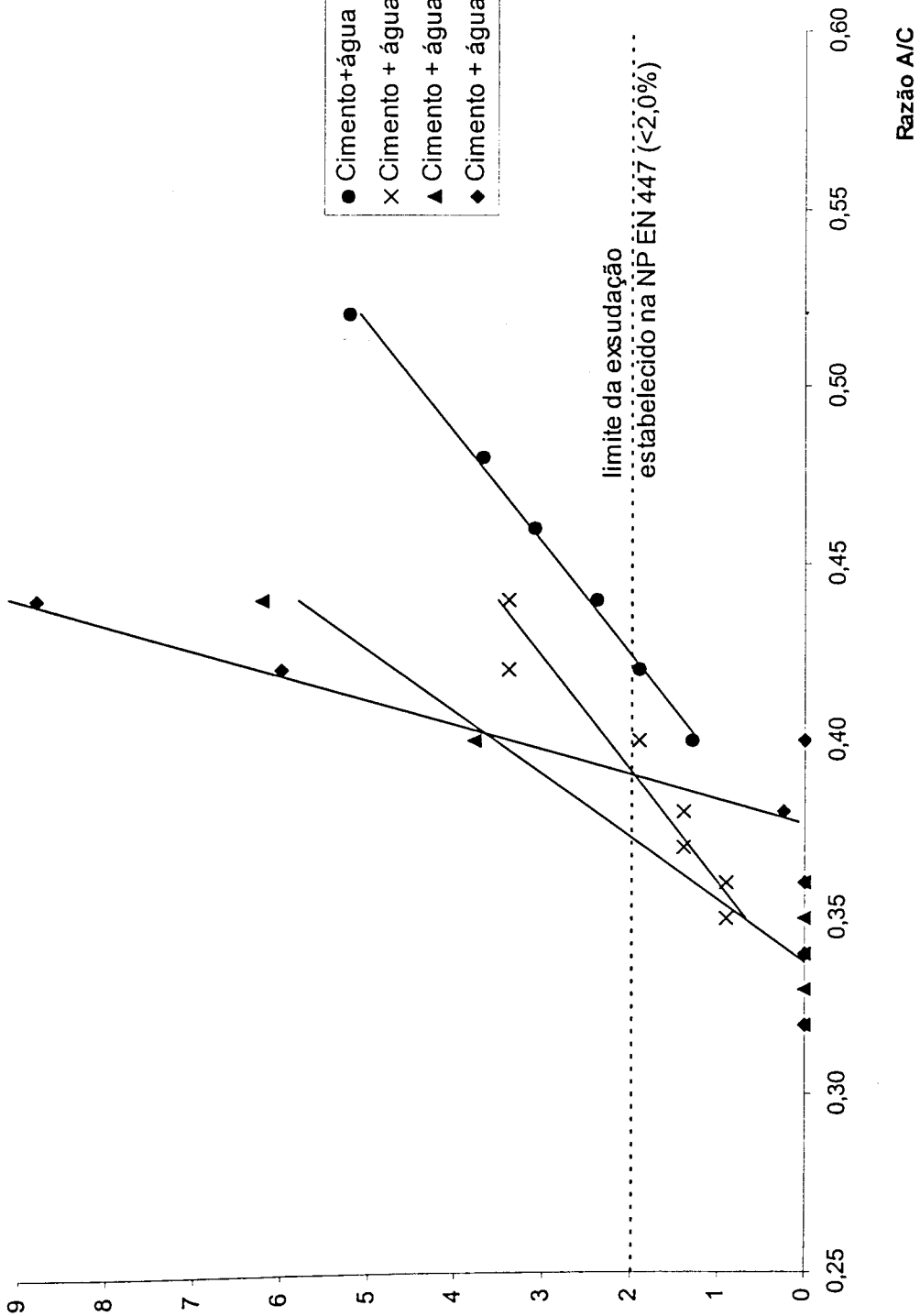


Gráfico 5.15 – Ensaios intermediários: relação entre a exsudação e a razão A/C.

Fluidez no ensaio de imersão / Razão A/C

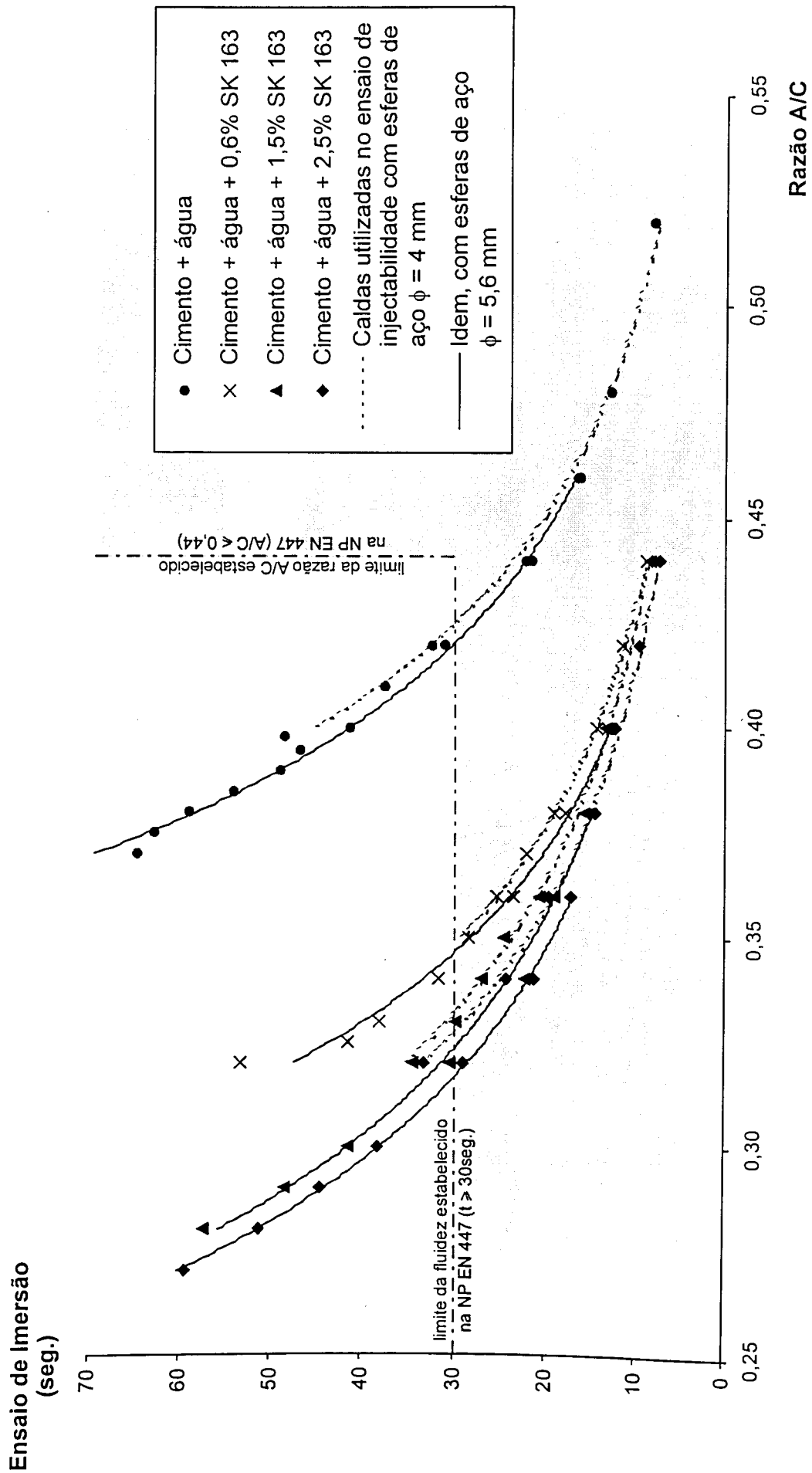


Gráfico 5.16 – Ensaios intermédios: relação entre a fluidez (ensaio de imersão) e a razão A/C.

Ensaio de imersão / Ensaio do cone

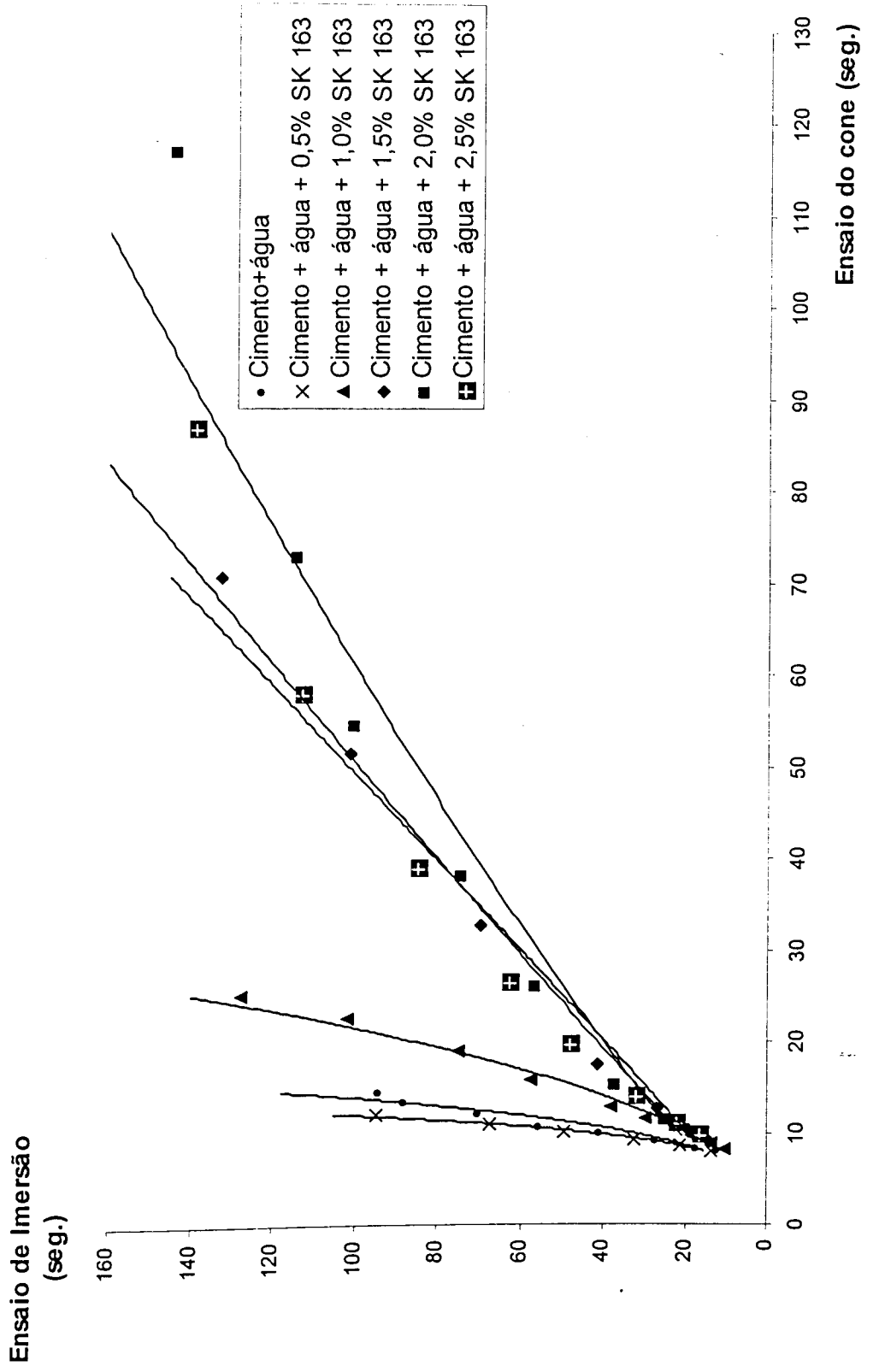


Gráfico 5.17 – Ensaio finais; Comparação entre dois ensaios de medição de fluidez das caldas.

Tempo de enchimento da coluna / Fluidez no ensaio do cone

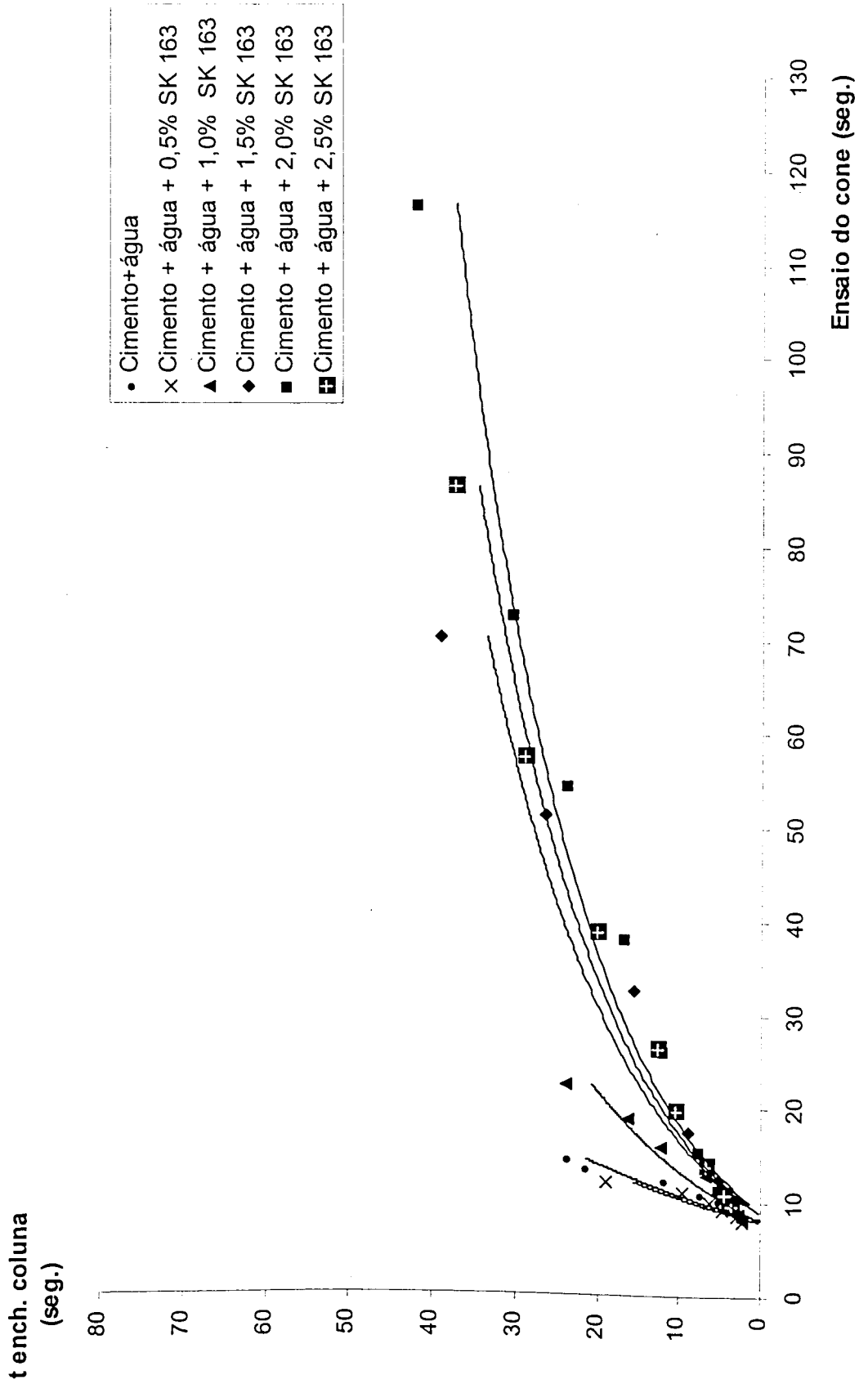


Gráfico 5.18 – Ensaio finais; Tempo de enchimento da coluna / Fluidez no ensaio do cone.

Caudal na coluna / Fluidéz no ensaio do cone

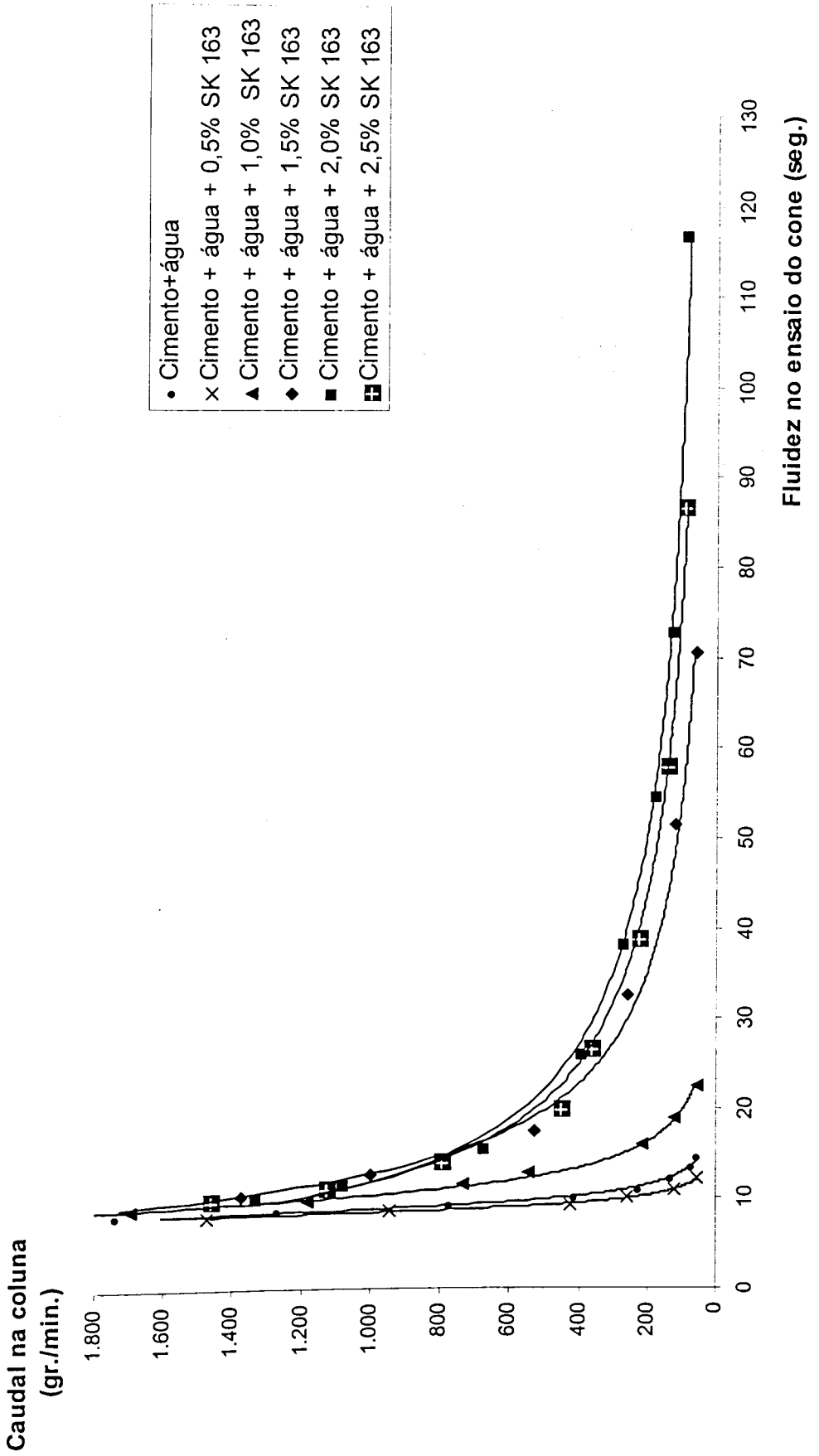


Gráfico 5.19 – Ensaio finais; Caudal na coluna / Fluidéz no ensaio do cone.

Tempo de enchimento da coluna / Fluidez no ensaio de imersão

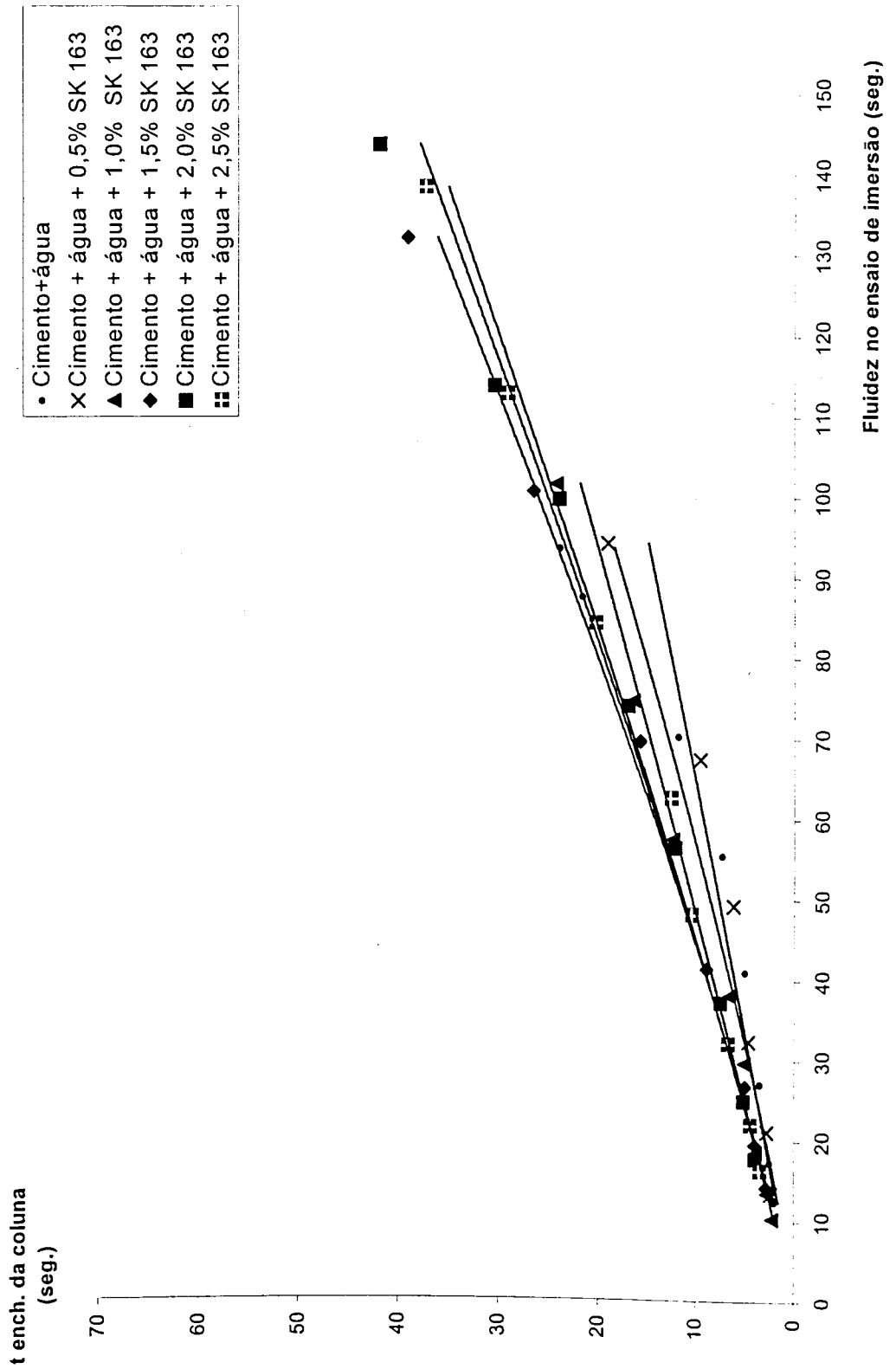


Gráfico 5.20 – Ensaios finais; Tempo de enchimento da coluna / Fluidez no ensaio de imersão.

Caudal na coluna / Fluidez no ensaio de imersão

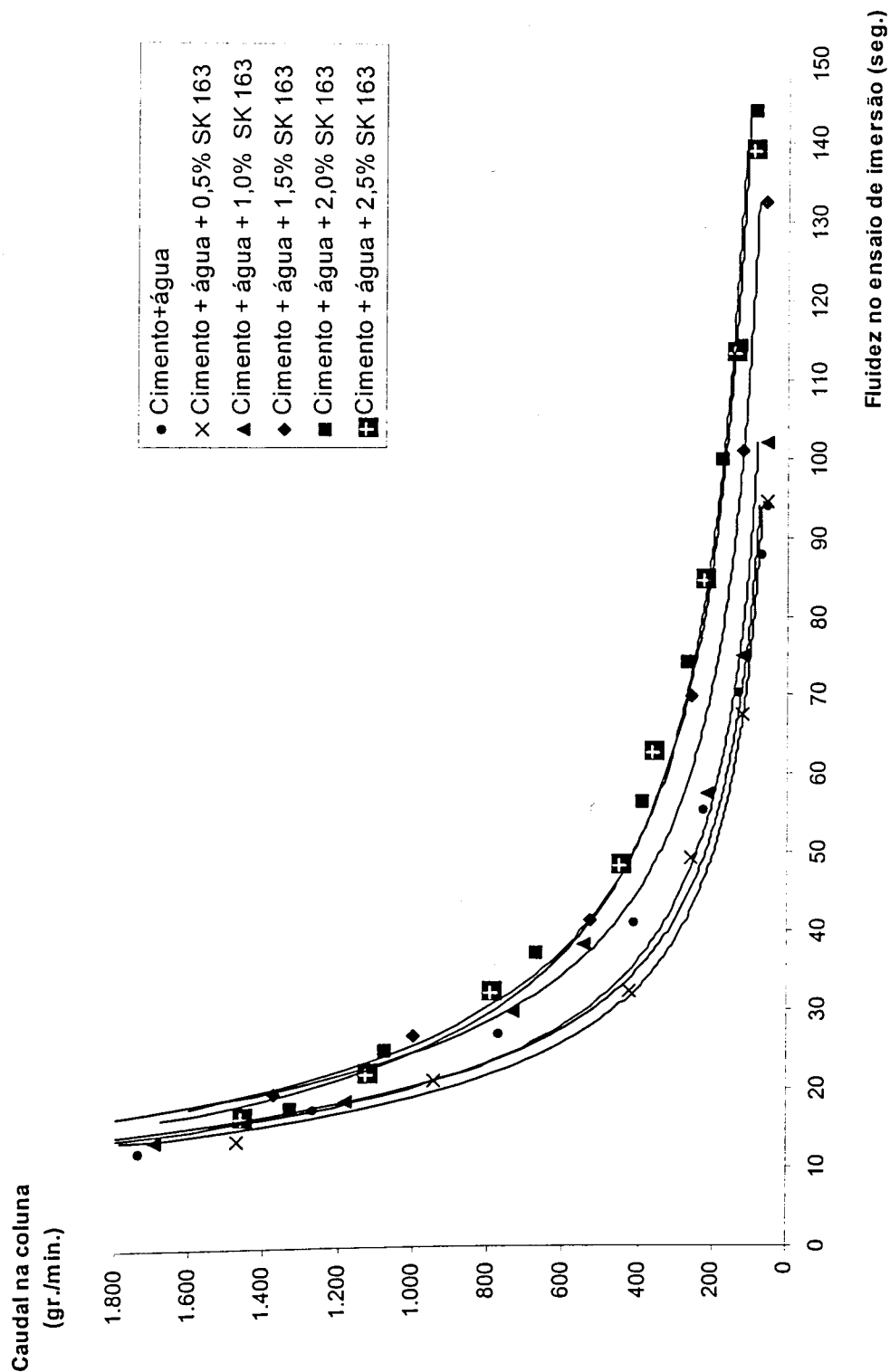


Gráfico 5.21 – Ensaios finais; Caudal na coluna / Fluidez no ensaio de imersão.

Exsudação / Razão A/C

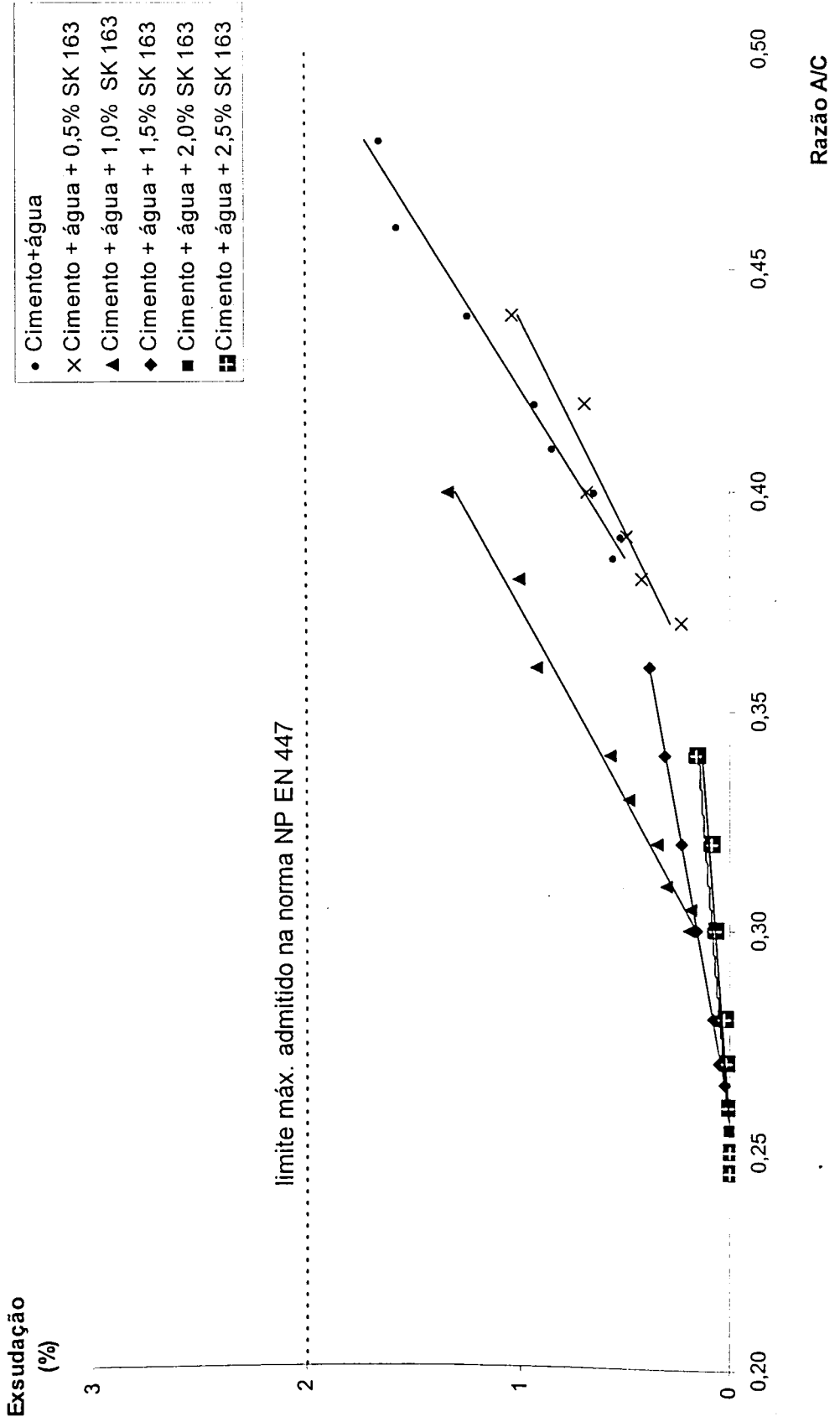


Gráfico 5.22 – Ensaios finais; Relação entre a exsudação e a razão A/C.

Resistência à Compressão / Razão A/C

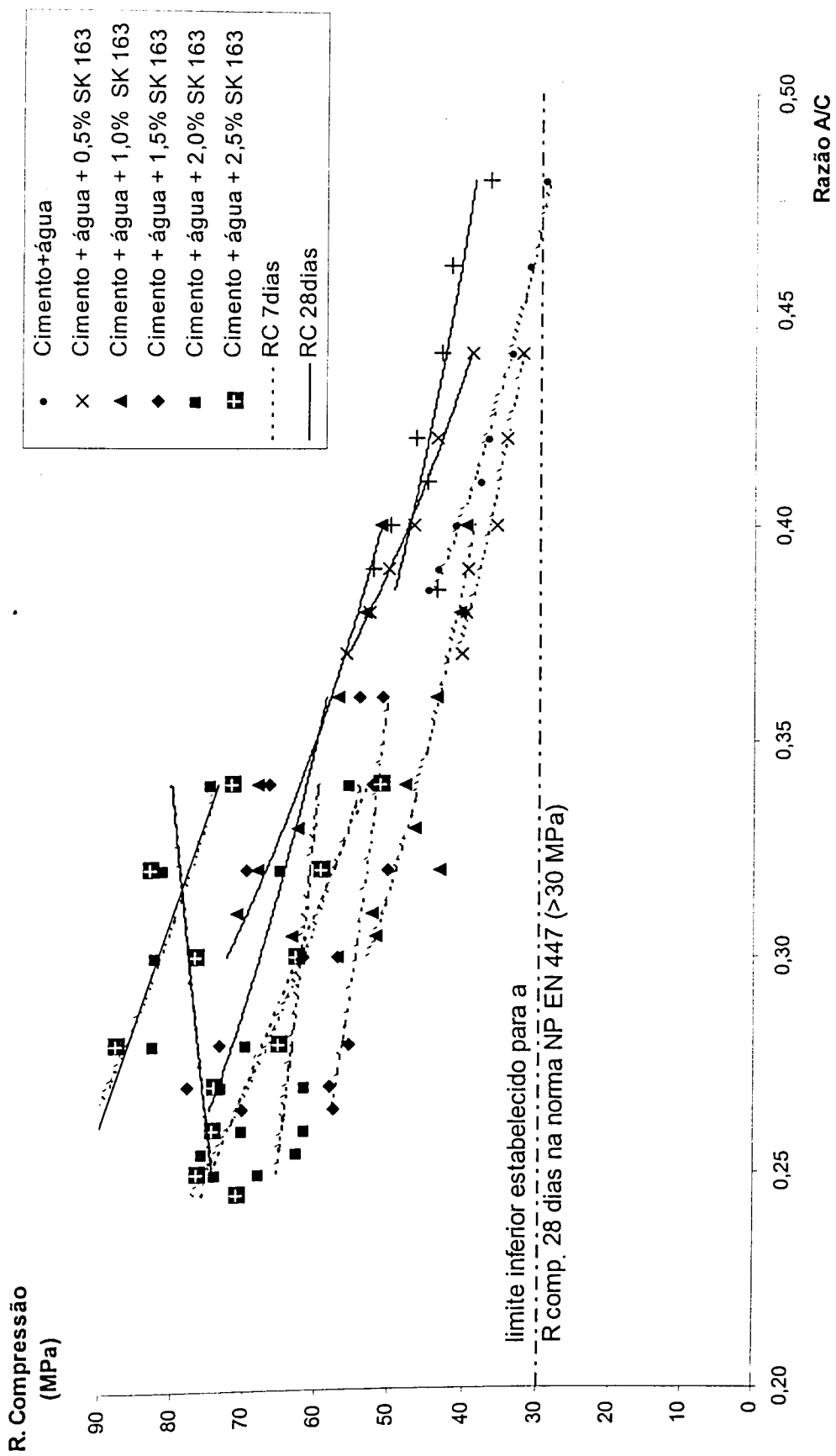


Gráfico 5.23 – Ensaio finais; Relação entre a resistência à compressão e a razão A/C.

Tempos de enchimento de coluna / Fluidex no ensaio do cone

Regressão Global

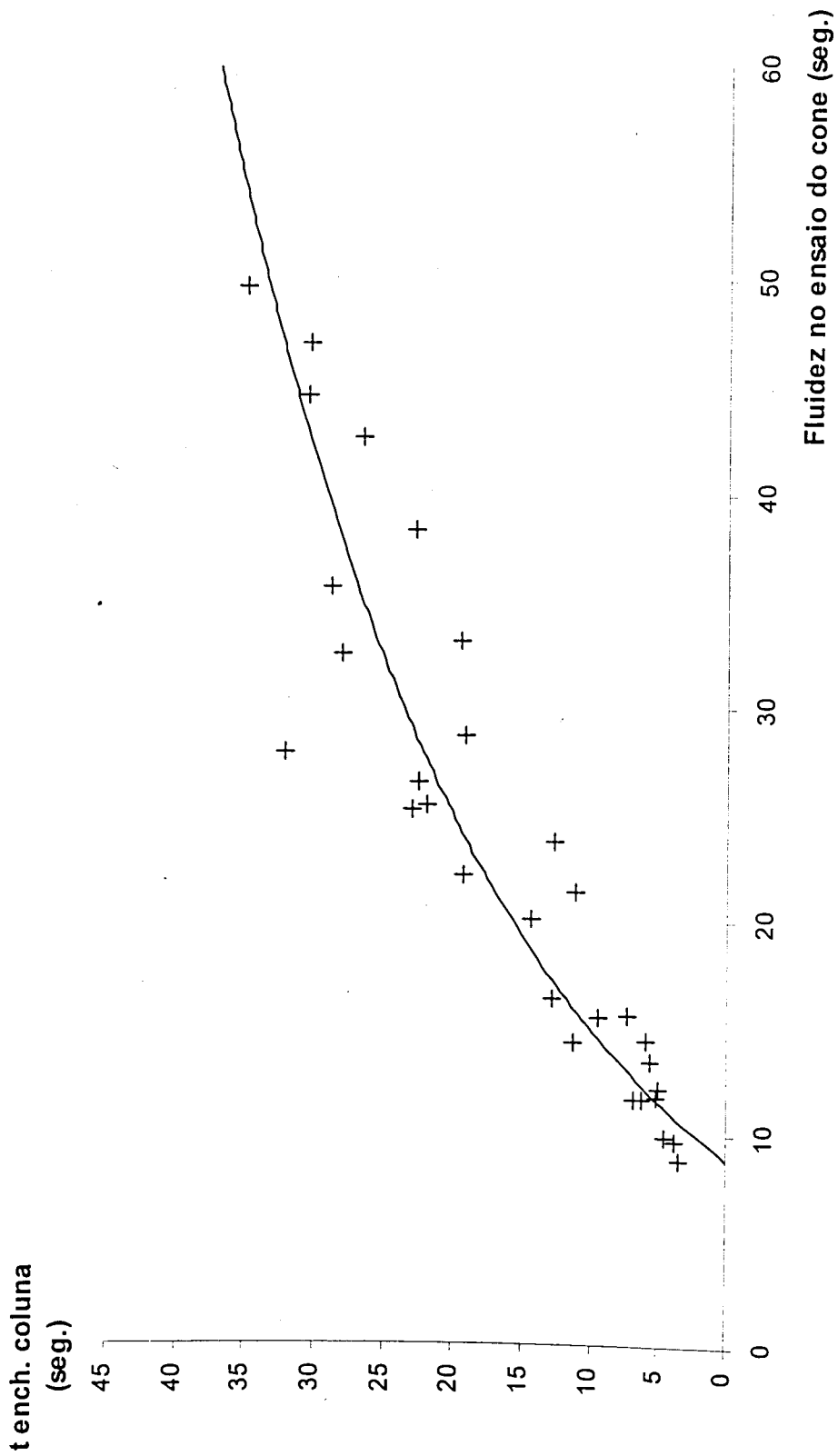


Gráfico 5.6 A - Ensaio intermediário / coluna com esferas de aço $\phi = 5,6\text{mm}$; tempos de enchimento da coluna / fluidez no ensaio do cone.
Curva de regressão global.

Caudal na coluna / Fluidez no ensaio do cone Regressão Global

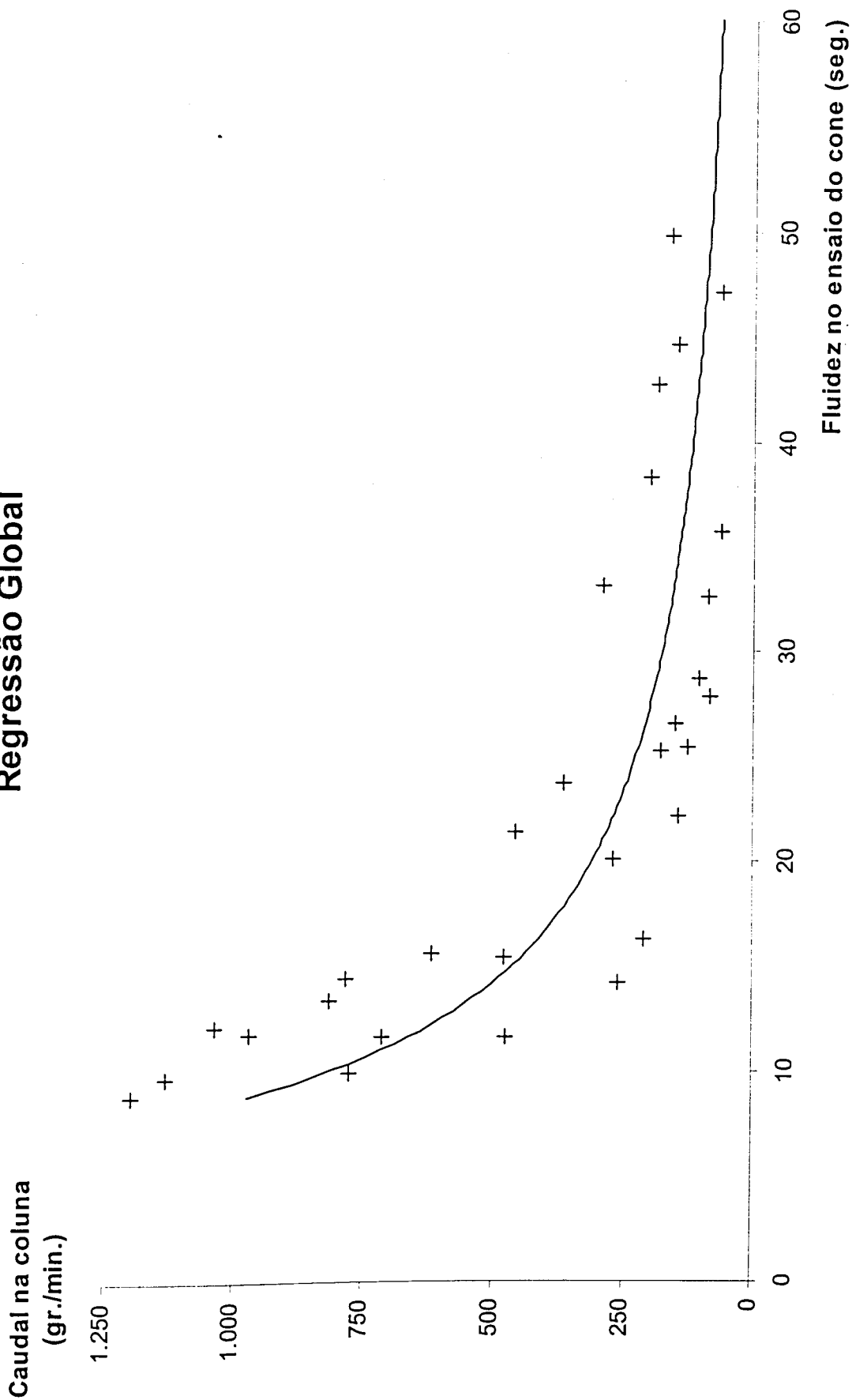


Gráfico 5.7 A - Ensaios intermediários / coluna com esferas de aço $\phi = 5,6\text{mm}$; caudal na coluna / fluidez no ensaio do cone. Curva de regressão global.

Tempo de enchimento da coluna / Fluidez no ensaio de imersão

Regressão Global

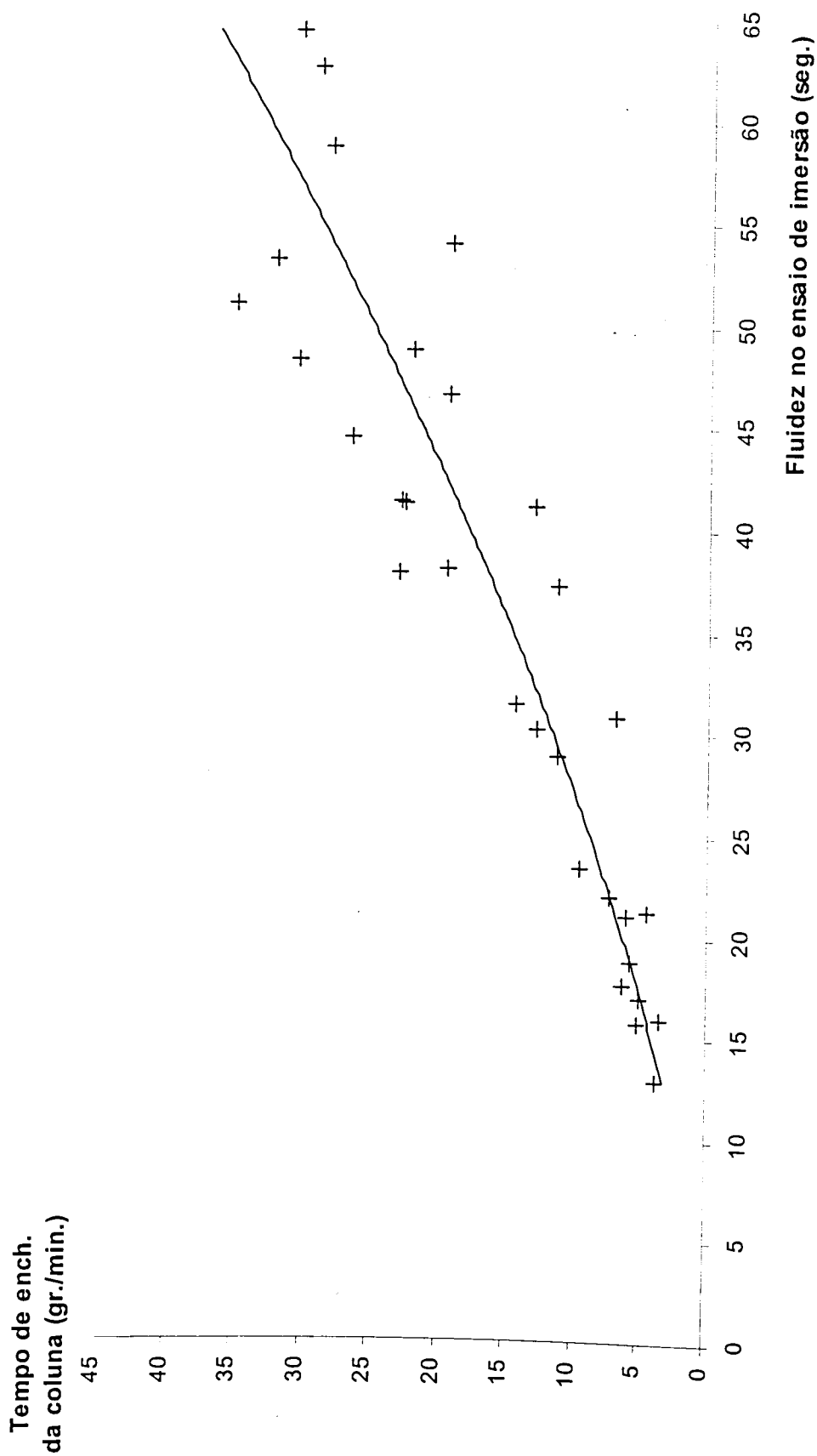


Gráfico 5.8 A - Ensaio intermediário / coluna com esferas de aço $\phi = 5,6\text{mm}$; Tempos de enchimento da coluna / fluidez no ensaio de imersão.
Curva de regressão global.

Caudal na coluna / Fluidez no ensaio de imersão

Regressão Global

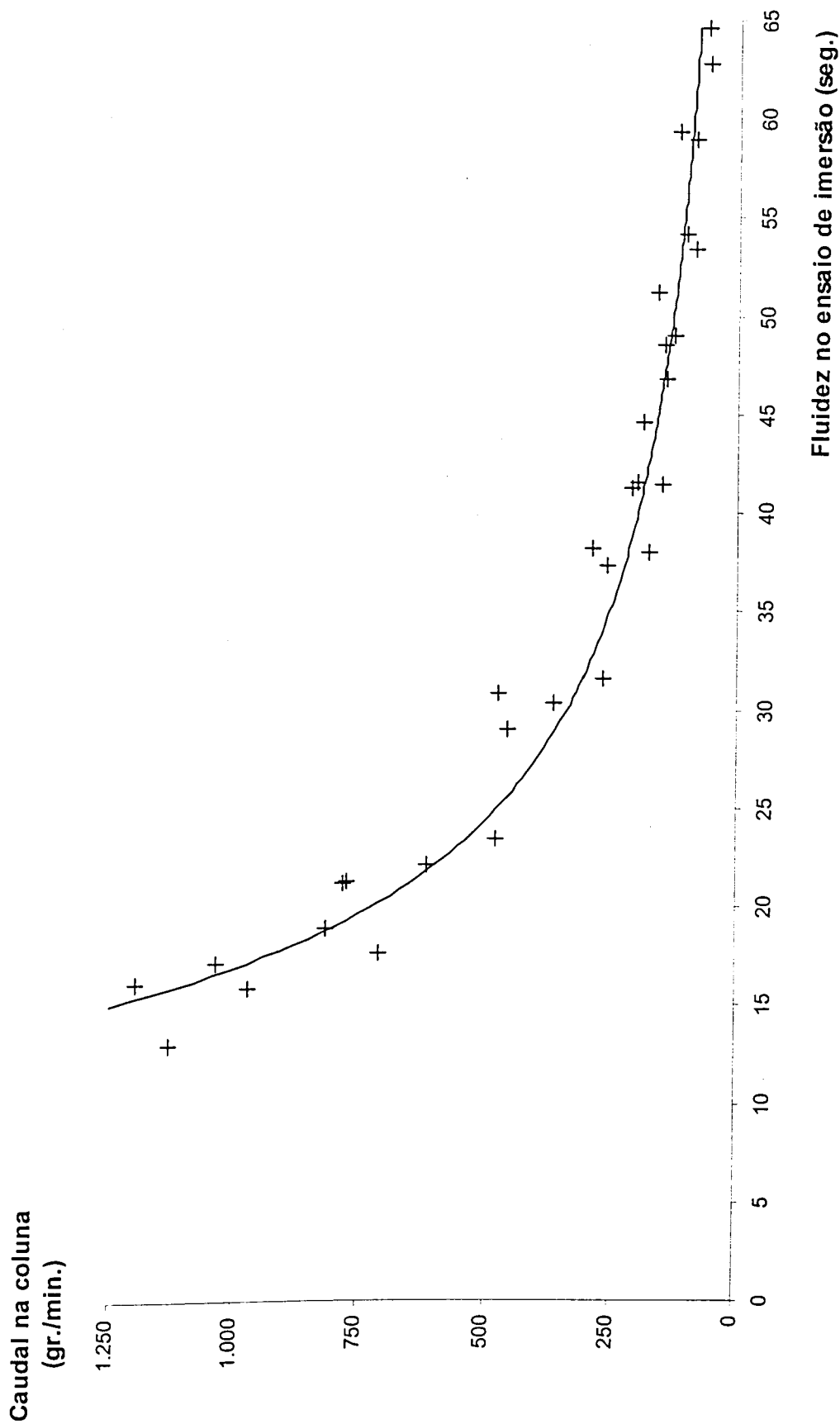


Gráfico 5.9 A - Ensaios intermédios / coluna com esferas de aço $\phi = 5,6\text{mm}$; Caudal na coluna / fluidez no ensaio de imersão. Curva de regressão global.

Tempos de enchimento da coluna / Fluidez no ensaio do cone

Regressão Global

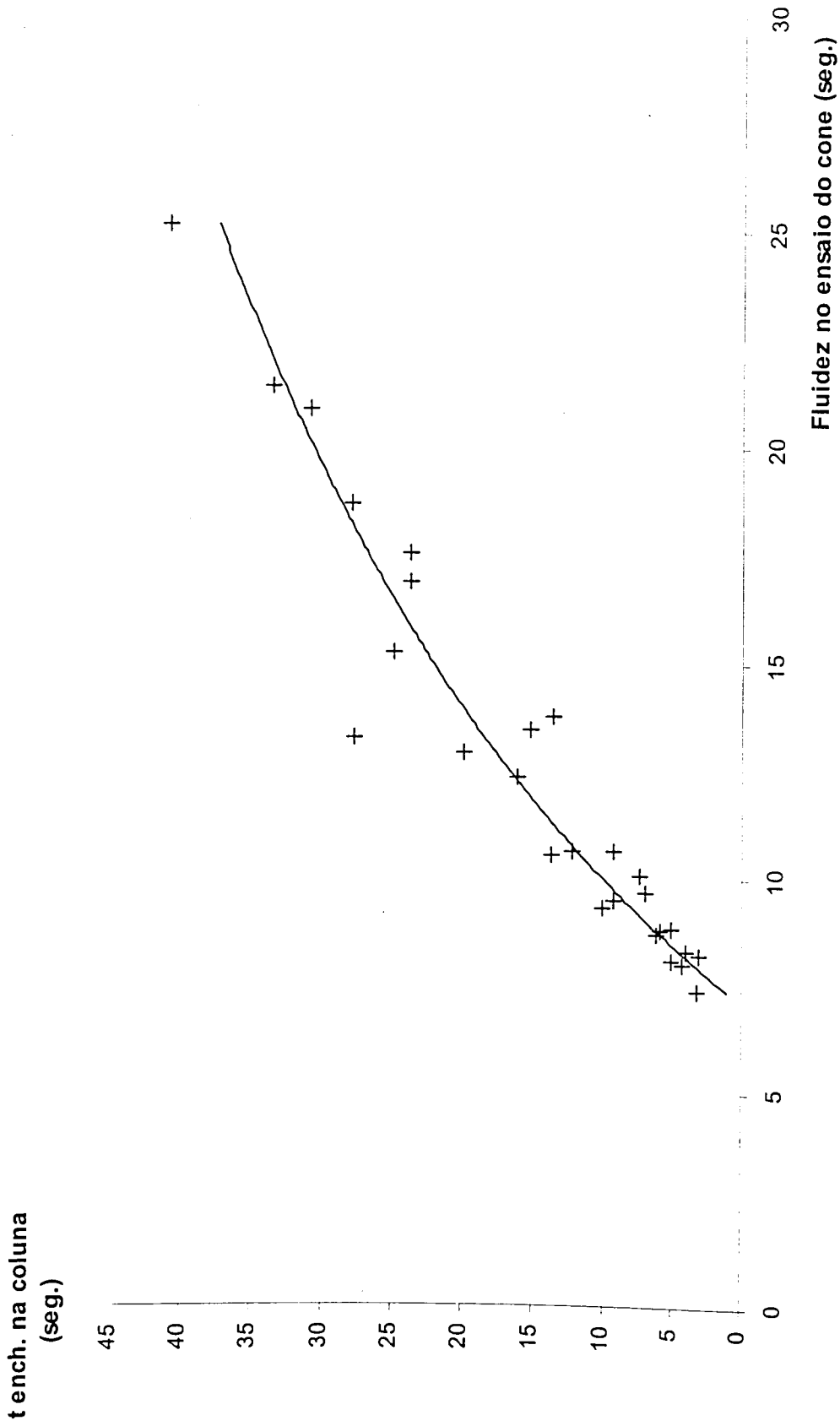


Gráfico 5.11 A - Ensaios intermédios / coluna com esferas de aço $\phi = 4\text{mm}$; Tempos de enchimento da coluna / fluidez no ensaio do cone.
Curva de regressão global.

Caudal na coluna / Fluidez no ensaio do cone Regressão Global

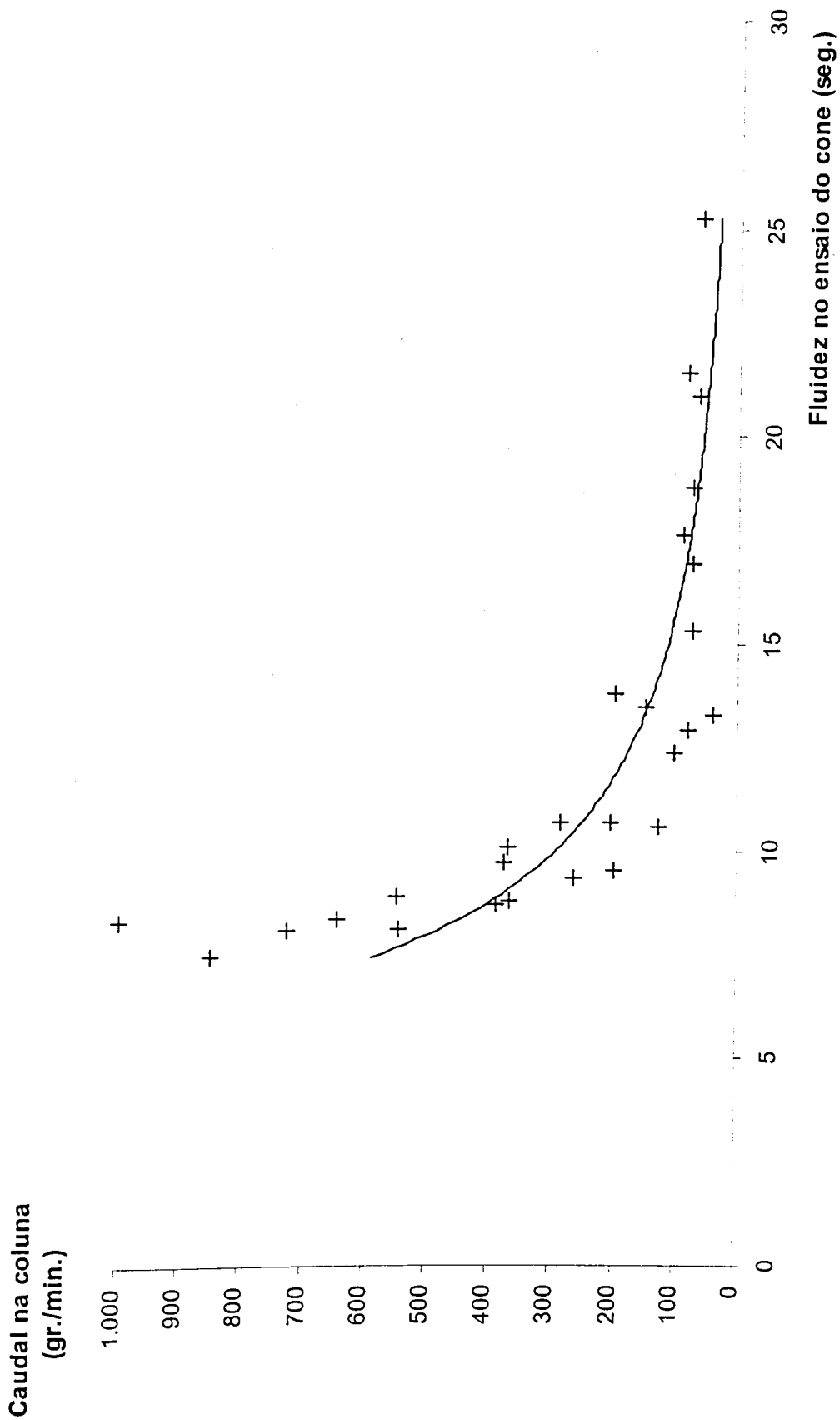


Gráfico 5.12 A - Ensaios intermédios / coluna com esferas de aço $\phi = 4\text{mm}$; Caudal na coluna / fluidez no ensaio do cone. Curva de regressão global.

Tempos de enchimento da coluna / Fluidez no ensaio de imersão

Regressão Global

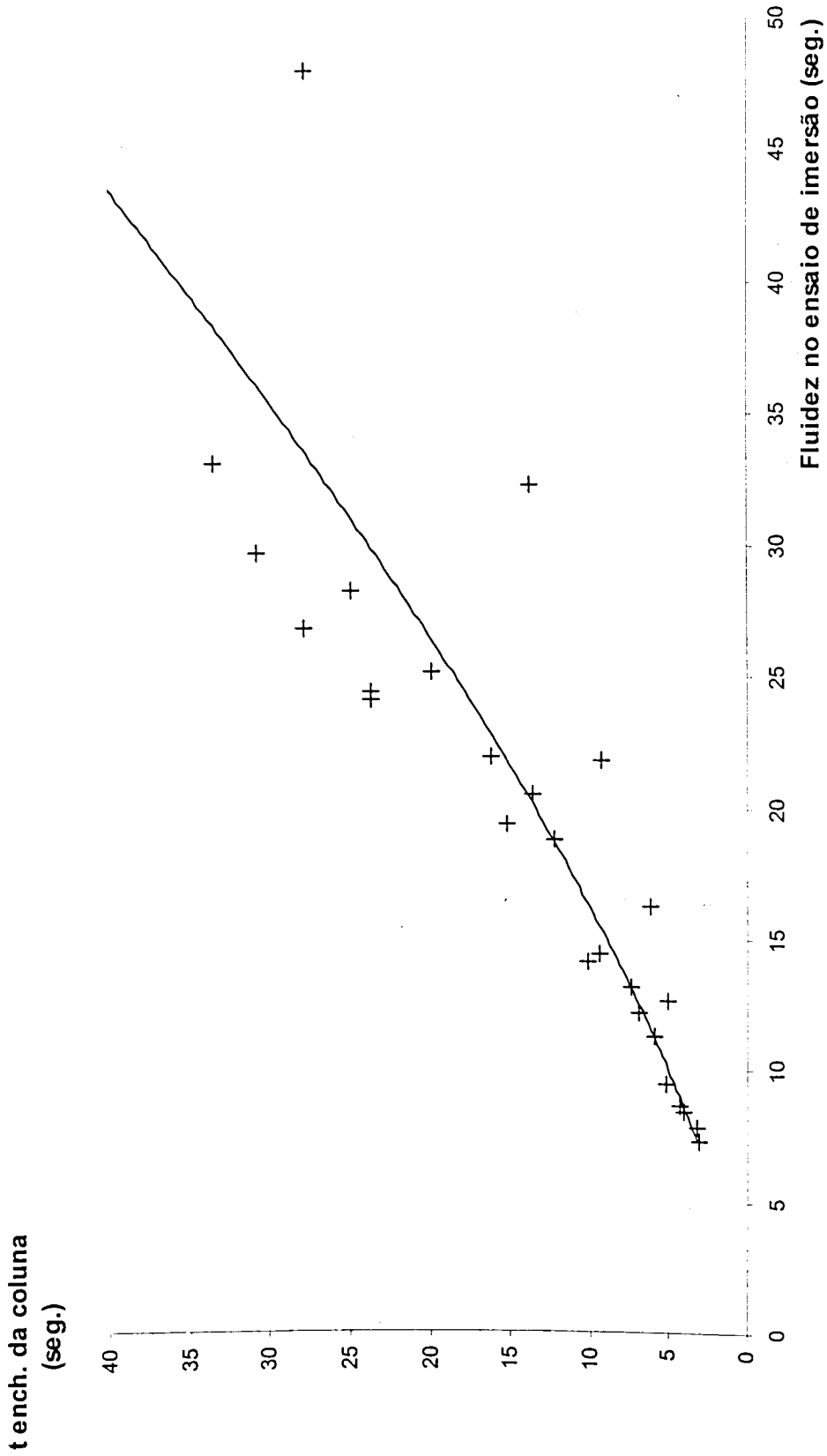


Gráfico 5.13 A - Ensaios intermédios / coluna com esferas de aço $\phi = 4\text{mm}$; Tempos de enchimento da coluna / fluidez no ensaio de imersão.
Curva de regressão global.

Caudal na coluna / Fluidez no ensaio de imersão

Regressão Global

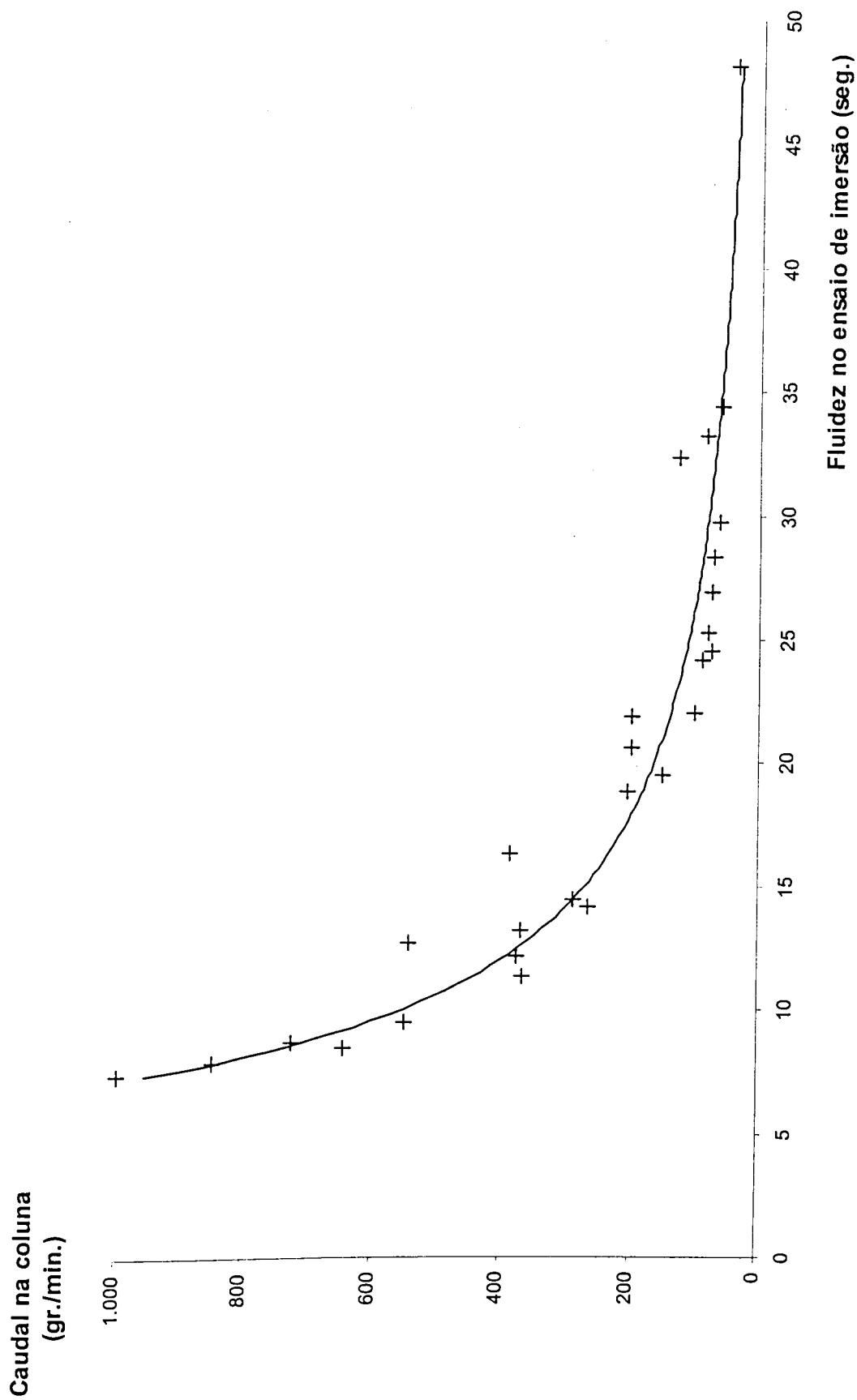


Gráfico 5.14 A - Ensaio intermediários / coluna com esferas de aço $\phi = 4\text{mm}$; Caudal na coluna / fluidez no ensaio de imersão. Curva de regressão global.

Tempo de enchimento da coluna / Fluides no ensaio do cone Regressão Global

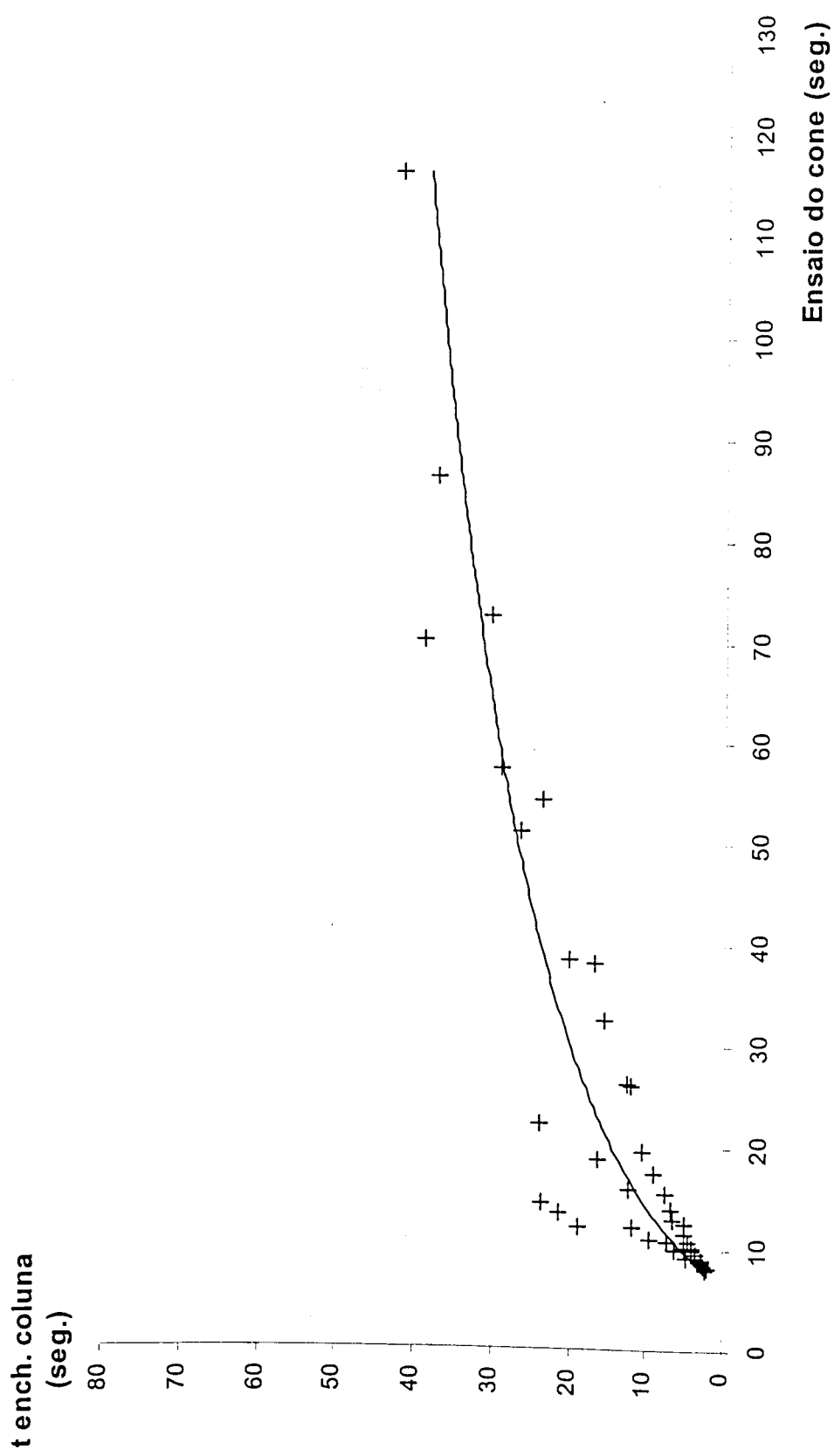
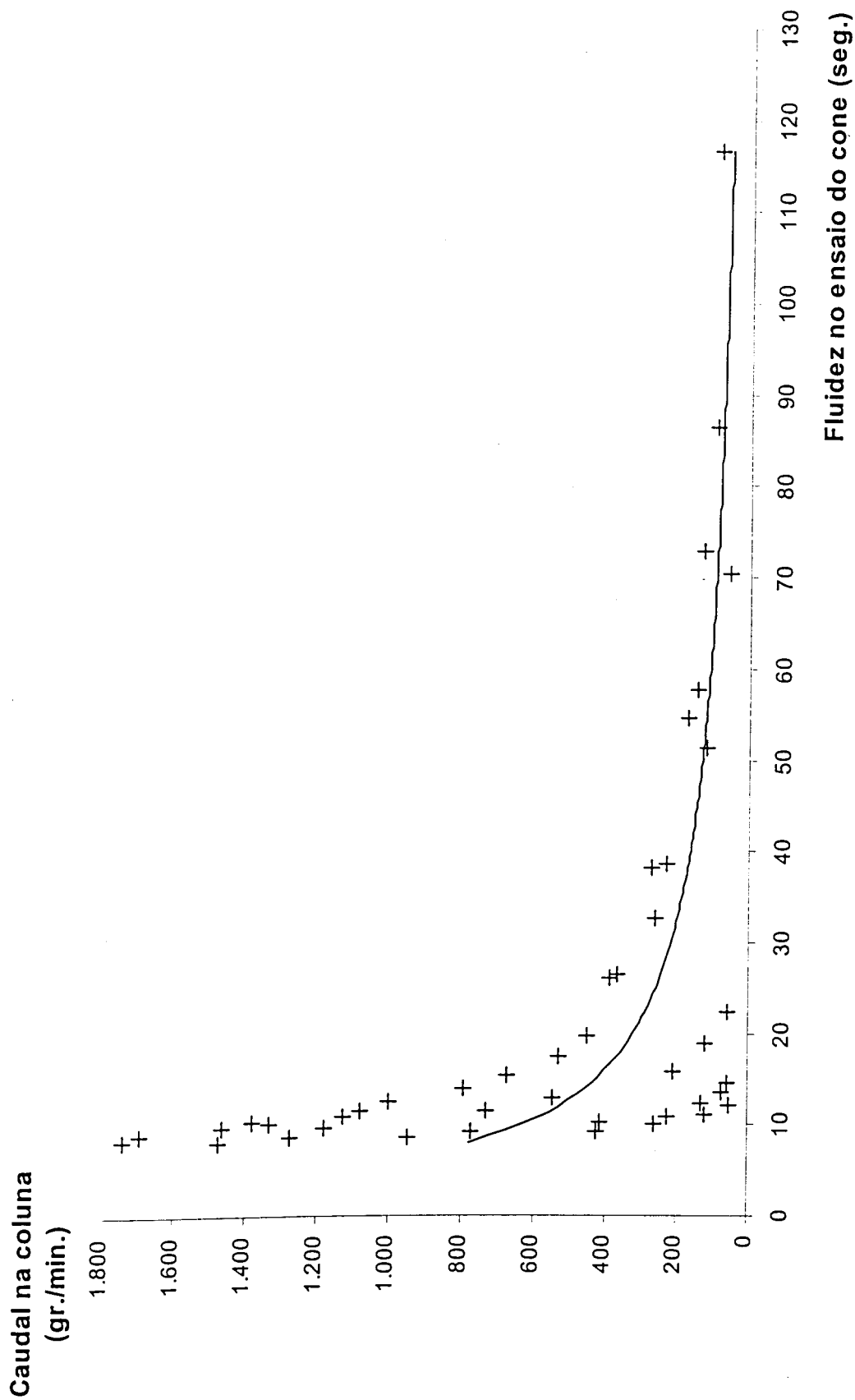


Gráfico 5.18 A – Ensaio finais; Tempo de enchimento da coluna / Fluides no ensaio do cone. Curva de regressão global.

Caudal na coluna / Fluidez no ensaio do cone Regressão Global



Tempo de enchimento da coluna / Fluidez no ensaio de imersão

Regressão Global

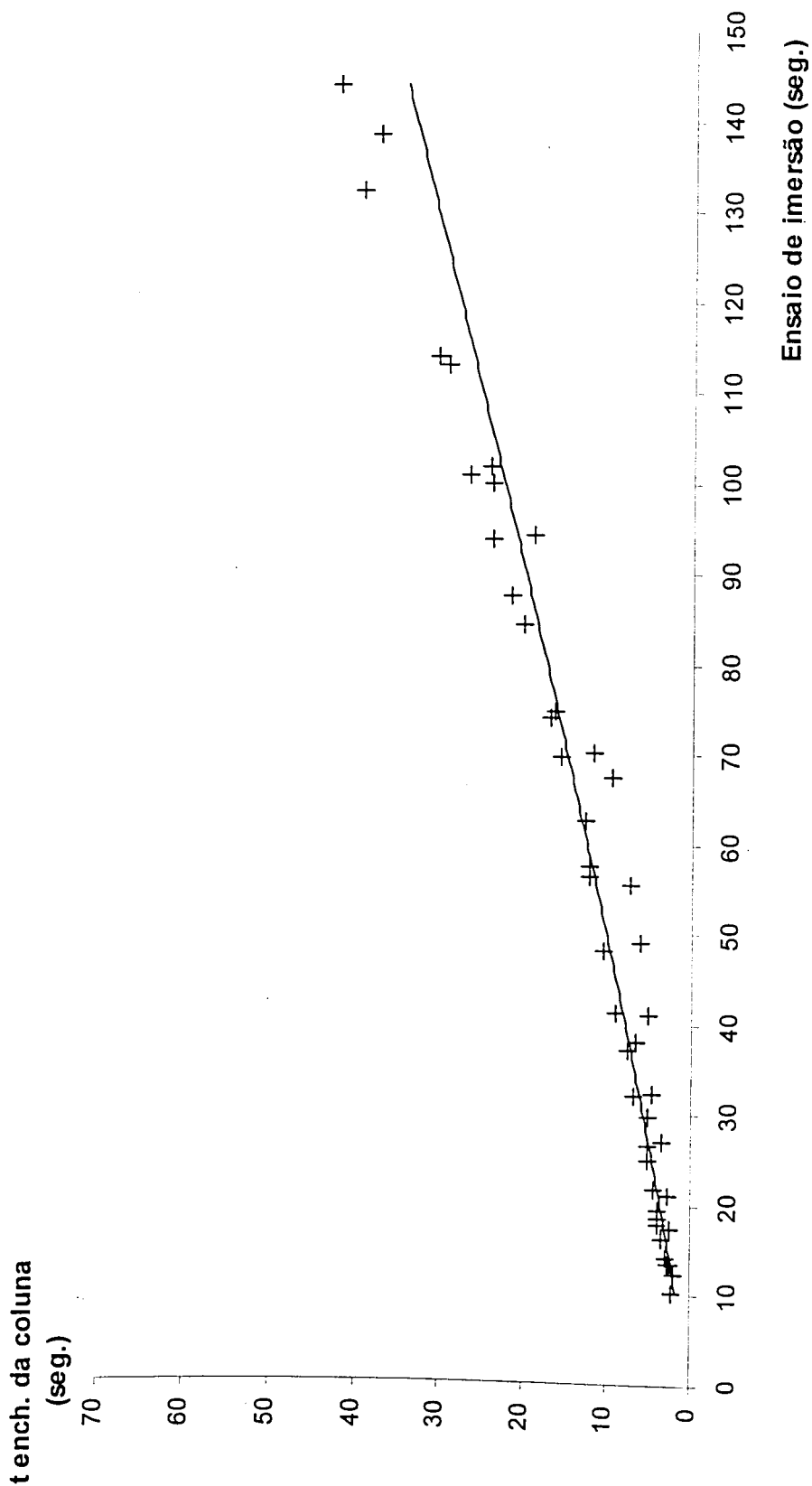


Gráfico 5.20 A - Ensaio de imersão; Tempos de enchimento da coluna / Fluidez no ensaio de imersão. Curva de regressão global.

Caudal na coluna / Fluidez no ensaio de imersão

Regressão Global

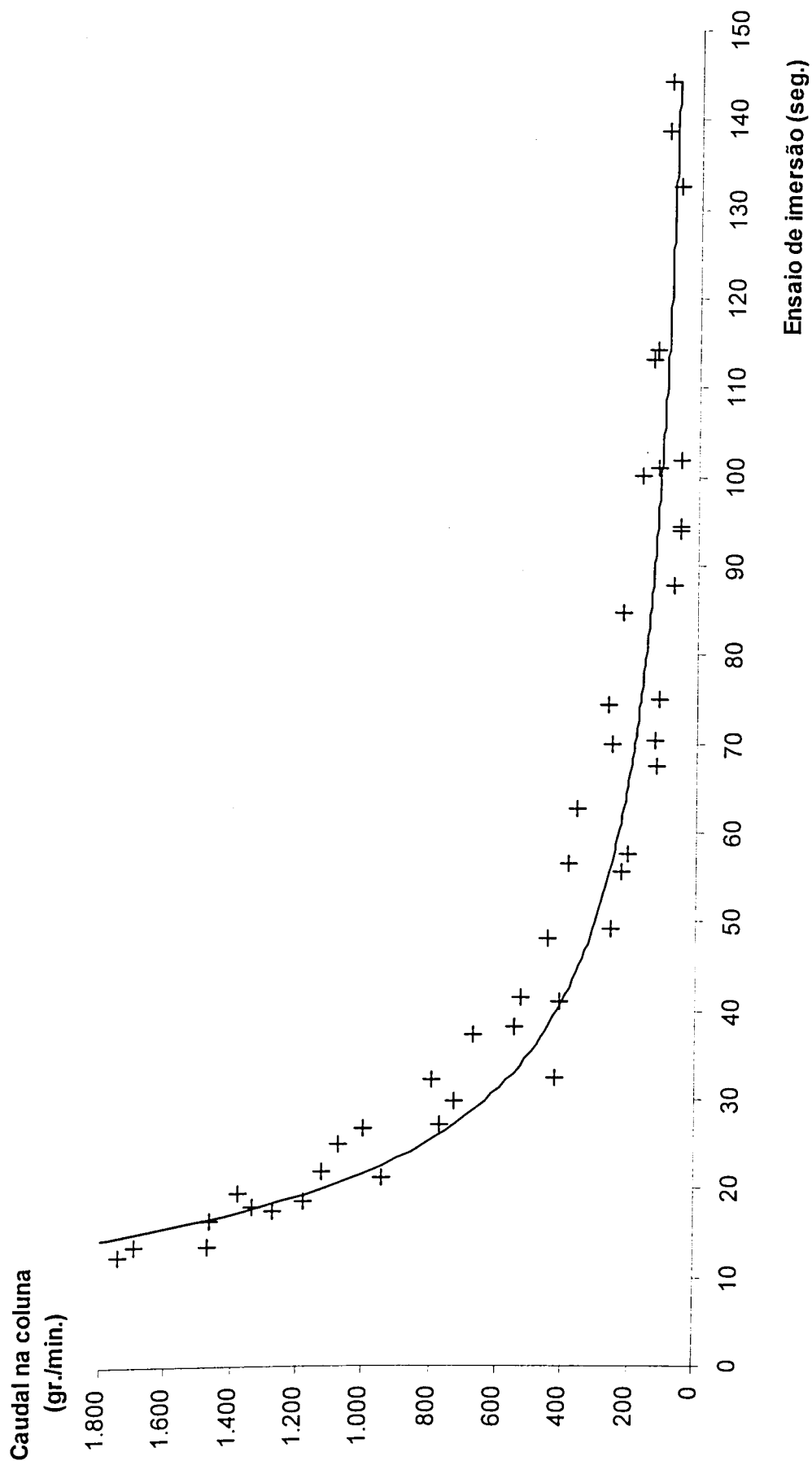


Gráfico 5.21 A - Ensaio finais; Caudal na coluna / Fluidez no ensaio de imersão. Curva de regressão global.

Resistência à Compressão / Razão A/C

Regressão Global

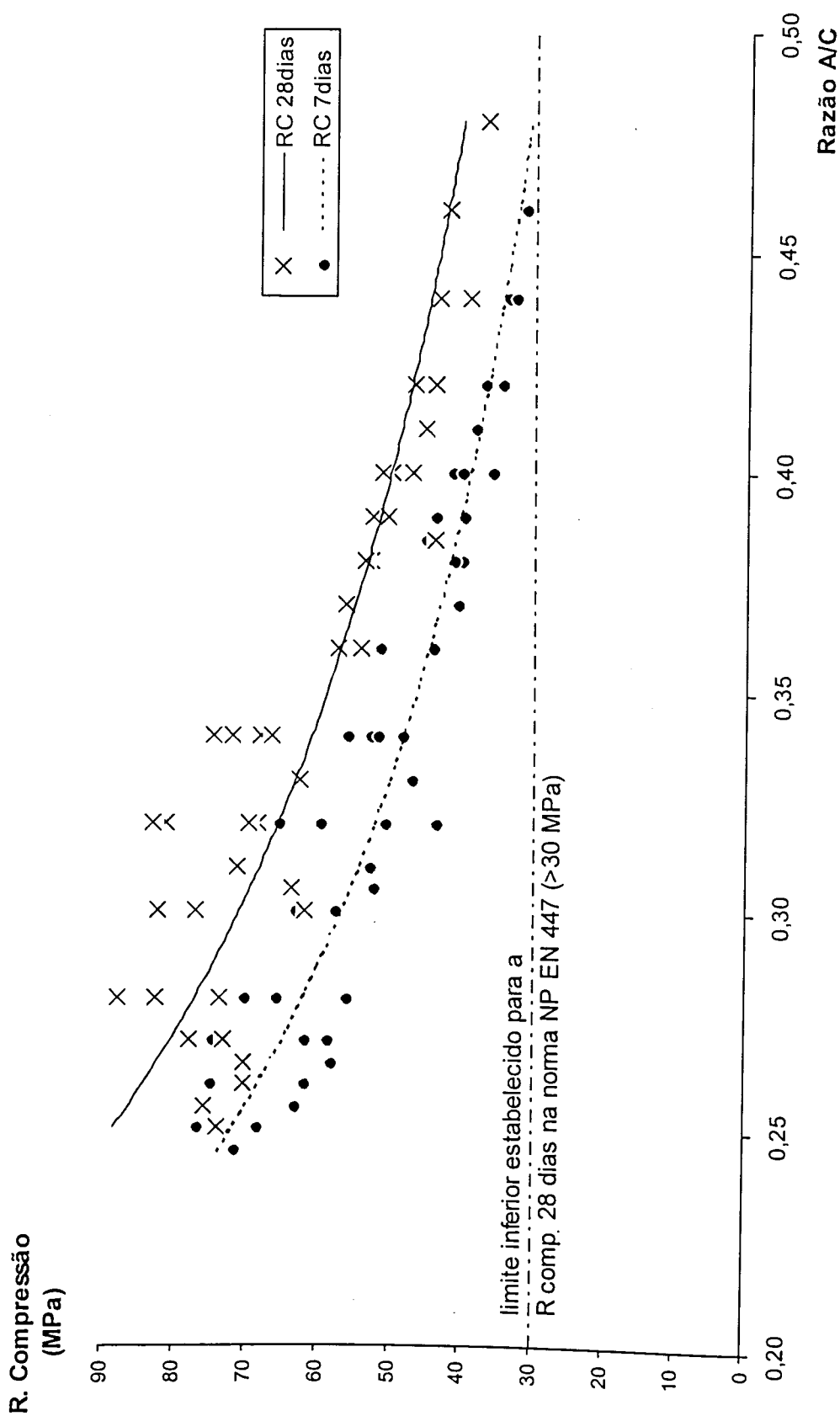


Gráfico 5.23 A – Ensaios finais; Relação entre a resistência à compressão e a razão A/C. Curvas de regressão global aos 7 e 28 dias.

Capítulo 6

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DAS CALDAS DE INJECCÃO

6.1 – INTRODUÇÃO

A caracterização reológica das caldas de injeccão que se realiza no presente capítulo tem por objectivo tornar possível a obtenção de uma interpretação dos resultados verificados nos capítulos precedentes (Cap. 4 e 5), à luz da reologia das caldas.

A determinação das características reológicas das caldas é efectuada com o auxílio de viscosímetros. No Capítulo 1 foram analisados viscosímetros de dois tipos: de tubos capilares e de cilindros coaxiais. Nos viscosímetros de tubos capilares determinam-se as características reológicas das caldas a partir da medição de caudais escoados para diferentes pressões actuantes. Nos viscosímetros de cilindros coaxiais essa determinação é feita a partir da medição de momentos torsores que são necessários para diferentes velocidades de rotação do cilindro móvel. Ir-se-á usar neste capítulo um viscosímetro da marca comercial “Brookfield”, que é uma variante deste último tipo de viscosímetros.

Uma vez que nos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto não existiam, à data da realização dos ensaios, viscosímetros com estas características, e no Departamento de Engenharia Química os viscosímetros existentes não são apropriados para caldas de cimento, mas apenas para suspensões mais finas (material sólido mais fino), os ensaios em causa tiveram que ser realizados fora da FEUP.

Dos locais possíveis, foi contactado o LNEC que na ocasião pretendida não tinha funcional o seu viscosímetro Brookfield com haste cilíndrica, mas apenas viscosímetros, também Brookfield, mas com hastes mais simples (de disco). Como o Instituto Geológico e Mineiro (Ministério da Economia – Secretaria de Estado da Indústria e

Energia), no seu polo da Amieira, em S. Mamede de Infesta dispõe também de viscosímetro Brookfield com hastes simples, optou-se pela realização dos ensaios neste laboratório, em virtude da sua proximidade à FEUP, obtida a autorização e colaboração da sua Direcção.

Antes da realização destes ensaios, foram efectuados ensaios preliminares na FEUP para se escolheram as composições das caldas a ensaiar. Seguidamente passa-se a expôr sequencialmente os diferentes ensaios realizados.

6.2 – COMPOSIÇÕES-TIPO A UTILIZAR

Como no presente capítulo se pretende interpretar os resultados obtidos no Capítulo anterior, ir-se-á cingir o estudo a dois tipos de caldas que no capítulo anterior tinham comportamentos nitidamente distintos. Assim, das composições-tipo utilizadas nos ensaios finais do capítulo anterior escolheram-se as seguintes:

- a) Composição-tipo 1: Cimento + água;
- b) Composição-tipo 2: Cimento + água + 2,0% adjuv. SK 163.

Destas duas composições-tipo ir-se-ão analisar várias composições, quer quanto à sua fluidez, medida no ensaio do cone e no ensaio de imersão, quer quanto às suas características reológicas, medidas no viscosímetro Brookfield.

6.3 – ESCOLHA DAS COMPOSIÇÕES A ESTUDAR “REOLÓGICAMENTE”

Com cada uma das duas composições-tipo anteriormente seleccionadas irão ser feitas várias amassaduras com diferentes valores da razão A/C e medida a correspondente fluidez pelos dois métodos em análise (ensaio do cone e de imersão), para se escolherem as composições a estudar “reologicamente”.

No capítulo anterior foram estudadas caldas cuja amassadura era feita no LEM-FEUP com uma vareta de agitação acoplada a um berbequim “Black & Decker”, ref P16-12, que, conforme indicado em 5.2.2 tinha duas velocidades de rotação: 560 rot/min e 1400 rot/min. A velocidade mais baixa era utilizada para misturar o adjuvante (quando utilizado) com a água e a velocidade mais elevada após a adição do cimento.

Uma vez que, entretanto, este berbequim ficou fora de serviço e actualmente já não é comercializado, procurou-se encontrar no mercado um outro berbequim com características semelhantes. Escolheu-se um berbequim da marca "BOSH", ref^a PBH 200 RE, também com duas velocidades, que se irão utilizar em idênticas funções: 450 rot/min e 1100 rot/min..

Como materiais utilizados na confecção das caldas usou-se água da rede pública de abastecimento e cimento facultado pela Secil, do tipo I, classe de resistência 42,5 R, proveniente de uma mesma moagem, uma vez que actualmente não é fabricado (Secil e Cimpor) o cimento I-32,5 utilizado no capítulo anterior e também porque o cimento I-42.5 R é o cimento actualmente usado em geral para realizar em obra as injeções nas bainhas de pré-esforço. Como adjuvante, quando utilizado, usou-se o mesmo que no capítulo anterior, facultado pela SIKA: SIKAMENT 163, que se referirá também pela abreviatura SK163.

A amassadura das caldas realizou-se nas mesmas condições que no capítulo anterior, descritas em 5.2.2.

Assim, para cada composição-tipo foram realizadas 5 amassaduras com diferentes valores da razão A/C, procurando-se cobrir a gama de valores de fluidez habitual, tendo-se obtido os resultados indicados nos Quadros 6.1 e 6.2.

Quadro 6.1 - Composição-tipo 1: cimento + água

Razão A/C	Fluidez	
	Ensaio do cone (seg)	Ensaio de imersão (seg)
0,50	8,6	16,0
0,48	9,0	22,1
0,46	10,5	36,0
0,44	11,8	55,4
0,42	14,8	85,5

Quadro 6.2 - Composição-tipo 2: cimento + água + 2,0% SK163

Razão A/C	Fluidez	
	Ensaio do cone (seg)	Ensaio de imersão (seg)
0,38	9,4	16,7
0,34	13,2	31,8
0,30	28,1	76,0
0,29	33,0	91,9
0,28	73,5	163,7

Com base nos resultados obtidos foram elaborados os Gráficos 6.1 e 6.2 onde se relaciona a razão A/C com a fluidez medida no ensaio do cone (6.1) e no ensaio de imersão (6.2), respectivamente. Para comparação acrescentou-se a tracejado, nestes mesmos gráficos, a relação obtida para estas mesmas composição-tipo no capítulo anterior.

A observação destes gráficos revela-nos:

- a) O forte efeito redutor de água do superplastificante SK 163, pois verifica-se que as composições com adjuvante conseguem ter a mesma fluidez (quer medida no ensaio do cone, quer no de imersão) com razões A/C bastante inferiores às composições sem adjuvante, como seria de esperar.
- b) Comparando os resultados agora obtidos (curvas a cheio nos gráficos) com os obtidos no Capítulo 5 (curvas a tracejado), verifica-se que as curvas actuais se encontram ligeiramente deslocadas para a direita relativamente às curvas correspondentes anteriores, isto é, para se obter a mesma fluidez com uma determinada composição, nos ensaios actuais gastou-se um pouco mais de água, dada por um ligeiro aumento da razão A/C.

As diferenças verificadas entre as duas fases de ensaio consistiram em utilizar-se actualmente cimento I-42,5 R em vez de I-32,5 e fazer-se a amassadura com misturadora com velocidade de 1100 rot/min em vez de 1400 rot/min.

Ambas as alterações influenciam no mesmo sentido de obrigar a gastar mais água actualmente para se obter a mesma fluidez que anteriormente. De facto o cimento I-42,5 R difere do I-32,5 particularmente por uma moagem mais intensa, e portanto pela maior

finura obtida, quantificável por uma maior superfície específica, o que obriga a gastar mais água para a mesma massa de cimento. Quanto ao facto de a misturadora ser ligeiramente mais lenta também obriga a gastar ligeiramente mais água para a mesma massa de cimento para se obter a mesma eficácia na dispersão dos grãos de cimento na suspensão, como mais adiante se analisará (6.4). Regista-se, portanto, coerência nos resultados obtidos.

Tendo em conta as conclusões dos Capítulos 4 e 5 de que a fluidez é praticamente independente da composição-tipo da calda utilizada, se for medida pelo ensaio de imersão, o mesmo não acontecendo se a fluidez for medida pelo ensaio do cone (caso em que se verifica uma grande dispersão de resultados em função das composições-tipo utilizadas), a escolha das composições a seleccionar para se realizar o estudo reológico das caldas irá ser feita com base nos resultados obtidos no ensaio de imersão. Assim, no Gráfico 6.2, sobre as curvas representadas das actuais composições-tipo 1 e 2 (representadas a cheio), escolheram-se pontos com idêntica fluidez, cobrindo uma gama alargada de valores de fluidez. Esses pontos seleccionados encontram-se assinalados no Gráfico 6.3, no qual foram repetidas as curvas actuais do Gráfico 6.2, indicando-se as designações de cada composição seleccionada e a respectiva constituição. Foram assim seleccionados 4 pontos em cada curva, correspondentes às composições designadas por 1A a 1D e 2A a 2D, tendo-se escolhido um ponto suplementar na curva 2, correspondente à composição 2E. Estas composições encontram-se indicadas no Quadro 6.3.

Como seria de esperar verifica-se que estas mesmas composições, se marcadas no Gráfico 6.1 (fluidez no ensaio do cone/razão A/C) já não têm fluidez análoga, conforme se pode observar no Gráfico 6.4, onde se encontram representadas as curvas actuais do Gráfico 6.1 e assinaladas as composições seleccionadas no Gráfico 6.2.

Quadro 6.3 - Composições das caldas escolhidas para realização dos ensaios reológicos.

Composição-tipo	Designação das composições	Razão A/C	Fluidez no ensaio de imersão (seg.)
1 (cimento + água)	1A	0,48	22
	1B	0,455	40
	1C	0,435	62
	1D	0,42	85
2 (cimento + água + 2,0% SK 163)	2A	0,36	22
	2B	0,33	40
	2C	0,31	60
	2D	0,295	85
	2E	0,345	29

6.4 – ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DA MISTURADORA

Após a realização dos ensaios reológicos sobre as caldas seleccionadas no subcapítulo anterior e que se apresentam no subcapítulo seguinte, foi realizada uma análise sumária da influência da velocidade de rotação da misturadora para amassadura das caldas nas respectivas características de fluidez.

O LEM-FEUP possui um outro berbequim da marca “BLACK & DECKER”, ref^o KR 532, com uma velocidade de rotação de 2800 rot./min., no qual é adaptável a vareta de agitação utilizada nas amassaduras das caldas.

Utilizando o berbequim BOSH, com as velocidades de rotação de 450 e 1100 rot./min. e este último, com 2800 rot./min., dispõe-se de 3 gamas de velocidade de rotação, com as quais se fabricaram caldas com as composições 1A a 1D e 2A a 2D, referidas. No Quadro 6.4 resumem-se os resultados obtidos:

Quadro 6.4 - Influência da velocidade de rotação da misturadora na fluidez das caldas

Composição - - tipo	Composição	Mist. 2800 rot./min.		Mist. 1100 rot./min.		Mist. 450 rot./min.	
		E. cone (seg.)	E. imersão (seg.)	E. cone (seg.)	E. imersão (seg.)	E. cone (seg.)	E. imersão (seg.)
1 (cim. + água)	1A (A/C = 0,48)	9,3	27,2	10,7	34,0	17,8	51,0
	1B (A/C = 0,455)	11,0	43,8	13,9	54,8	30,4	66,3
	1C (A/C = 0,435)	13,0	65,6	19,0	75,0	50,6	92,7
	1D (A/C = 0,42)	16,3	90,7	29,4	97,9	-	-
2 (cim. + água + SK 163)	2A (A/C = 0,36)	12,2	23,7	13,8	26,0	20,7	34,0
	2B (A/C = 0,33)	17,3	38,9	22,2	43,6	37,2	56,3
	2C (A/C = 0,31)	31,0	72,0	38,1	79,9	61,9	88,7
	2D (A/C = 0,295)	59,9	145,2	71,4	127,8	115,2	117,0

Ressalva-se que o cimento utilizado nestas amassaduras é também do tipo I-42,5R, mas com origem diferente do anteriormente utilizado na escolha das composições e depois usado nos ensaios reológicos. Devido à eventualidade de poder ser necessário repetir parte dos ensaios reológicos ou realizar outros ensaios reológicos ou de outra natureza, reservou-se para esta finalidade o cimento I-42,5 R facultado pela Secil proveniente de uma mesma moagem.

Para estes ensaios comparativos das caldas com as mesmas composições, nas amassaduras com diferentes velocidades de rotação, utilizou-se um cimento I-42,5 R, facultado pela empresa “Construtora do Tâmega, S.A.”, responsável pela “Empreitada da Nova Ponte Sobre o Rio Douro em Entre-os-Rios”, retirado do silo de cimento da central de betão localizada na obra. Trata-se de um cimento importado da Turquia, mas como apenas se pretende comparar resultados, e tratando-se do mesmo tipo e classe (I-42,5 R) do anterior, julga-se dispensável a apresentação de mais informação.

Com base nos resultados obtidos, indicados no Quadro 6.4, elaboraram-se os Gráficos 6.5 a 6.7.

O Gráfico 6.5, que representa a relação entre a fluidez medida pelo ensaio do cone e pelo ensaio de imersão de caldas amassadas com diferentes velocidades de rotação da misturadora, é semelhante aos Gráficos 4.1, 5.5, 5.10 e 5.17 dos capítulos anteriores, verificando-se igualmente que não existe uma relação única entre a fluidez medida pelo ensaio do cone e a fluidez medida pelo ensaio de imersão, havendo diversas relações consoante a composição-tipo e a misturadora utilizadas.

Os Gráficos 6.6 e 6.7 representam a relação que se verifica entre a razão A/C e a fluidez, medida pelo ensaio do cone e pelo ensaio de imersão, respectivamente, de caldas amassadas com diferentes velocidades de rotação da misturadora. A análise destes gráficos permite de novo constatar o forte efeito redutor de água do superplastificante SK 163. Quanto à influência da velocidade de rotação da misturadora na fluidez das caldas, verifica-se que, como seria de esperar, para caldas com a mesma composição, quanto maior a velocidade de rotação, maior a fluidez da calda. Para todas as composições e para todas as velocidades esta regra foi observada, excepto para a composição 2D, com razão A/C mais baixa (0,295), em que tal não se verificou.

Observação mais importante é a de que nos quatro conjuntos de curvas consideradas (conjugação das duas composições-tipo com os dois ensaios de medição da fluidez), as curvas representativas das amassaduras com velocidade de rotação 1100 e 2800 rot./min. estão bastante próximas entre si, estando a curva da amassadura com velocidade de rotação de 450 rot./min. sensivelmente afastada daquelas.

Esta observação está de acordo com a indicação constante de alguma normalização, referida no Capítulo 2, de recomendar a utilização de misturadoras com velocidade de rotação superior a 1000 rot./minuto.

Como a misturadora utilizada no Capítulo 5 tinha uma velocidade de rotação de 1400 rot./minuto, compreendida entre as actuais 1100 e 2800 rot./min., mas mais próxima de 1100 rot./min., isto permite concluir que as características de fluidez das caldas amassadas com a anterior misturadora de 1400 rot./min. deveriam diferir muito pouco das correspondentes caldas amassadas com a misturadora actualmente utilizada com 1100 rot./minutos.

6.5 – ENSAIOS REOLÓGICOS

Uma vez escolhidas as composições das caldas a estudar, interessaria determinar para cada uma delas os “parâmetros reológicos” respectivos.

Conforme se analisou no Capítulo 1, as caldas de injeção utilizadas no enchimento das bainhas de pré-esforço são suspensões de elevada concentração volumica em material sólido, com comportamento plástico, obedecendo à lei de Bingham $\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma}$ (1.9). Assim, os parâmetros reológicos a determinar para cada composição seriam os valores de τ_0 e μ , tensão de cedência (expressa em Pa) e coeficiente de viscosidade plástica, ou apenas viscosidade plástica (expressa em Pa.s).

Para a determinação dos seus valores concretos seria necessário dispôr de viscosímetros adequados.

Como se referiu na introdução do presente capítulo (6.1), não se dispondo de viscosímetros adequados que permitiriam determinar os valores concretos dos parâmetros reológicos das caldas, recorreu-se a um viscosímetro “Brookfield”, variante do viscosímetro de cilindros coaxiais, com haste do rotor simples, disponível no polo da Amieira, em S. Mamede de Infesta, do Instituto Geológico e Mineiro. Este viscosímetro, apesar de não permitir determinar os valores absolutos dos parâmetros reológicos τ_0 e μ , permite a determinação de valores relativos destes parâmetros entre as diferentes caldas. Como se pretende a comparação das características reológicas das diferentes caldas, os resultados que é possível obter com este viscosímetro são suficientes para este efeito.

6.5.1 – Viscosímetro Brookfield utilizado

Na Figura 6.1 encontra-se representado o esquema do viscosímetro Brookfield utilizado.

Este viscosímetro é uma variante dos viscosímetros de cilindros coaxiais, sendo neste caso o cilindro fixo o recipiente que contém a calda a estudar e o “cilindro” móvel é o rotor, materializado por uma haste com disco.

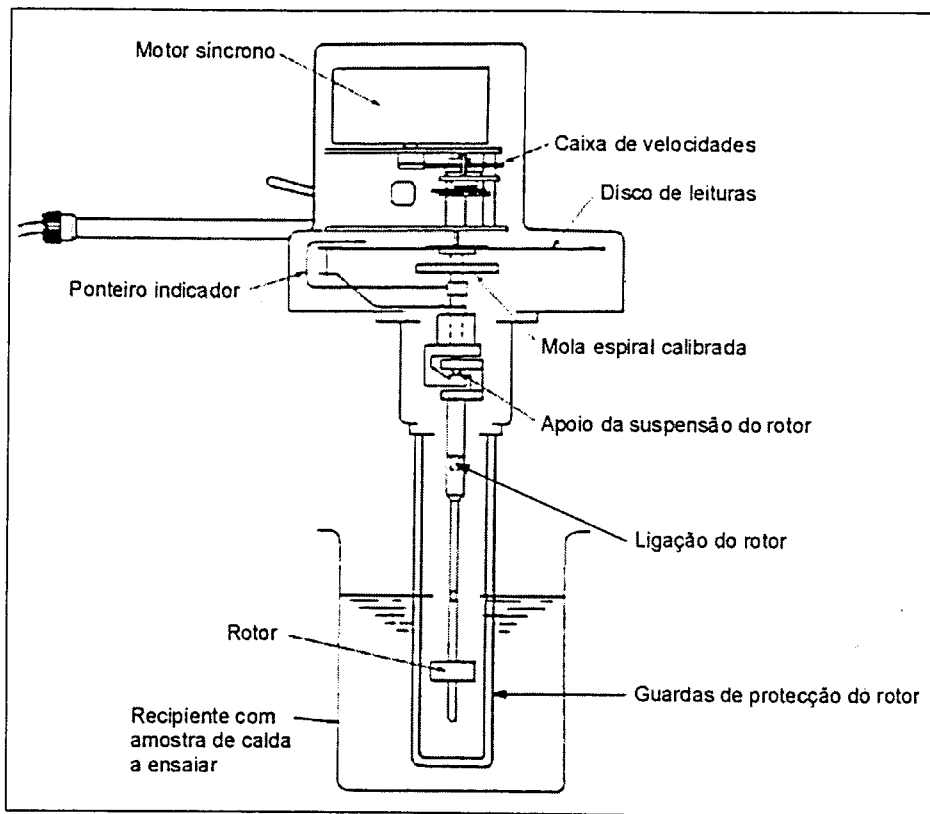


Figura 6.1 – Esquema do viscosímetro Brookfield.

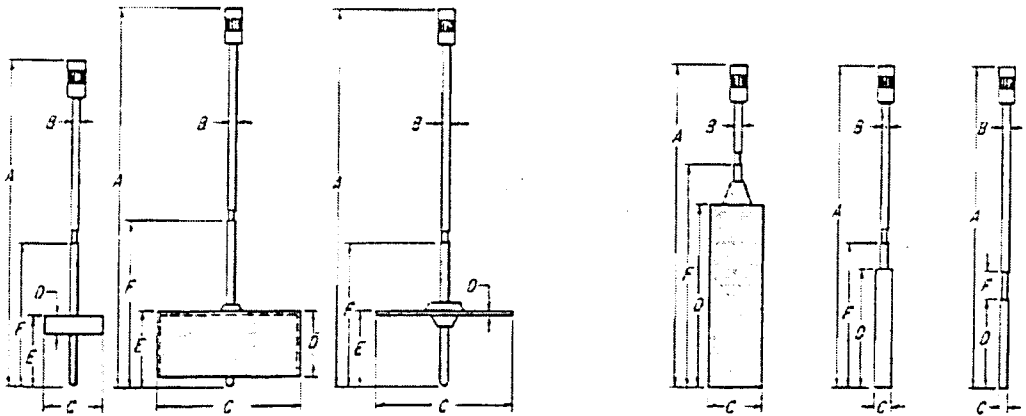
O viscosímetro Brookfield mede o momento torsor que é necessário aplicar para rodar um elemento (haste com disco ou haste cilíndrica) imerso num fluido. A haste é accionada por um motor síncrono através de uma mola espiral calibrada, construída numa liga de berílio e cobre, muito resistente à fadiga. A deflecção da mola é indicada por um ponteiro num disco de leituras, ou por um mostrador digital. Utilizando várias velocidades de transmissão, conjugadas com diferentes geometrias de cada tipo de haste (rotor), pode-se medir uma gama bastante alargada de viscosidades.

Para uma determinada viscosidade, a resistência ao movimento, indicada pelo grau de enrolamento da mola espiral, é proporcional à velocidade de rotação da haste, estando relacionada também com a sua forma e dimensões (geometria da haste). A resistência ao movimento aumenta com o aumento das dimensões da haste e/ou o aumento da velocidade de rotação e, portanto, para a mesma haste e velocidade de rotação, um acréscimo de viscosidade é acompanhado por um acréscimo de deflecção da mola. Para um determinado viscosímetro, a gama mais baixa de viscosidades é medida usando a haste maior com a maior velocidade de rotação e a gama mais elevada de viscosidades usando a haste menor e a velocidade mais baixa de rotação. Para determinar as características reológicas de um determinado fluido, fazem-se medições

utilizando a mesma haste com diferentes velocidades de rotação. Nos modelos digitais a posição relativa da mola é detectada por um RVDT (Rotary Variable Displacement Transducer), sendo lida num mostrador digital.

Como nota refere-se que as guardas de protecção das hastes de rotor não são necessárias no caso das hastes com disco do modelo HB utilizadas neste estudo.

Os viscosímetros Brookfield podem ser equipados com hastes cuja geometria está indicada na Figura 6.2: (a) hastes de disco e (b) hastes cilíndricas.



(a) - Hastes de disco

(b) - Hastes cilíndricas

Figura 6.2 – Geometria das hastes (rotor) dos viscosímetros Brookfield

Se o viscosímetro fosse equipado com hastes cilíndricas seria possível, para cada velocidade de rotação imposta (ω), e lido o momento torsor correspondente (T), calcular os respectivos valores da tensão tangencial (τ) e da velocidade de deformação angular ($\dot{\gamma}$), obtendo-se um pondo do diagrama ($\tau ; \dot{\gamma}$).

O Manual Brookfield [56], indica para cálculo de τ e $\dot{\gamma}$ as seguintes expressões:

$$\tau = \frac{T}{2\pi R_b^2 \cdot L} \quad (6.1)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{2 \cdot \omega \cdot R_c^2 \cdot R_b^2}{x^2 (R_c^2 - R_b^2)}, \quad (6.2)$$

com ω - velocidade angular da haste (rad./seg.);

R_c - raio do recipiente;

R_b – raio da haste cilíndrica;

x – raio no qual está a ser calculado $\dot{\gamma}$;

T – momento torsor aplicado pelo aparelho;

L – comprimento da haste cilíndrica.

Como nota é referido que R_c não deve exceder $2R_b$ para definir correctamente $\dot{\gamma}$.

Dividindo τ por $\dot{\gamma}$ obtém-se a designada viscosidade aparente:

$$\mu_{ap.} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (6.3)$$

Para um fluido Binghamiano a viscosidade aparente diminui à medida que aumenta a velocidade de deformação angular, como se ilustra na Figura 6.3.

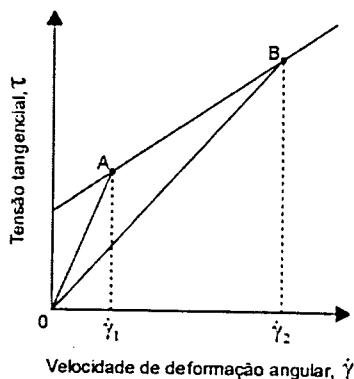


Figura 6.3 – Viscosidade aparente.

De facto a viscosidade aparente para $\dot{\gamma}_1$ é dada pelo declive de OA e a viscosidade aparente para $\dot{\gamma}_2$ é dada pelo declive de OB, diminuindo, portanto, à medida que $\dot{\gamma}$ aumenta.

Porém, aplicando ao mesmo fluido diversas velocidades de rotação com a mesma haste cilíndrica, e lidos os respectivos valores dos momentos torsores que é necessário aplicar, é possível calcular as coordenadas τ e $\dot{\gamma}$ de diferentes pontos do diagrama reológico do fluido, que, sendo plástico, deverão estar alinhados segundo uma recta, como a representada na Figura 6.3. Traçada a recta, e conforme já foi analisado no Capítulo 1, o seu declive é o valor da viscosidade plástica (μ) e a sua intersecção com o eixo τ é a tensão de cedência (τ_0).

A Brookfield Engineering Laboratories, Inc., desenvolveu software que permite o imediato traçado das curvas (τ , $\dot{\gamma}$) e a obtenção dos valores dos parâmetros reológicos.

Sendo o viscosímetro equipado com hastes de disco, para cada velocidade de rotação imposta (ω), e lido o momento tursor correspondente (T), é possível calcular apenas a relação entre a tensão tangencial τ e a velocidade de deformação angular $\dot{\gamma}$, isto é, a sua viscosidade aparente, mas não os valores concretos de τ e $\dot{\gamma}$. De facto, o valor da viscosidade aparente é dado pela razão entre o momento tursor e a velocidade de rotação multiplicada por uma constante dependendo do aparelho e da haste utilizada. Para o viscosímetro usado e para a haste de disco utilizada (HB2), esta constante vale 3200, isto é, para uma determinada velocidade de rotação da haste ω , expressa em rot./min., e para o correspondente momento tursor aplicado, T , expresso em % do máximo valor aplicável para essa haste, a viscosidade aparente, expressa em centipoise é dada por $\frac{T}{\omega} \times 3200$.

Como para cada calda se pode obter um conjunto de pares de valores ω , T (velocidade de rotação; momento tursor), é possível fazer a comparação do comportamento reológico de diferentes caldas, como a seguir se analisará.

6.5.2 – Ensaios realizados

Com o mesmo equipamento e com os mesmos materiais que foram utilizados na definição das composições a estudar (6.2) foram agora realizadas amassaduras de caldas com essas composições seleccionadas (1A a 1D e 2A a 2E) e realizados ensaios no laboratório do núcleo da Amieira do Instituto Geológico e Mineiro, com o viscosímetro Brookfield anteriormente descrito.

Como se pretendem realizar ensaios para comparação de resultados, utilizou-se sempre a mesma haste de disco (HB2), conjugada com as mesmas velocidades de rotação, conforme é recomendado [56]. Foi escolhida a haste HB2 por ser a haste apropriada para medir os valores médios da gama de viscosidades em causa nestas caldas e, assim, poder abranger todas as caldas e todas as velocidades de rotação com a mesma haste.

Para cada amassadura correspondente a cada composição, foi colocada imediatamente após a amassadura uma determinada quantidade de calda no recipiente

do viscosímetro (recipiente de vidro com forma cilíndrica e dimensões normalizados com capacidade mínima de 600 cm³), que é colocado no viscosímetro num banho de água a 25°C , para garantia da execução do ensaio a temperatura constante.

Liga-se de imediato o viscosímetro na velocidade mínima de rotação de 0,5 rot./min., e ao fim de 1 minuto nesta velocidade faz-se a leitura do momento tursor aplicado, passando-se para a velocidade seguinte e procedendo-se do mesmo modo sucessivamente para as diferentes velocidades até se atingir a velocidade máxima de rotação de 100 rot./min..

No Quadro 6.5 encontram-se resumidos os resultados obtidos, indicando-se para cada composição da calda e para as diferentes velocidades de rotação impostas (ω) quais os momentos torses aplicados (T). Com base nestes valores, e conforme indicado anteriormente, foi calculada a viscosidade aparente para cada composição e para cada velocidade de rotação, através da relação:

$$\mu_{ap} \text{ (cP)} = \frac{T(\%)}{\omega(\text{rot./min.})} \times 3200 \quad (6.4)$$

Os valores obtidos encontram-se indicados no Quadro 6.6.

Também para o viscosímetro com haste de disco a Brookfield Engineering Laboratories, Inc., desenvolveu software que para o ensaio de cada amostra (cada composição da calda) permite obter um quadro com os dados e resultados do ensaio e dois gráficos relacionando a velocidade de rotação com a viscosidade aparente, estando num dos gráficos as variáveis marcadas numa escala linear e no outro na escala logarítmica. No gráfico com escala logarítmica a função de relacionamento das duas variáveis (velocidade de rotação e viscosidade aparente) é representada por uma recta.

Do quadro impresso, para além dos dados com indicação do modelo (HB), do tipo de haste utilizada (HB2), da data e hora do ensaio e da identificação da amostra, são indicadas as diversas velocidades de rotação impostas, os correspondentes momentos torses aplicados, a viscosidade aparente calculada, a temperatura (ambiente, do banho de água ou da amostra, em função da posição em que é colocada a sonda térmica) e o tempo de rotação numa determinada velocidade ao fim do qual é feita a leitura do momento tursor (em geral 1 minuto).

Quadro 6.5 – Viscosímetro Brookfield: velocidades de rotação/momentos torsores

Velocidades de rotação, ω (rot./min.)	Momentos torsores, T (%)										
	Composição-tipo 1 (cim. + água)					Composição-tipo 2 (cim. + água + 2% SK 163)					
	1A (A/C = 0,48)	1B (A/C = 0,455)	1C (A/C = 0,435)	1D (A/C = 0,42)	2A (A/C = 0,36)	2B (A/C = 0,33)	2C (A/C = 0,31)	2D (A/C = 0,295)	2E (A/C = 0,345)		
0,5	5,6	7,1	7,7	8,6	2,0	4,2	6,9	8,4	3,8		
1,0	6,6	7,0	5,9	7,6	2,1	4,6	8,6	9,6	3,8		
2,0	8,0	8,8	7,4	8,7	2,3	5,1	11,6	12,9	4,6		
2,5	9,5	10,0	9,1	10,0	2,5	5,4	13,5	13,9	5,0		
4,0	9,4	12,7	11,6	12,8	2,9	6,5	16,5	18,6	5,9		
5,0	9,9	13,3	13,6	14,8	3,1	7,0	17,7	21,1	6,2		
10,0	10,5	16,6	21,9	22,5	4,0	9,8	24,3	30,5	8,6		
20,0	11,2	21,3	27,8	31,4	5,0	14,4	30,7	42,6	11,9		
50,0	17,9	31,6	35,9	42,2	7,1	23,5	39,5	56,2	19,1		
100,0	24,6	37,9	46,4	52,2	9,9	32,3	51,0	71,8	27,7		

Quadro 6.6 – Viscosímetro Brookfield: velocidades de rotação/viscosidade aparente

Velocidades de rotação, ω (rot./min.)	Viscosidade aparente, μ_{ap} (cP)									
	Composição-tipo 1 (cim. + água)					Composição-tipo 2 (cim. + água + 2% SK 163)				
	1A (A/C = 0,48)	1B (A/C = 0,455)	1C (A/C = 0,435)	1D (A/C = 0,42)	2A (A/C = 0,36)	2B (A/C = 0,33)	2C (A/C = 0,31)	2D (A/C = 0,295)	2E (A/C = 0,345)	
0,5	35840	45440	49280	55040	12800	26880	44160	53760	24320	
1,0	21120	22400	18880	24320	6720	14720	27520	30720	12160	
2,0	12800	14080	11840	13920	3680	8160	18560	20640	7360	
2,5	12160	12800	11648	12800	3200	6912	17280	17792	6400	
4,0	7520	10160	9280	10240	2320	5200	13200	14880	4720	
5,0	6336	8512	8704	9472	1984	4480	11320	13504	3968	
10,0	3360	5312	7008	7200	1280	3136	7776	9760	2752	
20,0	1792	3408	4448	5024	800,0	2304	4912	6816	1904	
50,0	1146	2022	2298	2700	454,4	1504	2528	3597	1222	
100,0	787,2	1213	1485	1670	316,8	1033	1632	2298	886,4	

Todos estes resultados obtidos, para todas as caldas ensaiadas, encontram-se apresentados no Anexo C.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios, indicados no Quadro 6.5, foi elaborado o Gráfico 6.8 em que se relaciona a velocidade de rotação com o momento torsor, para cada composição de calda.

Das expressões (6.1) e (6.2) anteriormente referidas, verifica-se que a tensão tangencial τ é directamente proporcional ao momento torsor T , sendo o coeficiente de proporcionalidade função das características do aparelho, e que a velocidade de deformação angular $\dot{\gamma}$ é directamente proporcional à velocidade de rotação da haste ω , para o mesmo raio r onde está a ser calculado $\dot{\gamma}$, sendo o coeficiente de proporcionalidade função das características do aparelho. As expressões (6.1) e (6.2) são indicadas para os viscosímetros com hastes cilíndricas, permitindo o traçado do gráfico $(\tau, \dot{\gamma})$. Consequentemente o gráfico (T, ω) será idêntico a $(\tau, \dot{\gamma})$ a uma escala conhecida. Para viscosímetros com haste de disco o gráfico (T, ω) também deverá ser idêntico a $(\tau, \dot{\gamma})$, mas a uma escala desconhecida, mas que será suficiente para uma análise comparativa do comportamento das caldas.

Com base nas curvas traçadas no Gráfico 6.8 (T, ω) , escolhendo para cada curva pontos com velocidades de rotação suficientemente afastados é possível, traçando a recta que os une e prolongando-a até intersectar o eixo T , e admitindo-a como traduzindo o comportamento reológico da calda (à semelhança da lei de Bingham), determinar valores relativos dos seus parâmetros reológicos. Assim, de acordo com o esquema apresentado na Figura 6.4, foram determinados os valores relativos dos parâmetros reológicos, designados por T_0 (valor relativo da tensão de cedência τ_0) e μ^* (valor relativo da viscosidade μ).

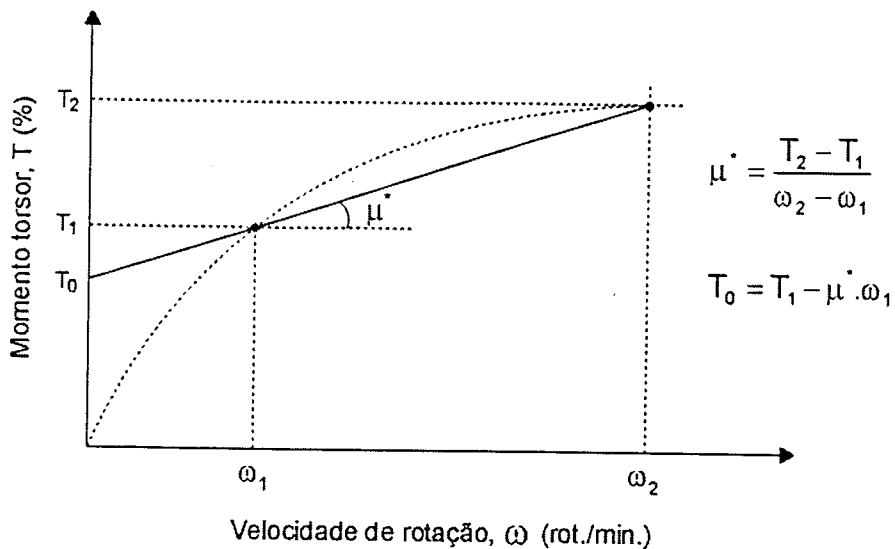


Figura 6.4 - Esquema da determinação dos valores relativos dos parâmetros reológicos.

No Quadro 6.7 apresentam-se os valores relativos T_0 e μ^* determinados entre dois pontos dos gráficos, sendo um deles o correspondente à velocidade máxima de rotação ($\omega_2 = 100$ rot./min.) e o outro correspondente à velocidade de rotação ω , de 20, 10 e 5 rot./min., respectivamente. Obtiveram-se, deste modo, para estas três hipóteses, três conjuntos de valores de T_0 e μ^* , verificando-se que a variação relativa destes valores é semelhante para as três hipóteses.

Assim, com base apenas na hipótese intermédia ($\omega_2 = 100$; $\omega_1 = 10$ rot./min.), elaboraram-se os Gráficos 6.9 e 6.10 onde se apresentam em função da razão A/C os valores de T_0 e de μ^* , respectivamente. Estes gráficos foram realizados com escala linear para a razão A/C e com escala logarítmica para T_0 e μ^* , à semelhança dos gráficos idênticos apresentados no Capítulo 1, elaborados por diversos autores (Gráficos 1.17).

6.5.3 – Análise dos resultados obtidos e respectivas conclusões

Analisando estes dois gráficos (6.9 e 6.10) verifica-se que as composições-tipo 2, com superplastificante têm uma variação mais intensa destes parâmetros relativos com a razão A/C do que as composições-tipo 1, sem superplastificante, o que é evidenciado por serem representadas por rectas com maior declive. Isto permite concluir que numa calda com superplastificante a variação tanto da tensão de cedência como da viscosidade com a razão A/C é mais intensa do que na calda sem superplastificante, para as mesmas gamas de fluidez (superplastificante utilizado com a função de redutor de água). Isto está evidenciado também no Gráfico 6.8 onde as curvas das composições-tipo 1 se encontram mais concentradas do que as das composições-tipo 2.

Quadro 6.7 – Valores relativos da tensão de cedência (T_0) e da viscosidade (μ^*)

		Composições									
		Composição-tipo 1 (cim.+ água)					Composição-tipo 2 (cim. + água + 2% SK 163)				
		1A (A/C=0,48)	1B (A/C=0,455)	1C (A/C=0,435)	1D (A/C=0,42)	2A (A/C=0,36)	2B (A/C=0,33)	2C (A/C=0,31)	2D (A/C=0,295)	2E (A/C=0,345)	
$\omega_2 = 100$ rot./min. $\omega_1 = 20$ rot./min.	T_2	24,6	37,9	46,4	52,2	9,9	32,3	51,0	71,8	27,7	
	T_1	11,2	21,3	27,8	31,4	5,0	14,4	30,7	42,6	11,9	
	μ^*	0,1675	0,2075	0,2325	0,2600	0,0612	0,2238	0,2538	0,3650	0,1975	
	T_0	7,85	17,15	23,15	26,20	3,78	9,92	25,62	35,30	7,95	
$\omega_2 = 100$ rot./min. $\omega_1 = 10$ rot./min.	T_2	24,6	37,9	46,4	52,2	9,9	32,3	51,0	71,8	27,7	
	T_1	10,5	16,6	21,9	22,5	4,0	9,8	24,3	30,5	8,6	
	μ^*	0,1567	0,2367	0,2722	0,3300	0,0656	0,2500	0,2967	0,4589	0,2122	
	T_0	8,93	14,23	19,18	19,20	3,34	7,30	21,33	25,91	6,48	
$\omega_2 = 100$ rot./min. $\omega_1 = 5$ rot./min.	T_2	24,6	37,9	46,4	52,2	9,9	32,3	51,0	71,8	27,7	
	T_1	9,9	13,3	13,6	14,8	3,1	7,0	17,7	21,1	6,2	
	μ^*	0,1547	0,2589	0,3453	0,3937	0,0716	0,2663	0,3505	0,5337	0,2263	
	T_0	9,13	12,01	11,87	12,83	2,74	5,67	15,95	18,43	5,07	

Sabendo-se que a tensão de cedência é o valor da tensão que é necessário aplicar para que o movimento se inicie, é admissível considerar que tal valor deverá ser próximo ao correspondente à situação da menor velocidade de rotação, de 0,5 rot./minuto. Considerando os momentos torsores aplicados para a velocidade de rotação de 0,5 rot./minuto, indicados na primeira linha do Quadro 6.5, e representando-os em função das razões A/C correspondentes, obtém-se o Gráfico 6.11, que, embora com valores relativos diferentes, confirma a conclusão anteriormente obtida, no que respeita às tensões de cedência (recta representativa com maior declive nas caldas com superplastificante).

Após esta primeira conclusão, e prosseguindo a análise dos Gráficos 6.9 a 6.11, interessa verificar o efeito da utilização do adjuvante. Como o adjuvante foi utilizado principalmente como redutor de água e não como plastificante, como aliás já se assinalou anteriormente (6.3), não é possível verificar directamente, para o mesmo valor de A/C, o seu efeito, como se analisou no Capítulo 1 (Figuras 1.22 e 1.23 - relação da tensão de cedência e da viscosidade com a percentagem de adjuvante superplastificante, para razão A/C constante). No entanto a análise dos Gráficos 6.9 e 6.10 revela que a quebra dos valores relativos da tensão de cedência e da viscosidade ao adicionar adjuvante à calda é significativa, mesmo com valores de A/C inferiores: a calda sem adjuvante com mais baixa relação A/C (0,42) tem valores relativos da tensão de cedência e da viscosidade bastante superiores aos da calda com adjuvante, com mais alta relação A/C (0,36). Se fosse amassada uma calda com adjuvante com $A/C = 0,42$ as diferenças seriam ainda maiores. Conclui-se desde logo que a simples adição de adjuvante a uma calda (na percentagem de 2%) provoca uma quebra muito acentuada da tensão de cedência e da viscosidade.

Uma análise mais detalhada destes dois gráficos (6.9 e 6.10) permite destrinçar as quebras de valores nos dois parâmetros. Enquanto que a viscosidade das caldas com adjuvante recuperam a ordem de grandeza do maior valor da viscosidade das caldas sem adjuvante ($A/C = 0,42$) para a sua composição com $A/C = 0,345$, a tensão de cedência nas mesmas condições só é recuperada para a composição com $A/C = 0,31$. Idêntica conclusão se retiraria da análise do Gráfico 6.11. Isto permite concluir que a quebra muito significativa dos valores da tensão de cedência e da viscosidade que se verifica ao adicionar o adjuvante superplastificante a uma calda simples de cimento e água pode ser recuperada ao diminuir a relação A/C na calda, recuperando-se porém mais rapidamente

a viscosidade do que a tensão de cedência, o que é o mesmo que dizer que o efeito da adição do superplastificante se faz sentir intensamente nos dois parâmetros, mas mais extensamente na tensão de cedência do que na viscosidade, o que também se enquadra com o indicado sobre este assunto no Capítulo 1 (1.2.6.5).

Após estas conclusões é também interessante comparar a fluidez das caldas, medida pelos ensaios de imersão e do cone, com os correspondentes valores relativos da tensão de cedência (T_0) e da viscosidade (μ^*). Lembra-se que as composições escolhidas para estudo em 6.3 pertencem a duas composições-tipo, havendo correspondência em termos de fluidez medida pelo ensaio de imersão, conforme indicado no Quadro 6.3 e ilustrado no Gráfico 6.3. A análise do Gráfico 6.4 (ensaio do cone; razão A/C) permite também estabelecer correspondência de composições em termos de fluidez medida pelo ensaio do cone. Estas correspondências de fluidez medidas pelos dois ensaios encontram-se resumidas no Quadro 6.8.

Quadro 6.8 - Composições com idêntica fluidez (ensaio de imersão e ensaio do cone)

	Composições-tipo		Fluidez (seg.)	
	1 (cim.+água)	2 (cim. + água + 2% SK163)	Ensaio de imersão	Ensaio do cone
Correspondência de fluidez medida pelo ensaio de imersão	1D	2D	85	-
	1C	2C	62	-
	1B	2B	40	-
	-	2E	29	-
	1A	2A	22	-
Correspondência de fluidez medida pelo ensaio do cone	-	2D	-	30,5
	-	2C	-	22,4
	1D	2B	-	15,0
	1C	2E	-	12,6
	1B	2A	-	10,8
	1A	-	-	9,0

Com o intuito de fazer a comparação de caldas com a mesma fluidez, medida quer pelo ensaio de imersão quer pelo ensaio do cone e analisar os valores relativos que assumem os parâmetros tensão de cedência e viscosidades, foram elaborados os Gráficos 6.12 a 6.14. Estes gráficos são a repetição nos mesmos sistemas de eixos dos

mesmos pontos dos Gráficos 6.9 a 6.11, respectivamente, assinalando-se agora as correspondências entre os diversos pontos, representativos de caldas, com a mesma fluidez medida pelo ensaio de imersão (a tracejado) e pelo ensaio do cone (a cheio).

Nestes gráficos (6.12 - valores relativos da tensão de cedência; 6.13 - valores relativos da viscosidade; 6.14 - Momento torsor para $\omega = 0,5$ rot./min.) verifica-se existir uma significativa melhor correspondência entre estes diferentes parâmetros nas caldas com idêntica fluidez medida pelo ensaio de imersão do que quando medida pelo ensaio do cone. Isto é mostrado nestes gráficos pelos segmentos de recta que unem os pontos de igual fluidez, por terem maior declive quando a fluidez é medida pelo ensaio do cone, o que evidencia maiores diferenças entre os valores destes parâmetros para a mesma fluidez. A melhor ou pior correspondência dos valores relativos da tensão de cedência e da viscosidade está, então, evidenciada nos Gráficos 6.12 e 6.13, estando quantificada no Quadro 6.9.

Verifica-se, assim, existir uma pior correspondência entre tensões de cedência e entre viscosidades de caldas com idêntica fluidez medida pelo ensaio do cone mas de diferentes composições-tipo do que nas caldas com idêntica fluidez medida pelo ensaio de imersão. Verifica-se, também, que essa pior correspondência é bastante mais acentuada para as tensões de cedência. Conclui-se, então, existir uma melhor correlação entre a fluidez medida pelo ensaio de imersão e os parâmetros reológicos das caldas, do que quando a fluidez é medida pelo ensaio do cone, onde a correlação é particularmente má entre a fluidez e a tensão de cedência.

Por todas as razões anteriormente apontadas pode-se concluir que o ensaio de imersão mede melhor a fluidez das caldas do que o ensaio do cone, pelo menos na gama de fluidez considerada, que abrange a maioria das caldas de injeção das bainhas de pré-esforço. Esta conclusão reforça, dando outro suporte, às conclusões obtidas nos Capítulos 4 e 5.

Podemos, então, dizer agora que o ensaio de imersão mede melhor a fluidez das caldas de injeção do que o ensaio do cone, visto se verificar melhor correlação entre os resultados do ensaio de medição da fluidez pelo ensaio de imersão com os resultados do ensaio de injectabilidade na coluna de areia e com os valores dos parâmetros reológicos (tensão de cedência e viscosidade) correspondentes do que quando a medição da fluidez

Quadro 6.9 – Correspondência dos valores relativos da tensão de cedência e da viscosidade em caldas com idêntica fluidez (medida pelo ensaio de imersão e pelo ensaio do cone)

	Fluidez (seg.)		Composição-tipo 1 (cim. + água)			Composição-tipo 2 (cim. + água + 2% SK 163)		
	Ensaio de imersão	Ensaio do cone	Referência	Valor relativo da tensão de cedência	Valor relativo da viscosidade	Referência	Valor relativo da tensão de cedência	Valor relativo da viscosidade
Correspondência de fluidez medida pelo ensaio de imersão	85	-	1D	19,20	0,3300	2D	25,91	0,4589
	62	-	1C	19,18	0,2722	2C	21,33	0,2967
	40	-	1B	14,23	0,2367	2B	7,30	0,2500
	22	-	1A	8,93	0,1567	2A	3,34	0,0656
Correspondência de fluidez medida pelo ensaio do cone	-	15,0	1D	19,20	0,3300	2B	7,30	0,2500
	-	12,6	1C	19,18	0,2722	2E	6,48	0,2122
	-	10,8	1B	14,23	0,2367	2A	3,34	0,0656

é feita pelo ensaio do cone. Consequentemente, o ensaio de imersão mede melhor a injectabilidade das caldas nas bainhas de pré-esforço do que o ensaio do cone.

Como comentário às conclusões obtidas convém ter presente que para a caracterização completa do comportamento das caldas são necessários dois parâmetros reológicos, e que para serem calculados necessitam de duas determinações de momentos torsores para duas velocidades de rotação diferentes. Isto equivale a dizer que são necessários dois pontos no gráfico $(\tau, \dot{\gamma})$ e, portanto, duas velocidades de deformação angular diferentes, para se poder definir a recta que caracteriza o comportamento da calda. Com um só ponto, correspondente a uma só velocidade de deformação angular, há uma infinidade de rectas que passam nesse ponto traduzindo uma infinidade de comportamentos diferentes de caldas. A este propósito, e relembrando a noção de viscosidade aparente ilustrada na Figura 6.3, constata-se que a viscosidade aparente, resultante de uma única medida para uma determinada velocidade de deformação angular, não é por si só caracterizadora do comportamento de uma calda, pois podem existir diferentes caldas que tendo em comum esse único ponto (têm a mesma fluidez para essa velocidade de deformação angular), terão fluidez diferente para outras velocidades de deformação angular. Isto encontra-se ilustrado na Figura 6.5, onde se apresentam as duas rectas de comportamento de duas caldas A e B que se intersectam para a velocidade de deformação angular $\dot{\gamma}_2$, de modo que uma medição da fluidez para esta velocidade de deformação angular as classifica como de igual fluidez. Porém, uma medição para $\dot{\gamma}_1$, inferior, indicará que a calda A é mais fluida do que a calda B pois o momento tissor a aplicar será mais baixo em A, acontecendo o contrário se a medição for feita para $\dot{\gamma}_3$, maior do que $\dot{\gamma}_2$.

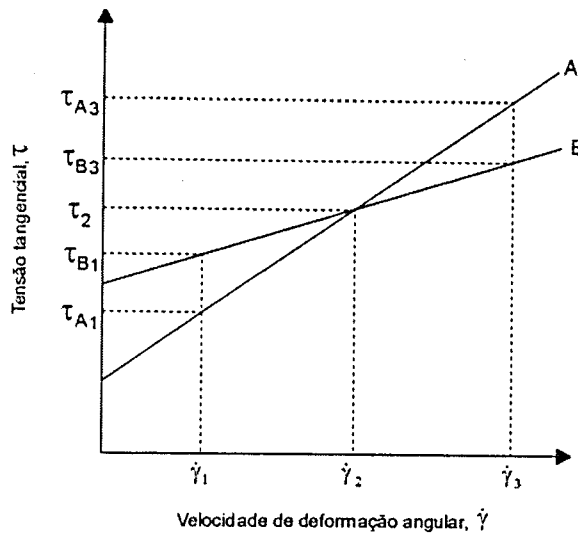


Figura 6.5 – Efeito da escolha da velocidade de deformação angular nos resultados de um ensaio com um só ponto em duas caldas A e B

Para $\dot{\gamma}_1$: $\tau_B > \tau_A$ (B é menos fluida do que A)

Para $\dot{\gamma}_3$: $\tau_B < \tau_A$ (A é menos fluida do que B)

Para $\dot{\gamma}_2$: $\tau_B = \tau_A$ (A e B têm a mesma fluidez)

Na prática podem surgir problemas se a medida da fluidez é feita para a velocidade de deformação $\dot{\gamma}_3$ e a calda é usada numa operação de injeção cuja velocidade de deformação angular média é equivalente a $\dot{\gamma}_1$, porque o ensaio de medição da fluidez indica que a calda B é mais fluida, e portanto mais injectável, enquanto que na obra se verifica que afinal é a calda A a mais injectável. Assim, tal ensaio não é utilizável, pois é completamente enganador.

Esta observação aplica-se, em princípio, a qualquer ensaio no qual apenas se faz uma medição. De facto, ensaios em que as medições são feitas somente numa velocidade de deformação angular, ou sob condições de corte fixas, não podem, em princípio, dar informação suficiente para traduzir a fluidez, por mais complexos que possam ser os ensaios ou o tratamento dos resultados.

No entanto, se a velocidade de deformação angular no ensaio for semelhante à velocidade de deformação efectiva em obra, é possível que esse ensaio com um só ponto (uma só medição) possa fornecer resultados de fluidez utilizáveis.

Porém, é muito difícil traduzir quantitativamente as condições de corte numa determinada operação em obra, e sendo possível, seria necessário dispôr de um ensaio particular para cada tipo de obra.

Todos estes comentários finais feitos às caldas e à respectiva fluidez/injectabilidade é aplicável idênticamente aos betões e à correspondente trabalhabilidade, visto ambos terem um comportamento dado pela lei de Bingham e não pela lei de Newton.

Chama-se a atenção para o facto de as condições de execução das injeções das caldas nas bainhas de pré-esforço serem pouco variáveis, constituindo praticamente um mesmo tipo de operação em obra, com condições de corte pouco variáveis, o que não acontece de modo nenhum nos betões. De facto as condições de transporte e colocação em obra do betão, para enchimento dos moldes e envolvimento das amaduras, são bastante diferentes para os diversos tipos de betonagem, composições e consistências do betão adaptados aos diferentes processos de colocação e compactação do betão. Assim, a opção por ensaios empíricos com uma só medição, implica para os betões a existência de diversos tipos de ensaio para fazer face a diversas condições de corte em obra, enquanto que para as caldas de injeção das bainhas de pré-esforço é admissível a existência de um só ensaio que abranja as suas condições de medição pouco variáveis e as diferentes composições possíveis da calda.

Do que foi dito nas conclusões dos ensaios reológicos de caldas realizadas neste capítulo concluiu-se que o ensaio de imersão perfaz as condições agora expostas. A essas razões poder-se-á ainda acrescentar:

- a) A ordem de grandeza da velocidade de injeção das caldas nas bainhas de pré-esforço (EN 446) situa-se entre 5 e 15 metros/minuto.

A ordem de grandeza do tempo de escoamento de 1 litro de calda no ensaio do cone, através do orifício de diâmetro de 10 mm, é de (EN 447) $t = 10$ a 25 segundos, a que corresponde uma velocidade de escoamento de

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{1000 \text{ cm}^3 / t(\text{seg})}{\pi \times 1^2 / 4 \text{ cm}^2} = 50,9 \text{ a } 127,3 \text{ cm/seg} \cong 31 \text{ a } 76 \text{ m/min.}$$

A ordem de grandeza do tempo de escoamento da calda no ensaio de imersão, para se deslocar da parte inferior para a parte superior do imersor (para este

descer 50 cm) através da folga entre o tubo (ϕ 62 mm) e o imersor (ϕ = 58,2 mm), é de (EN 447) $t = 30$ a 80 seg.

O volume de calda escoado no ensaio é de $50 \times \pi \times 5,82^2/4 = 1330,17 \text{ cm}^3$, a que corresponde uma velocidade de escoamento de

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{1330,17 \text{ cm}^3 / t(\text{seg})}{\left(\frac{\pi \times 6,2^2}{4} - \frac{\pi \times 5,82^2}{4} \right) \text{cm}^2} = 4,63 \text{ a } 12,4 \text{ cm/seg} \cong 2,8 \text{ a } 7,4 \text{ m/min}$$

Conclui-se que a velocidade de escoamento da calda no ensaio de imersão (2,8 a 7,4 m/min) é mais próxima da velocidade da calda no enchimento das bairhas (5 a 15 m/min.) do que a velocidade de escoamento da calda no ensaio do cone (31 a 76 m/min.).

- b) O tipo de escoamento que se verifica em obra no avanço da calda para enchimento do espaço entre o cabo de pré-esforço e a bainha é semelhante ao escoamento da calda através da folga entre o imersor e o tubo no ensaio de imersão, já não se podendo dizer o mesmo quanto ao escoamento da calda através do orifício do funil do ensaio do cone.

Como conclusão final poder-se-á admitir que as condições de corte nas caldas no ensaio de imersão são semelhantes às condições de corte nas caldas no enchimento das bairhas de pré-esforço, o que já não se verifica com o ensaio do cone, sendo esta a razão para se considerar que o ensaio de imersão, apesar de ser um ensaio empírico com uma só medição, mede convenientemente a injectabilidade das caldas nas bairhas de pré-esforço.

Razão A/C ; Fluidez no ensaio do cone

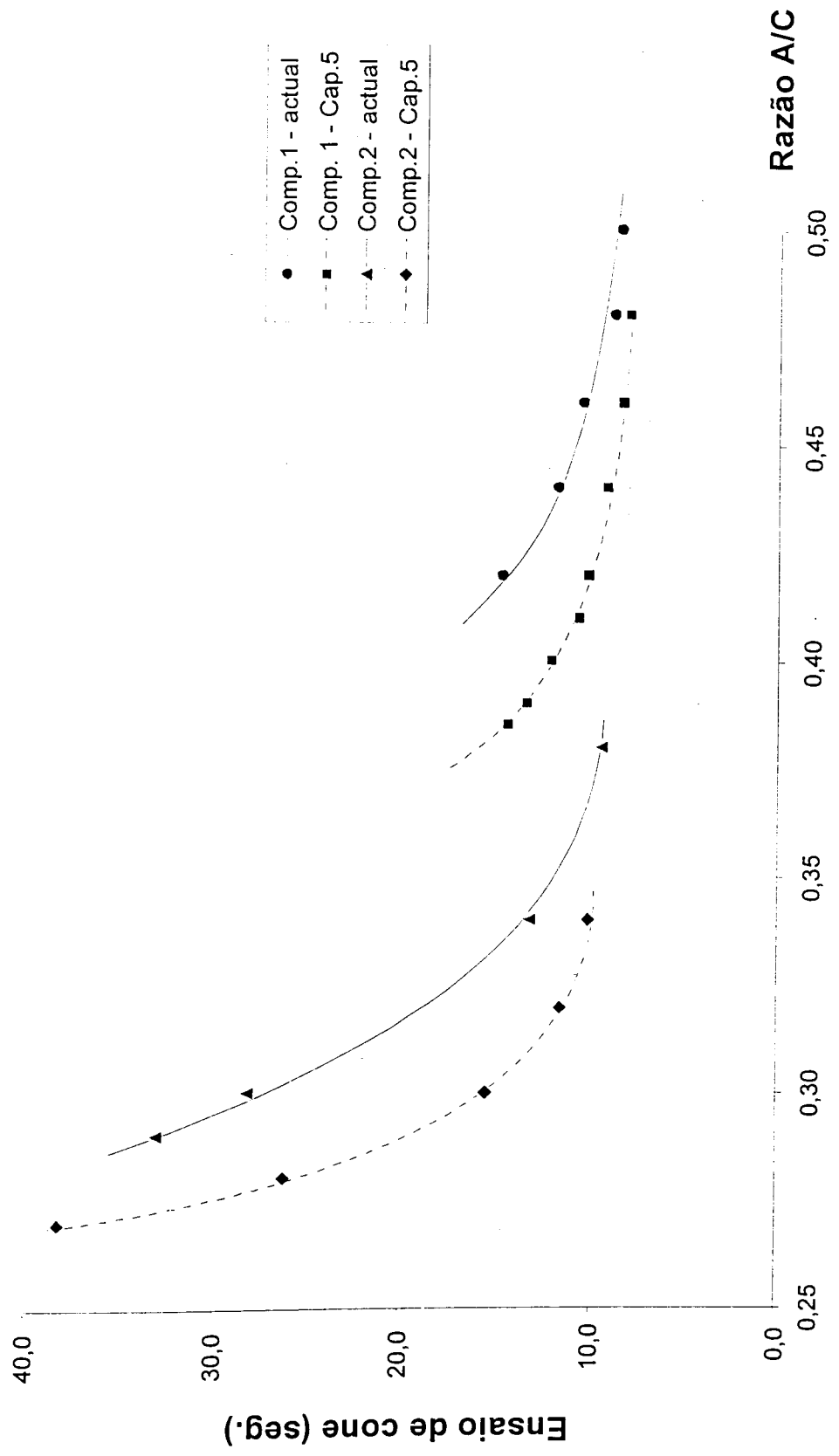


Gráfico 6.1 – Relação entre a razão A/C e a fluidez medida no ensaio do cone.

Composições seleccionadas / Fluidéz no ensaio do cone

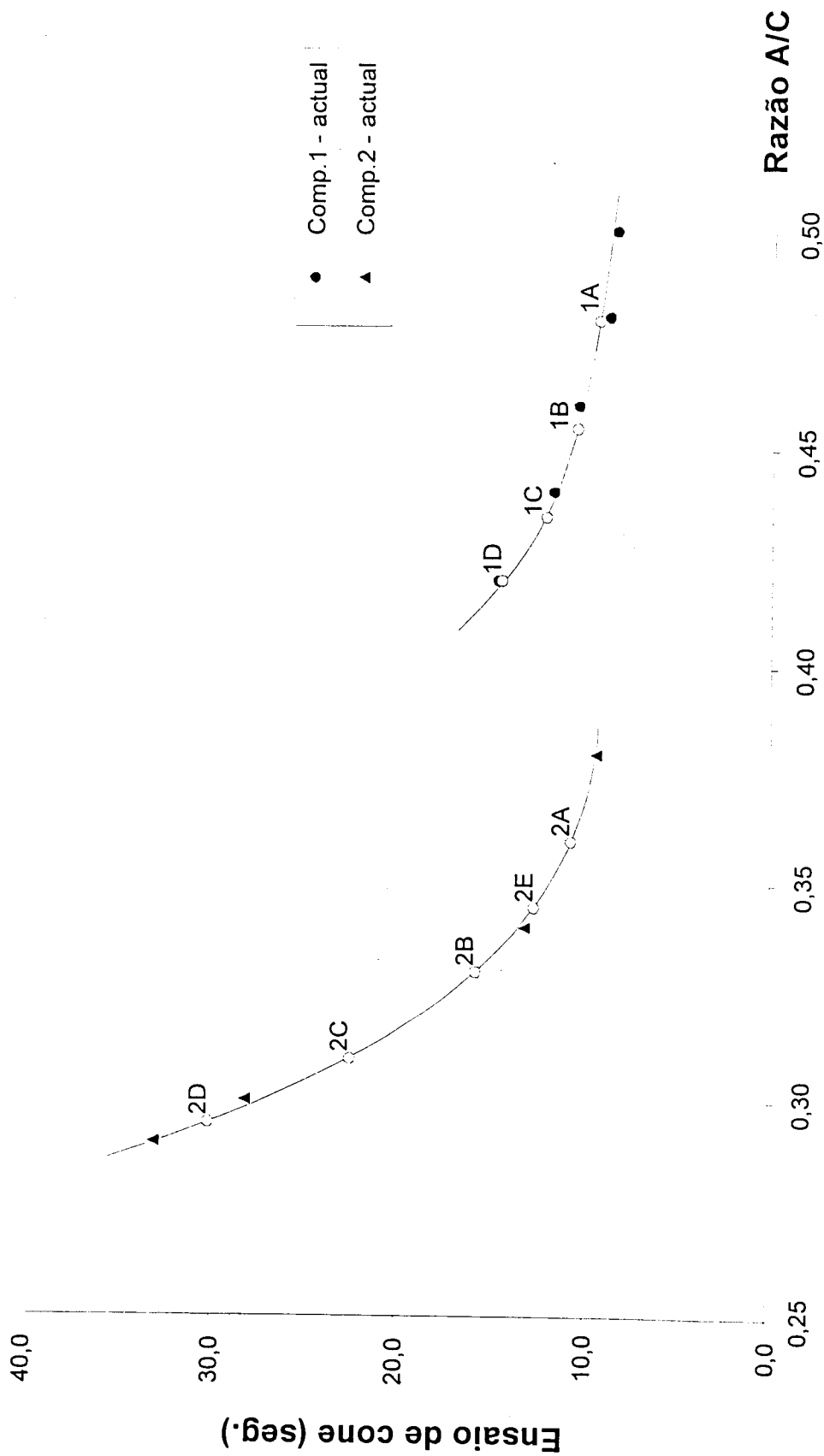


Gráfico 6.4 – Composições seleccionadas: fluidez medida no ensaio do cone.

Ensaio do cone / Ensaio de imersão diferentes velocidades de rotação da misturadora

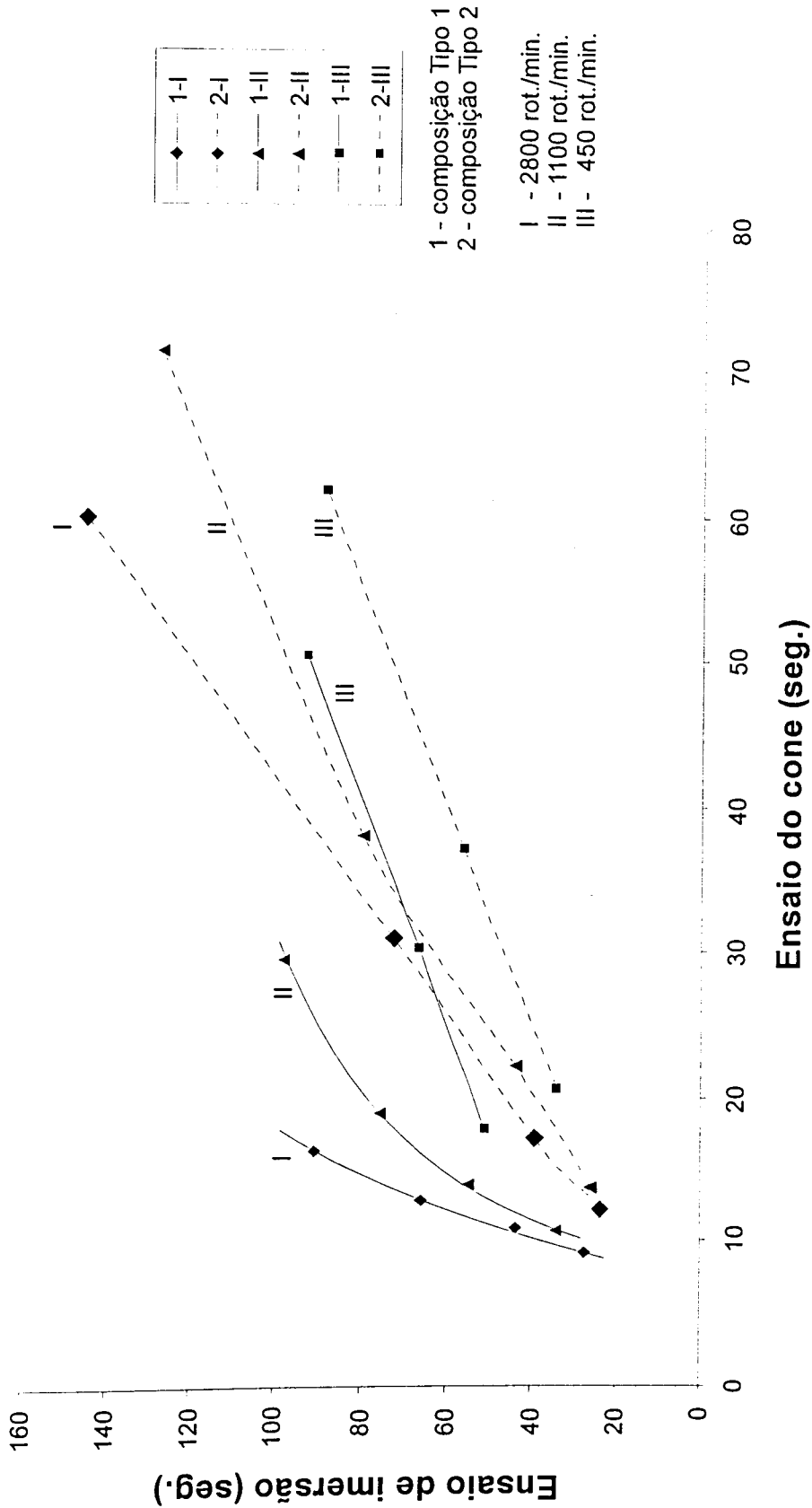


Gráfico 6.5 – Fluidez no ensaio do cone / fluidez no ensaio de imersão, para diferentes velocidades de rotação da misturadora.

Ensaio do cone / Razão A/C

diferentes velocidades de rotação da misturadora

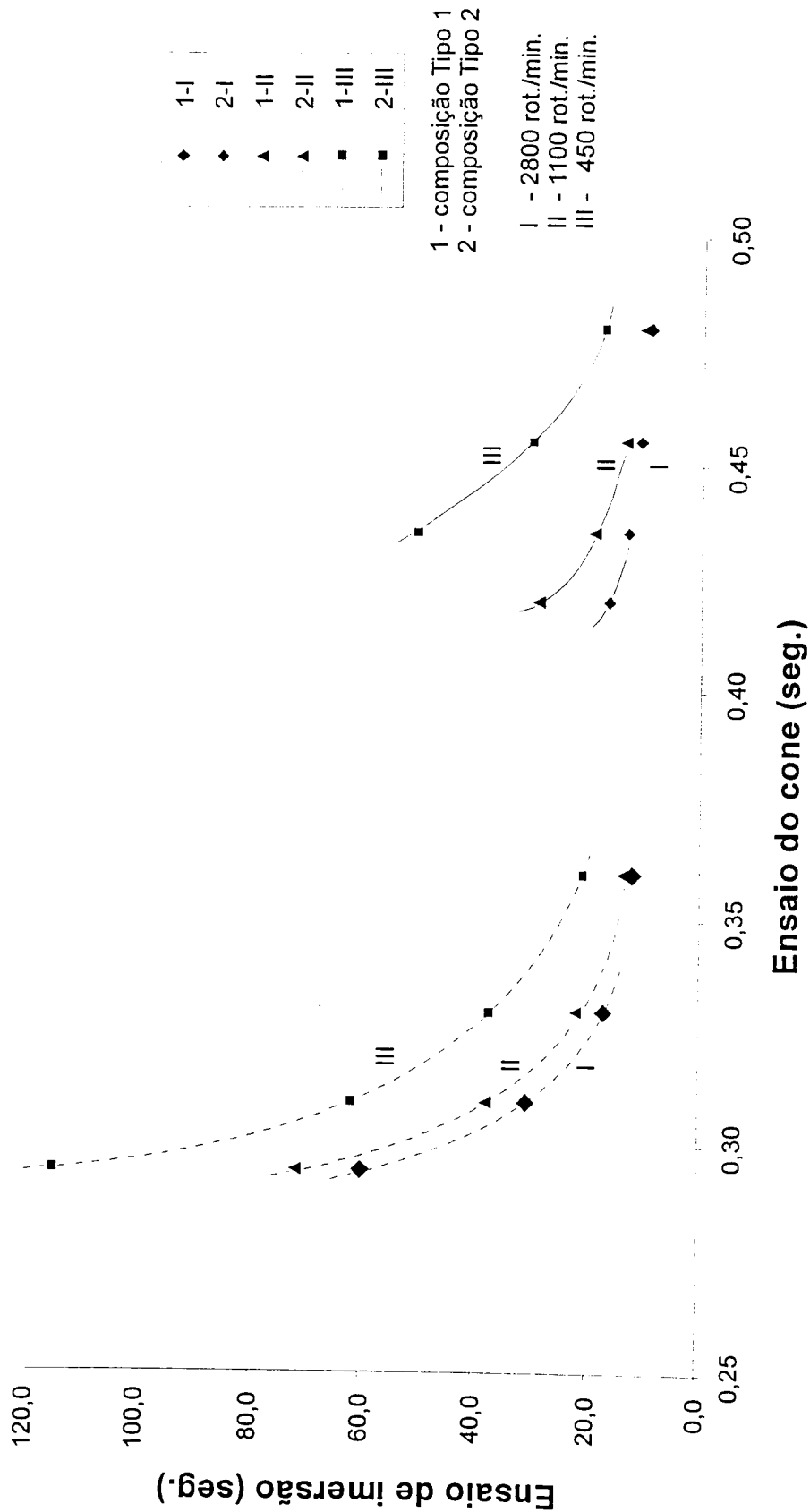


Gráfico 6.6 – Fluidez no ensaio do cone / razão A/C, para diferentes velocidades de rotação da misturadora.

Ensaio de imersão / Razão A/C

diferentes velocidades de rotação da misturadora

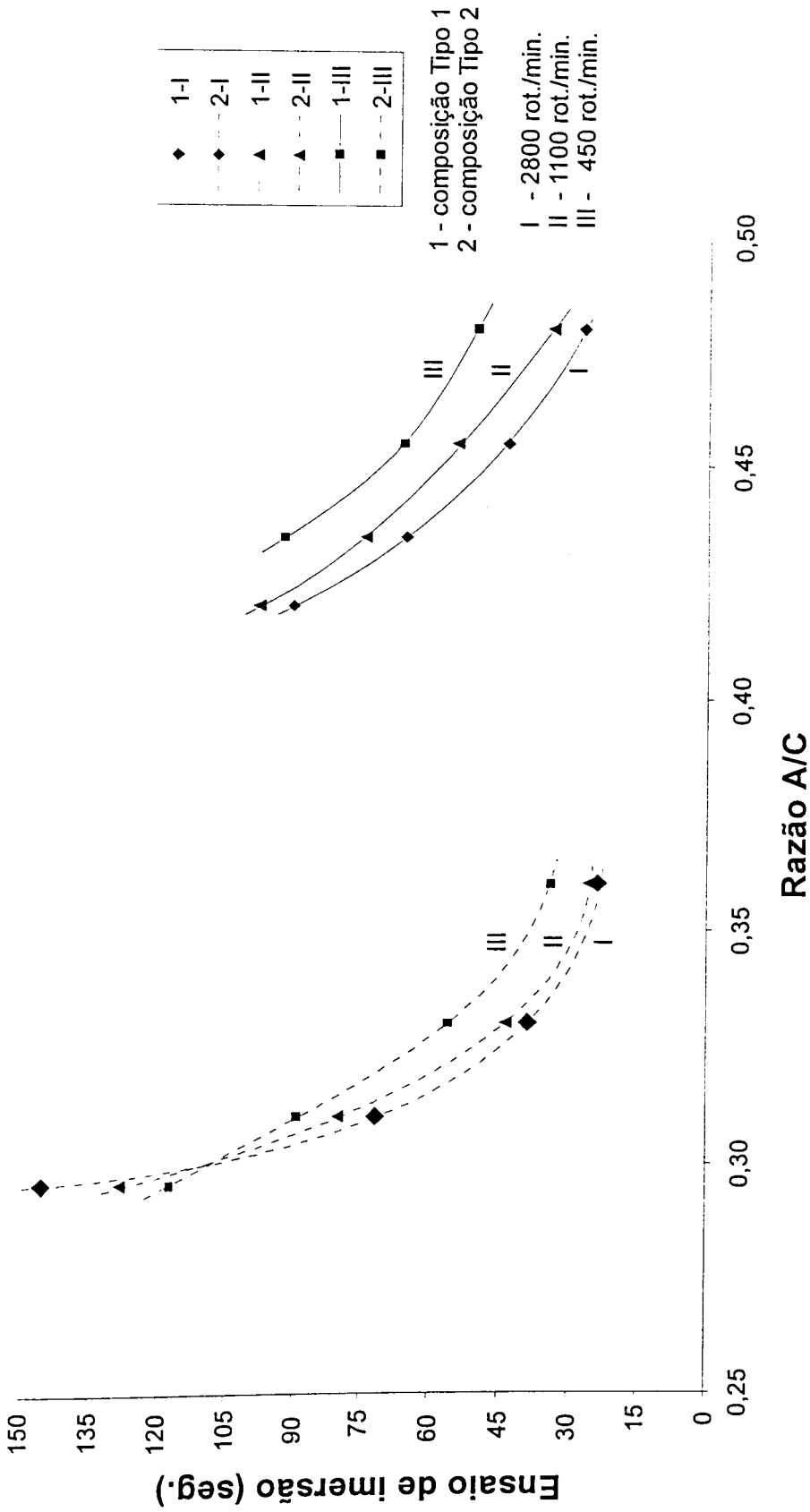
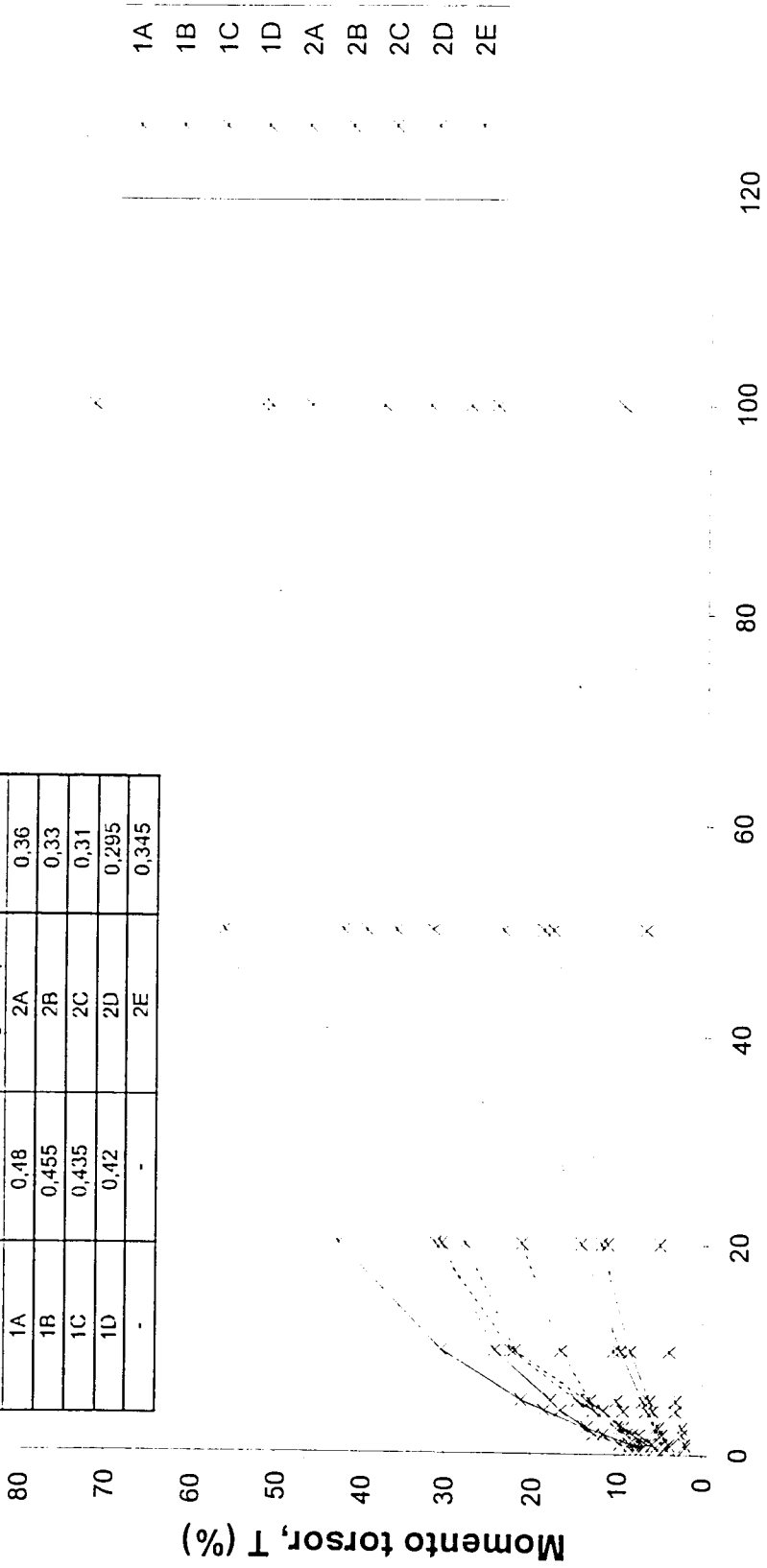


Gráfico 6.7 – Fluidez no ensaio de imersão / razão A/C, para diferentes velocidades de rotação da misturadora.

Velocidade de rotação / Momento torsor diferentes velocidades de rotação da misturadora

Composição - Tipo 1 (cim. + água)		Composição - Tipo 2 (cim. + água + 2%SK163)	
Desig. Comp.	Razão A/C	Desig. Comp.	Razão A/C
1A	0,18	2A	0,36
1B	0,455	2B	0,33
1C	0,435	2C	0,31
1D	0,42	2D	0,295
-	-	2E	0,345



Velocidade de rotação, Ω (rot./min.)

Gráfico 6.8 – Viscosímetro Brookfield: Velocidade de rotação / momento torsor.

Valores relativos da tensão de cedência / Razão A/C

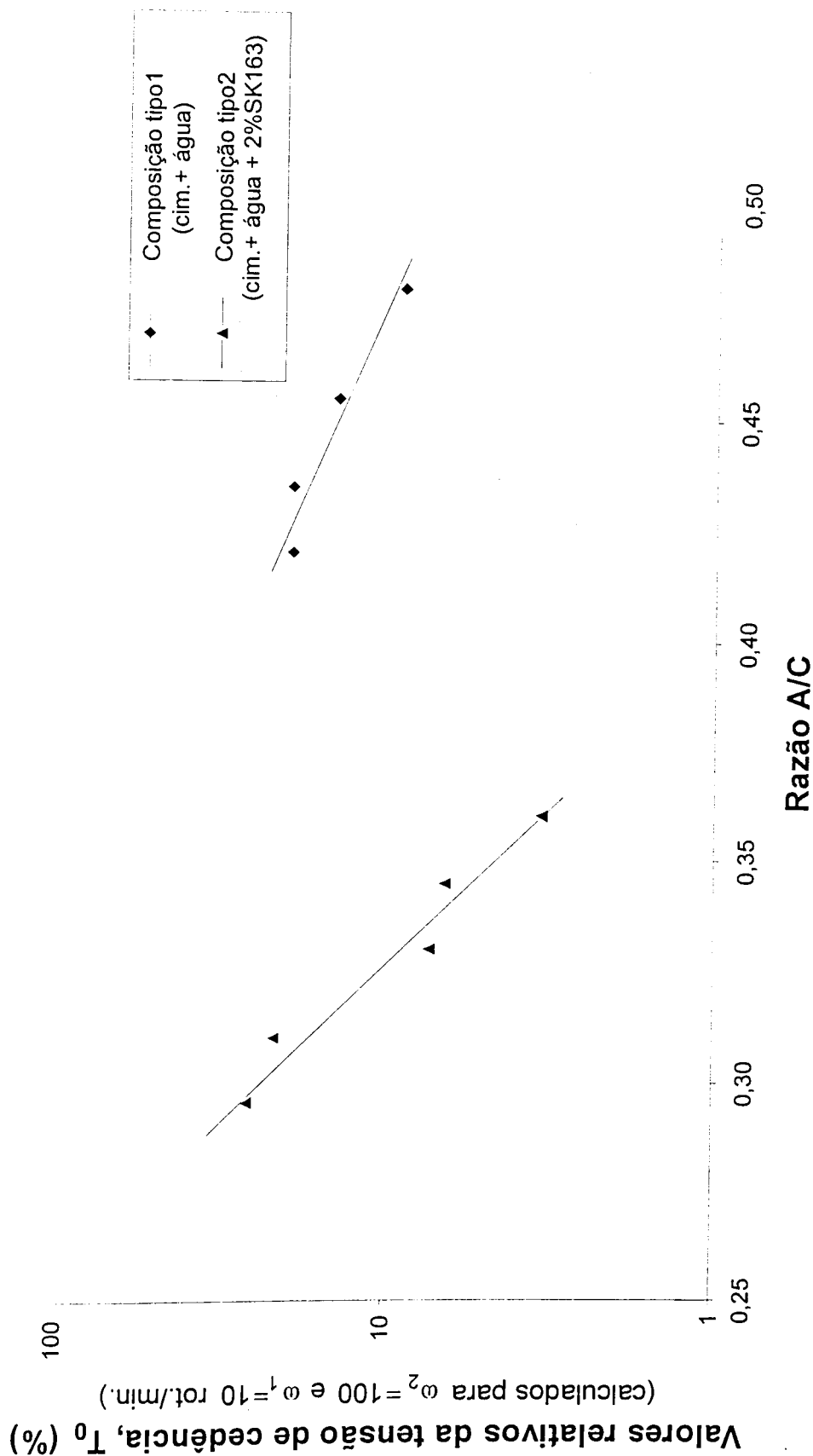


Gráfico 6.9 – Valores relativos da tensão de cedência em função da razão A/C.

Valores relativos da viscosidade / Razão A/C

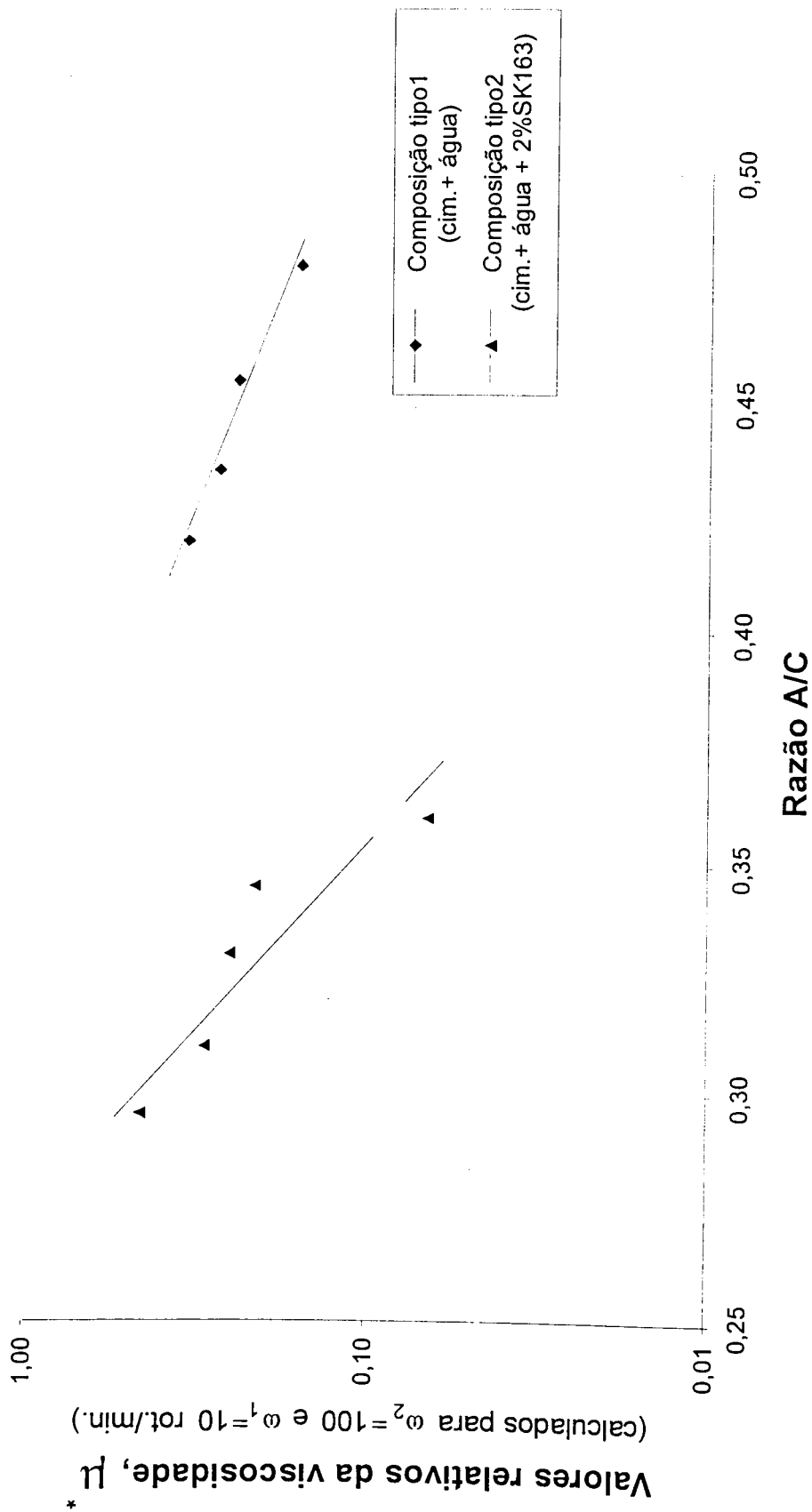


Gráfico 6.10 – Valores relativos da viscosidade em função da razão A/C.

Momento torsor ($\omega=0,5$ rot./min.) / Razão A/C

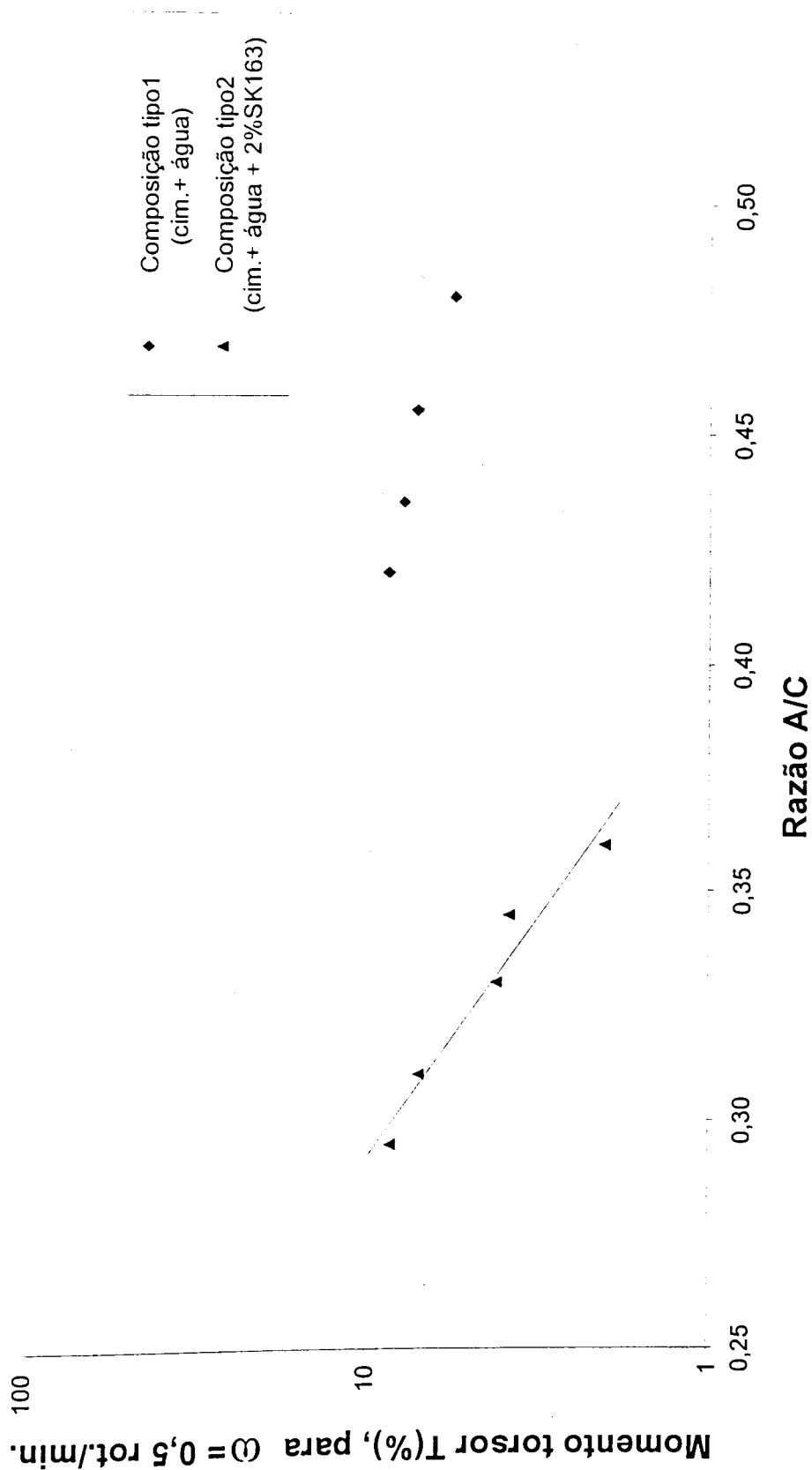


Gráfico 6.11 – Momento torsor para $\omega = 0,5$ rot./min . em função da razão A/C.

Valores relativos da tensão de cedência / Razão A/C

Correspondência de fluidez entre composições

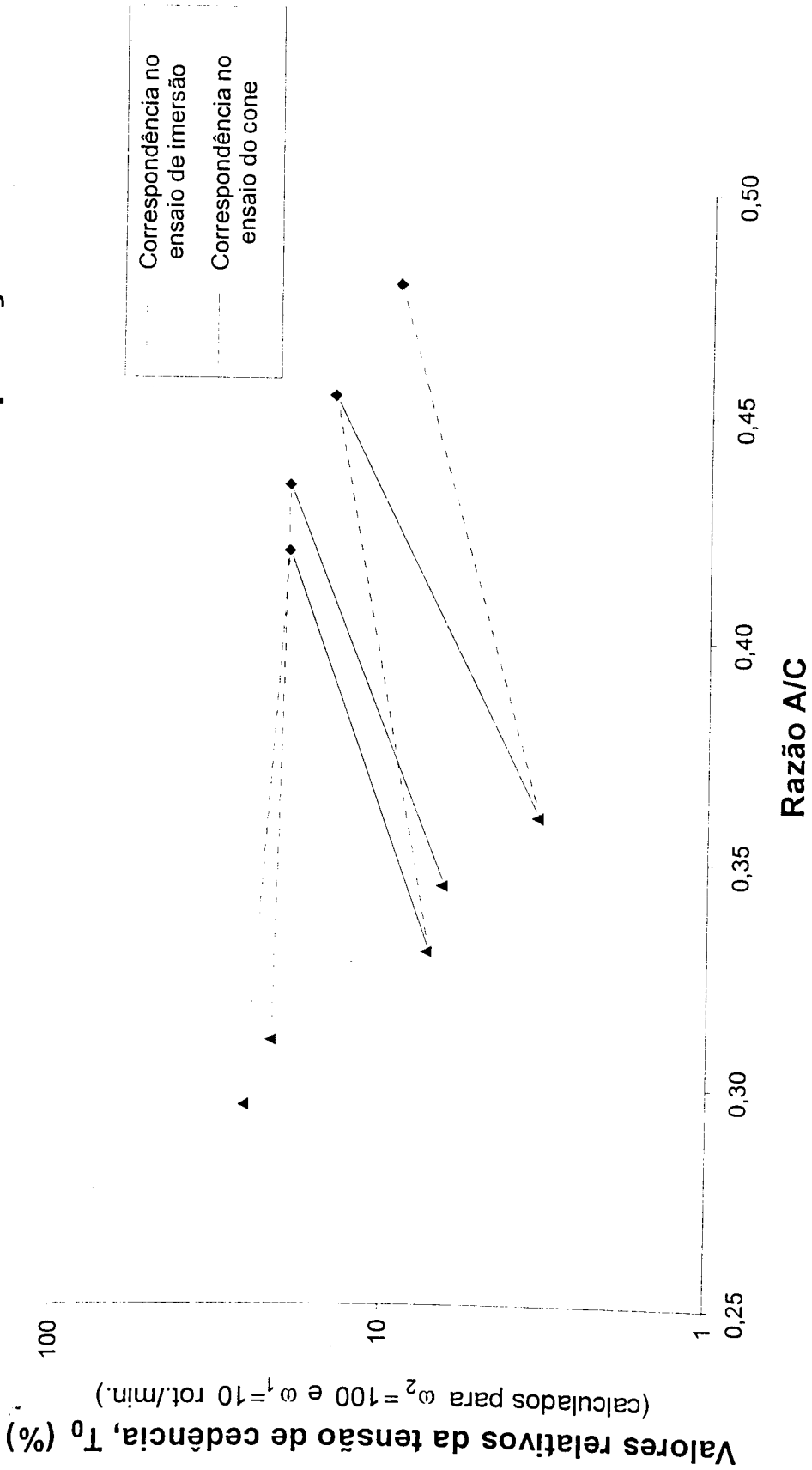


Gráfico 6.12 – Correspondência de fluidez entre composições, no gráfico “valores relativos da tensão de cedência em função da razão A/C”.

Valores relativos da viscosidade / Razão A/C

Correspondência de fluidez entre composições

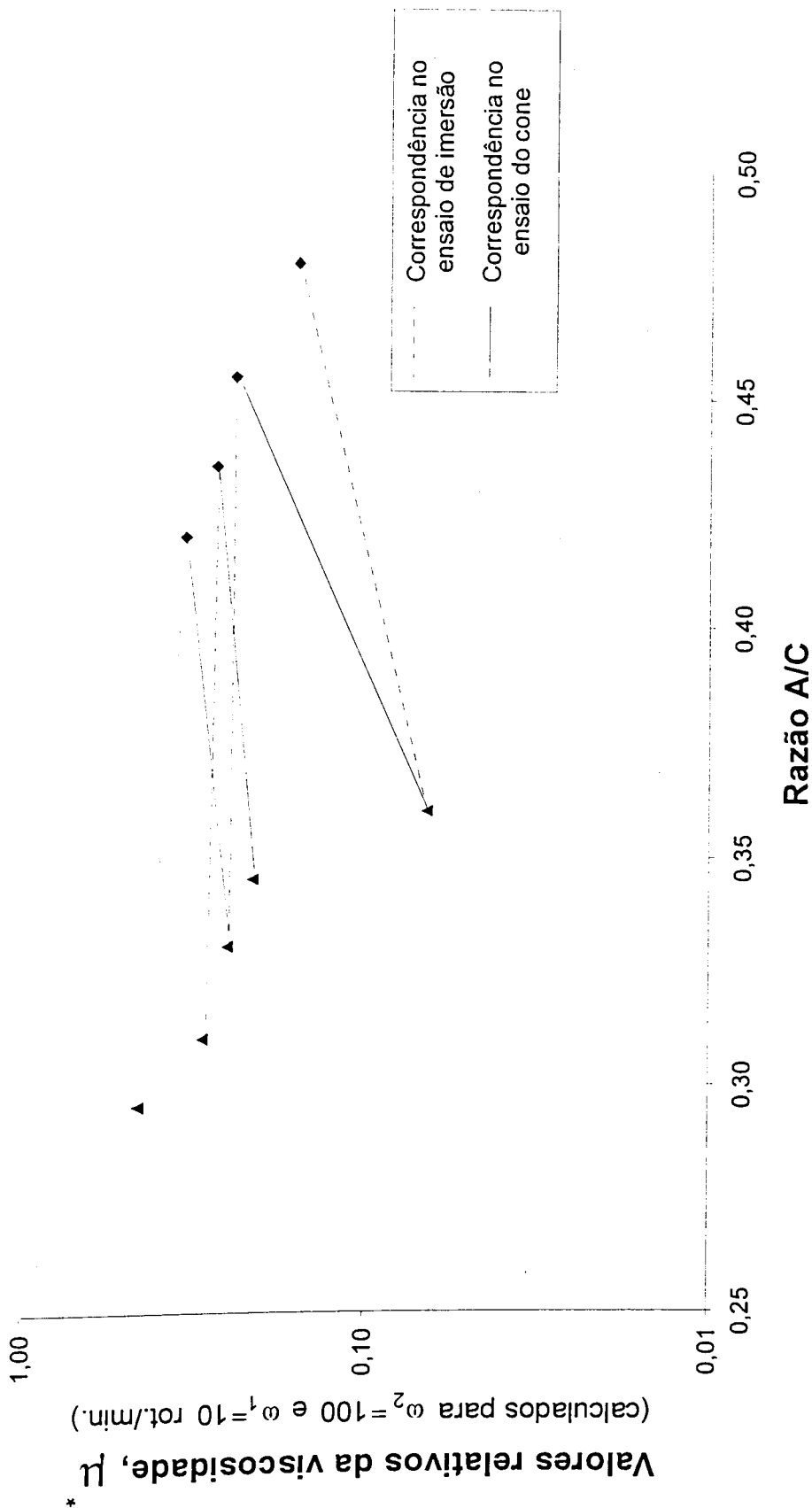


Gráfico 6.13 – Correspondência de fluidez entre composições, no gráfico “valores relativos da viscosidade em função da razão A/C”.

Momento torsor ($\omega = 0,5 \text{ rot./min.}$) / Razão A/C

Correspondência de fluidez entre composições

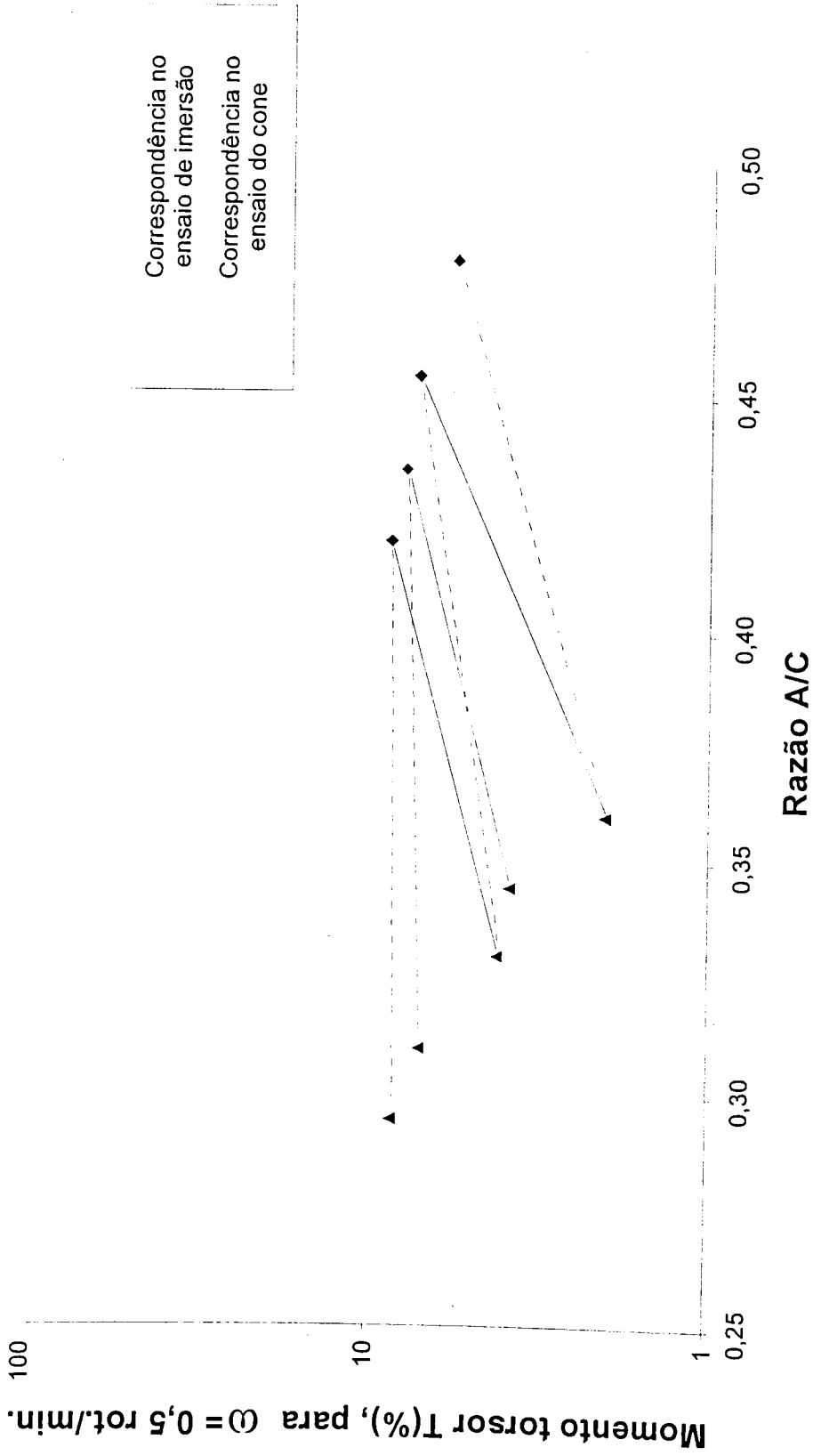


Gráfico 6.14 – Correspondência de fluidez entre composições, no gráfico “momento torsor ($\omega = 0,5 \text{ rot./min.}$) em função da razão A/C”.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na exposição que agora se conclui procurou-se estudar uma série de propriedades das caldas de injeção das bainhas de pré-esforço, com recurso a investigação experimental, dando-se particular destaque ao estudo da injectabilidade e sua correlação com a fluidez medida quer pelo ensaio do cone Marsh quer pelo ensaio de imersão.

Apresenta-se em seguida uma síntese dos estudos desenvolvidos e das considerações mais revelantes, bem como das conclusões relativas a cada um dos temas analisados em cada capítulo.

No Capítulo 1 foi feita uma introdução teórica à reologia das caldas de cimento e aos métodos de determinação dos parâmetros característicos do comportamento reológico das caldas. Na parte final deste capítulo foi feito um resumo de estudos já efectuados por diversos autores quanto aos efeitos sobre os parâmetros reológicos das caldas de cimento da variação de alguns factores como as condições de amassadura, a concentração da mistura, a finura e composição do cimento, a utilização de adjuvantes (principalmente superplastificantes) e a utilização de adições (cinzas volantes e sílica de fumo). Este resumo destina-se a permitir no Capítulo 6, através da realização de ensaios de caracterização reológica das caldas, uma melhor interpretação e o reforço das conclusões obtidas nos Capítulos 4 e 5.

No Capítulo 2 foi feito um estudo comparativo inicial com base bibliográfica da normalização inicial de alguns países e da FIP sobre estas caldas de injeção, tendo como estrutura de comparação e como referência a normalização europeia actual sobre especificações para caldas de injeção correntes (EN 447) e sobre procedimentos para injeção (EN 446). É verificado que as normas europeias actuais têm um conteúdo semelhante à normalização anterior, embora mais completas, abrangendo praticamente todos os temas contidos nas diferentes normas anteriores, e com algumas diferenças em questões consideradas de pormenor, tratando-se mais de uma harmonização de normalização a nível europeu do que de novas normas no sentido de novo conteúdo.

Neste capítulo é também apresentado um estudo comparativo posterior, realizado nos mesmos moldes no que se refere à estrutura de comparação e à referência à normalização europeia actual (EN 446 e EN 447) do conteúdo do Boletim nº 20 da FIB recentemente publicado (Julho 2002) intitulado "Grouting of tendons in prestressed concrete". Este boletim foi elaborado na sequência da constatação de alguns insucessos nas operações de injeção detectados nas inspecções realizadas na década de 90 por intrusão física (endoscopia) principalmente em pontes. Verifica-se que neste boletim, publicado pela FIB como "State-of-art guidelines", é considerada a utilização de novos sistemas de protecção [remetendo para um outro boletim da FIB (nº 11 – Janeiro 2001) os novos sistemas sem a utilização de caldas de cimento], de planos sistemáticos de controlo e de um conjunto de disposições diferentes quanto aos procedimentos para injeção. No que se refere aos métodos de ensaio e especificações para caldas de injeção correntes, a principal diferença, considerada determinante no sentido de corrigir os defeitos da prática anterior, consiste na substituição do ensaio de exsudação anterior, considerado não representativo das condições reais de injeção, por novos ensaios de exsudação e pela diminuição significativa do limite máximo admissível para os resultados dos ensaios (de 2,0% para 0,3%). Para serem considerados representativos das condições reais de injeção os novos ensaios de exsudação propostos são realizados em tubos de grande dimensão (diâmetro de 80 mm e comprimento de 1,5 m – tubo vertical ou 5 m – tubo inclinado) e sempre com cordões de pré-esforço no seu interior, pois a presença destes cordões de aço permite a passagem de qualquer água exsudada, que sobe até à superfície, sendo este efeito desestabilizador a principal diferença relativamente aos ensaios anteriores (com provetas de vidro ou plástico com capacidade de 100 ml), que se verificou falharem na identificação de caldas potencialmente instáveis. Por outro lado é dado menor relevo à resistência à compressão, remetendo-se, apenas como orientação, para as exigências anteriores.

No Capítulo 3 é apresentado o controlo efectuado às caldas de injeção das bainhas de pré-esforço da obra de construção da Ponte de S. João (ponte ferroviária sobre o rio Douro) e seus acessos (Devesas – Campanhã). É feita também a análise da evolução da composição das caldas, das respectivas causas e seus efeitos.

Assim, verificou-se que as caldas correspondentes às composições-tipo 1 apresentavam valores satisfatórios da resistência à compressão (43 MPa aos 28 dias),

mas exsudações muito elevadas – valor médio de 2,6%, para uma fluidez média de 11,4 seg. medida no ensaio do cone.

Ao adoptar as composições-tipo 2, que diferem das anteriores fundamentalmente pela utilização de cimento de fabrico corrente em vez de cimento com moagem especial mas embalado na obra, verificou-se que se podiam utilizar razões A/C mais baixas, com injectabilidades semelhantes. Verificou-se que se passou da relação A/C média de 0,42 para 0,38, apresentando estas caldas referentes às composições-tipo 2 uma resistência à compressão aos 28 dias com o valor médio de cerca de 47 MPa, uma exsudação média de 1,9% e uma fluidez média de 12,6 seg (ensaio do cone).

A passagem das composições-tipo 2 para as composições-tipo 3 resultou da modificação das condições de amassadura das caldas por substituição da misturadora inicial de baixa velocidade de rotação por uma misturadora de rolos de elevada velocidade de rotação. Aumentou-se a relação A/C média para 0,40, conseguindo-se uma melhor fluidez (10,2 seg. em vez de 12,6 seg.), uma ligeira melhoria na exsudação média (1,8% em vez de 1,9%) e uma ligeira quebra na resistência média à compressão aos 28 dias (44 MPa em vez de 47 MPa).

Ao adoptarem-se as composições-tipo 4 em resultado da mudança do tipo de adjuvante de expansivo para retentor de água, com uma dosagem de 1,2% da massa do ligante, verificou-se uma profunda alteração nas características das caldas. Melhorou excepcionalmente a exsudação que dos elevados valores médios das composições-tipo anteriores (2,6%, 1,9% e 1,8%), muito próximos do limite de 2,0% aceite internacionalmente, passou para 0,0%. Aliás foi esta uma das razões da mudança do adjuvante, para além de o adjuvante expansivo conter pó de alumínio, gerador de bolhas de hidrogénio que facilitam a fragilização do aço de pré-esforço que as caldas envolvem. Porém, pioraram as restantes características, apresentando estas caldas uma resistência média de 27 MPa aos 28 dias (inferior à recomendação internacional de 30 MPa) e de 21 MPa aos 7 dias (superior à recomendação nacional de 17 MPa) e ainda uma fluidez média de 40,3 seg. No entanto este valor excessivo do resultado do ensaio de fluidez medido no ensaio do cone não teve reflexos aparentes na injectabilidade das caldas, visto ter-se conseguido a sua injeção nas mesmas condições e com os mesmos equipamentos que as composições-tipo anteriores. Esta constatação é que esteve na origem da realização do presente trabalho.

A utilização das composições-tipo 5 e 6 resultaram de erros na medição do adjuvante de composições englobadas nas composições-tipo 4: as composições-tipo 5 têm 0,6% de adjuvante e as composições-tipo 6 têm 0,3% de adjuvante. Estas composições-tipo 5 e 6 apresentam resistência média aos 28 dias de cerca de 32 MPa, fluidez média de 25 seg., mantendo-se a exsudação nula.

Aproveitando as indicações destes erros de medição do adjuvante, de que com um teor inferior de adjuvante se consegue uma melhoria ligeira das propriedades das caldas, mantendo-se ainda nula a exsudação, resolveu-se adoptar uma última composição-tipo (7), que difere da composição-tipo 4 fundamentalmente pela dosagem de adjuvante de 1,0% em vez de 1,2% (valor médio recomendado pelo fabricante) e uma razão A/C mais baixa (0,44 em vez de 0,51). Estas composições-tipo 7 apresentaram valores médios de resistência à compressão aos 28 dias de 33 MPa, fluidez de 36,6 seg. e exsudação nula.

Este Capítulo 3 foi apresentado a título exemplificativo de uma aplicação concreta destas caldas de injeção, atendendo à experiência adquirida pelo autor deste trabalho na obra da Ponte Ferroviária sobre o rio Douro (Porto).

Verifica-se que a evolução registada nas composições se enquadra nas actuais recomendações, constantes do Boletim nº 20 da FIB, dando-se maior importância à redução da exsudação do que à obtenção de melhores resistências mecânicas, no sentido de se conseguir uma efectiva protecção do aço de pré-esforço.

No Capítulo 4 é apresentado parte do trabalho realizado pelo autor desta tese no "Laboratoire Central des Ponts et Chaussées – LCPC, Paris", no qual foi feita a comparação de dois métodos de ensaio para medição da fluidez das caldas – método do cone (origem francesa) e método de imersão (origem alemã). Este estudo foi feito quantificando a relação que existe entre os resultados destes ensaios em diferentes tipos de caldas e complementarmente comparando esses resultados com os obtidos no ensaio de injectabilidade na coluna de areia (ensaio normalizado em França), medida quer pelo tempo de enchimento da coluna, quer pelo caudal de calda instalado após o enchimento da coluna.

As conclusões extraídas deste estudo são várias:

1ª) Não há uma relação única entre a fluidez medida pelo ensaio do cone e pelo ensaio de imersão, mas sim várias relações, consoante o tipo de composição da calda estudada.

2ª) Verifica-se uma relação única entre a fluidez e a injectabilidade, independentemente do tipo de composição da calda estudada, mas apenas se a fluidez fôr medida pelo ensaio de imersão e a injectabilidade pelo caudal de calda escoada.

3ª) A conclusão anterior permite inferir que o ensaio de imersão mede uma fluidez que tem uma boa correlação com a injectabilidade das caldas, permitindo concluir que o ensaio de imersão “mede” também directamente a injectabilidade das caldas.

O ensaio do cone mede uma fluidez que apenas tem boa correlação com a injectabilidade para o mesmo tipo de composição das caldas. Modificando-se o tipo de composição deixa de se verificar esta boa correlação, significando isto que o ensaio do cone não mede directamente a injectabilidade das caldas.

4ª) Assim, recomenda-se que quando se procede ao estudo de composição de caldas, com experimentação de diferentes adjuvantes, ou de um mesmo adjuvante, mas com dosagens diferentes, ou ainda de caldas com ou sem adjuvante, se faça a medição da fluidez através do ensaio de imersão, pois está-se a medir directamente a injectabilidade das caldas.

Quando se está a controlar em obra uma calda já estudada, pode-se utilizar o ensaio do cone para medir a fluidez, pois trata-se da mesma composição-tipo. Esta possibilidade é concerteza de ter em conta pois a realização do ensaio do cone é muito mais prática do que a do ensaio de imersão, principalmente em obra, devido aos maiores condicionalismos na realização do ensaio de imersão (necessidade de garantia da verticalidade do tubo, equipamento mais pesado, etc.).

No Capítulo 5 é apresentado o trabalho realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais da FEUP para confirmação das conclusões obtidas nos ensaios efectuados no LCPC, anteriormente referidos.

Esta necessidade de confirmação deve-se ao facto de os ensaios de imersão realizados no LCPC, em virtude de não se dispôr de equipamento normalizado, terem sido efectuados de um modo improvisado, embora comparável, baseado no mesmo princípio do ensaio normalizado. O Laboratório de Ensaio de Materiais adquiriu esse equipamento para a realização deste estudo.

Para além da realização destes ensaios de medição da fluidez de acordo com as normas, foi também feita neste laboratório a afinação mais completa das condições de realização do ensaio de injectabilidade de caldas de injeção correntes das bainhas de pré-esforço. por adaptação do ensaio de injectabilidade na coluna de areia, normalizado em França para formulação de caldas de injeção para pequenas fissuras, aplicável a todos os produtos de reparação das estrutura de betão por injeção.

A adaptação destas condições constitui, praticamente, uma proposta de método de ensaio para medição da injectabilidade das caldas de injeção das bainhas de pré-esforço. As principais diferenças das condições de ensaio relativamente ao ensaio normalizado em França (NF P18-891) são as seguintes:

1ª) Utilização de esferas de aço de rolamentos, com diâmetro de 5,6 mm, em vez da areia calibrada 0,63 – 1,25 mm, para enchimento da coluna.

2ª) Pressão de injeção de 0.60 kgf/cm², em vez de 0,75 kgf/cm².

3ª) Utilização de malhas quadradas de abertura 2 mm dobradas em forma aproximadamente semi-esférica colocadas nas extremidades da zona das esferas dentro da coluna. para impedir a obturação pelas esferas da entrada e saída da calda da coluna, em vez de discos de malha com abertura de 0,5 mm.

4ª) Passagem de toda a calda através de um peneiro (nº 12 ASTM – abertura 1,68 mm) imediatamente após o seu fabrico e previamente à realização dos ensaios de fluidez e injectabilidade.

5ª) Medição do tempo de enchimento da coluna e do caudal de calda instalado após o enchimento da coluna, em vez de tempos de enchimento parciais e total da coluna.

6ª) Utilização de um recipiente metálico que é simultaneamente o reservatório de injeção, em vez de colocar o recipiente metálico dentro do reservatório de injeção.

As conclusões extraídas deste capítulo confirmam as obtidas no Capítulo 4, reforçadas com o estudo analítico das curvas de correlação das propriedades em causa (fluidez/injectabilidade) e ainda com a conclusão obtida nos ensaios finais de que a relação única entre a fluidez e a injectabilidade, independentemente do tipo de composição de calda estudada, se verifica quando a fluidez é medida pelo ensaio de

imersão e a injectabilidade quer pelo tempo de enchimento da coluna quer pelo caudal de calda, e não só pelo caudal de calda como se havia concluído no Capítulo 4. Isto permite concluir com mais confiança que o ensaio de imersão mede directamente a injectabilidade das caldas.

Como justificação para o entendimento destes factos, admite-se que o ensaio de imersão para medição da fluidez traduz melhor as condições de injeção das caldas do que o ensaio do cone. De facto, a fluidez medida no ensaio do cone está associada à maior ou menor facilidade do escoamento da calda através de um orifício ($\phi = 10$ mm), enquanto que a fluidez medida no ensaio de imersão está associada à maior ou menor facilidade de subida da calda dentro do tubo através da folga entre o corpo imersor e o tubo (1,9 mm em todo o contorno circular), quando o corpo imersor desce dentro do tubo com calda. Estas condições de escoamento da calda no ensaio de imersão são mais semelhantes à injeção da calda no interior de uma bainha em volta do cabo de aço.

No Capítulo 6 foi feito o estudo reológico das caldas de injeção das bainhas de pré-esforço. Inicialmente foram realizadas no LEM-FEUP alguns ensaios prévios para se escolherem de duas composições-tipo com comportamentos nitidamente diferentes constatados no Capítulo 5 (uma sem adjuvante e a outra com 2% de um superplastificante usado como redutor de água), quais as diferentes dosagens a utilizar, correspondentes a diferentes composições, para se estudarem “reologicamente”. Escolheram-se diversas composições de cada composição-tipo, com o critério de se verificar correspondência de fluidez entre algumas destas composições, quer em termos do ensaio de imersão, quer do ensaio do cone.

Os ensaios de caracterização reológicos das caldas foram realizados com um viscosímetro Brookfield no laboratório do Polo da Amieira do Instituto Geológico e Mineiro. Para cada composição da calda foram aplicadas determinadas velocidades de rotação e medidos os correspondentes momentos torsores que é necessário aplicar. A partir destas medições calcularam-se valores relativos da tensão de cedência e da viscosidade plástica das diferentes caldas (a determinação dos valores absolutos exigiria equipamento complementar não disponível).

Comparando os resultados obtidos para cada composição-tipo (com ou sem adjuvante superplastificante) verificou-se que se confirmaram as observações de

diversos autores indicados no Capítulo 1, particularmente o efeito sobre os valores dos parâmetros reológicos (tensão de cedência e viscosidade plástica) da adição de um superplastificante (analisado em 1.2.6.5 – Gráficos 1.22 e 1.23) e da variação da concentração da mistura, isto é da variação da razão A/C (analisado em 1.2.6.2 – Gráfico 1.17), constituindo uma certa validação dos resultados obtidos. Verificou-se complementarmente que a variação dos parâmetros reológicos com a razão A/C é mais intensa nas caldas com superplastificante usado como redutor de água. Comparando também os valores que assumem os parâmetros reológicos nas caldas das duas composições-tipo (com ou sem adjuvante) com igual fluidez medida pelo ensaio do cone ou pelo ensaio de imersão, verifica-se que:

- a) Caldas de diferentes composições-tipo (com ou sem superplastificante) que tenham a mesma fluidez medida pelo ensaio de imersão têm valores da viscosidade plástica e da tensão de cedência relativamente próximos.
- b) Caldas de diferentes composições-tipo (com ou sem superplastificante) que tenham a mesma fluidez medida pelo ensaio do cone, têm valores da tensão de cedência que são bastante diferentes, sendo os valores da viscosidade plástica não muito diferentes, mas menos próximos do que os observados na alínea a).

Conclui-se existir uma melhor correlação entre a fluidez medida pelo ensaio de imersão e os parâmetros reológicos das caldas, do que quando a fluidez é medida pelo ensaio do cone em que a correlação é particularmente má com a tensão de cedência.

Esta melhor correlação da fluidez medida pelo ensaio de imersão com os parâmetros reológicos das caldas associada à melhor correlação com os resultados do ensaio de injectabilidade na coluna de areia, verificada nos Capítulos 4 e 5, permite concluir reforçadamente que a fluidez medida pelo ensaio de imersão mede melhor a injectabilidade das caldas correntes nas bainhas de pré-esforço do que a fluidez medida pelo ensaio do cone. Esta conclusão é legítima atendendo à confiança existente no ensaio de injectabilidade na coluna de areia como representativo das condições reais de injeção em obra, atestada pela oficialização do ensaio em França em 1986 e a sua utilização sem reservas desde então.

Na parte final deste capítulo é procurada a compreensão destes resultados à luz da teoria da reologia das caldas. À semelhança da determinação da trabalhabilidade nos betões com ensaios empíricos de uma só medição, estes ensaios pretendem medir a

injectabilidade das caldas com a determinação empírica da fluidez com uma só medição, e, portanto, em condições fixas de velocidade de deformação angular, isto é, em determinadas condições de corte.

Como as caldas e os betões têm comportamento reológico dado pela lei de Bingham, para determinação do seu comportamento é necessária a consideração de duas velocidades de deformação angular e portanto de ensaios com duas determinações em condições de corte diferentes. Porém, estes ensaios simples com uma só determinação poderão fornecer resultados de fluidez utilizáveis se a velocidade de deformação angular no ensaio for semelhante à velocidade de deformação angular efectiva em obra. Admite-se que isto possa acontecer para o ensaio de imersão, tendo em conta a semelhança física do tipo de escoamento verificado pelas caldas no ensaio de imersão ao subirem dentro do tubo através da folga entre o imersor e o tubo, e no enchimento das bainhas ao avançarem no vazio existente entre o cabo de pré-esforço e a bainha. Para além desta semelhança física no tipo de escoamento da calda, regista-se mais proximidade nas velocidades de escoamento da calda no enchimento das bainhas de pré-esforço (5 a 15 m/minuto) com a velocidade de escoamento da calda no ensaio de imersão (2,8 a 7,4 m/minuto) do que no ensaio do cone (31 a 76 m/minuto). Admite-se, assim, que as condições de corte no ensaio de imersão são semelhantes às condições de corte no enchimento das bainhas de pré-esforço, o que não se poderá considerar com o ensaio do cone, sendo esta a razão para se considerar que o ensaio de imersão, apesar de ser um ensaio empírico com uma só medição, mede convenientemente a injectabilidade das caldas nas bainhas de pré-esforço.

Sobre o prosseguimento dos estudos que se referem nesta dissertação propõem-se duas linhas de acção: uma primeira debruçar-se-ia sobre o fenómeno da exsudação à luz dos novos ensaios de exsudação propostos no Boletim nº 20 da FIB, que foram determinantes na identificação de caldas inadequadas, que nos ensaios de exsudação anteriores eram consideradas adequadas, tendo dado origem a problemas em obra recentemente detectados; uma segunda linha de acção faria a análise da influência do elemento tempo na determinação dos valores dos parâmetros reológicos das caldas, na sequência do referido no Capítulo 1 (1.2.4) sobre tixotropia e anti-tixotropia das caldas.

Para a primeira linha de acção futura seria feita a montagem no LEM-FEUP dos equipamentos para execução dos novos ensaios de exsudação previstos no Boletim nº 20 da FIB – tubo inclinado e tubo vertical (tubos transparentes, com cordões de aço de pré-esforço no interior). Far-se-iam ensaios de medição da exsudação através destes novos métodos e pelos métodos anteriores, para diversas composições de caldas e diversas condições de amassadura.

Com a comparação dos resultados procurar-se-ia identificar quais os factores determinantes do diferente comportamento das caldas nos dois tipos de ensaio (novos e anteriores), que eventualmente foram as causas da inadequada protecção dos aços de pré-esforço que foi detectada na década de 90, no exame efectuado a bainhas de pré-esforço em diversas obras de pontes.

Para efeito da segunda linha de acção proposta deverão ser realizados ensaios com o viscosímetro Brookfield sobre composições-tipo diversas, determinando as correspondentes curvas reológicas com velocidades de rotação crescentes e decrescentes, com diferentes intervalos de tempos de acção em cada velocidade de rotação, registando-se a variação dos valores dos momentos torsores durante esses intervalos de tempo. Com estes ensaios far-se-ia a caracterização do comportamento reológico das caldas determinando-se possíveis curvas de histerese no diagrama ($\tau ; \dot{\gamma}$) e a sua reversibilidade, e ainda diagramas de variação do momento torsor com o tempo.

Feita a determinação de curvas de histerese, típicas do comportamento tixotrópico, se verificada a sua reversibilidade, far-se-ia a sua quantificação de acordo com o indicado no Capítulo 1.

Uma vez realizado o estudo da influência da tixotropia nas características reológicas das caldas, função do tempo, procurar-se-ia quantificar a sua relação com os resultados dos ensaios de medição da fluidez (imersão e cone) e da injectabilidade na coluna de areia, para analisar as correlações existentes.

Considera-se esta análise complementar do trabalho realizado, pois estuda este assunto num outro plano com a introdução do factor tempo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TATTERSALL, G. H. e BANFILL, P.F.G. (1983) - "The Rheology of Fresh Concrete", Ed. Pitman Advanced Publishing Program, Boston - London - Melbourne, 347 p.p.
- [2] NOVAIS BARBOSA, J. (1985) - "Mecânica dos Fluidos e Hidráulica Geral", 1º volume, Ed. Porto Editora, Lda - Porto, p.p. 18-44
- [3] PAPADAKIS, M. (1955) - "Rhéologie des Suspensions de Ciment", Publication Technique de CERILH, nº 72, 48 p.p.
- [4] MILTIADOU, A.E. (1991) - "Étude des coulis hydrauliques pour la réparation et le renforcement des structures et des monuments historiques en maçonnerie". Ed. LCPC - Série ouvrages d'art OA8 - 278 p.p.
- [5] CHONG HU (1995) - "Rhéologie des bétons fluides". Ed. LCPC - Série ouvrages d'art OA16 - 202 p.p.
- [6] GREEN, H. (1949) - "Industrial rheology and rheological structures", Ed. John Wiley and Chapman & Hall, New York-London.
- [7] BANFILL, P.F.G. (1981) - "A viscosimetric study of cement pastes containing superplasticisers with a note on experimental techniques", Magazine of Concrete Research, vol. 33, p.p. 37-47.
- [8] ROY, D.M. e ASAGA, K. (1979) - "Rheological properties of cement mixes: III The effects of mixing procedures on viscosimetric properties of mixes containing superplasticisers", Cement and Concrete Research - 9, p.p. 731-739.
- [9] LOBANOV, V.P. (1950) - "The visco-plastic properties of building mortars", Kolloidnuii Zhurnal, 12(5), p.p. 352-358.
- [10] ISH-SHALOM, M. e GREENBERG, S.A. (1960/1963) - "The rheology of fresh Portland cement pastes", Proceedings of the 4th International Symposium on Chemistry of Cement, Monograph 43, vol. 2, Washington DC, National Bureau of Standards, p.p. 731-748
- [11] PIERZCHALA, H. (1970) - "Rheologische Eigenschaften an Portland Zementpasten", Tonindustrie Zeitschrift und Keramische Rundschau, 94(8), p.p. 331-336.

- [12] RAFFLE, J.F. e KING, A. (1977) - "The effect of cellulose ethers and lignosulphonates on the setting and flow properties of cement suspensions", *Journal of physics D: Applied Physics*, 10, p.p. 33-41.
- [13] JONES, T.E.R. e TAYLOR, S. (1977) - "A mathematical model for the flow curve of cement paste", *Magazine of Concrete Research*, 29 (101), p.p. 207-212.
- [14] VOM BERG, W. (1979) - "Influence of specific surface and concentration of solids upon the flow behaviour of cement pastes", *Magazine of Concrete Research*, vol. 31, p.p. 211-216.
- [15] BOMBLED, J.P. (1980) - "Influence of sulphates on the rheological behaviour of cement pastes and their evolution". *Proceedings of 7th International Congress on the Chemistry of Cements*, Vol. III, Paris, Editions Septima, p.p. VI-164 e VI-169.
- [16] IVANOV, Y. e STANOEVA, E. (1979) - "Influence of cement composition and other factors on the rheological behaviour of cement pastes", *Silicates Industriels*, 44, p.p. 199-203.
- [17] ASAGA, K. e ROY, D.M. (1980) - "Rheological properties of cement mixes: IV Effects of superplasticisers on viscosity and yield stress", *Cement and Concrete Research*, 10, p.p. 287-295.
- [18] ROY, D.M. e ASAGA, K. (1980) - "Rheological properties of cement mixes: V the effects of time on viscosimetric properties of mixes containing superplasticisers; conclusions", *Cement and Concrete Research*, 10, p.p. 337-344.
- [19] IVANOV, Y e ZACHARIEVA, S. (1980) - "Influence of fly-ash on the rheology of cement pastes", *Proceedings of 7th International Congress on the Chemistry of Cement*", vol. III, Paris, Ed. Septima, p.p. VI-103 a VI-107.
- [20] DIMOND, C.R. (1980) - unpublished internal report, Department of Building Science, University of Sheffield.
- [21] ODLER, I., BECKER, T.L. e WEISS, B. (1978) - "Rheological properties of cement pastes", *Il Cemento* - 75, p.p. 303-310.
- [22] SOUSA COUTINHO, A. (1988) - "Fabrico e Propriedades do Betão", *LNEC*, vol. 1, 2^a Edição, 401 p.p.

- [23] LNEC (1993) - "Adjuvantes para argamassas e betões - características e verificação da conformidade", Especificação E 374, Lisboa, 6 p.p..
- [24] BANFILL, P.F.G. (1982) - "An experimental study of the effect of pfa on the rheology of fresh concrete and cement paste", Proceedings of International Symposium on the Use of pfa in Concrete, Leeds, Ed. Cabrera, J.G. e Cusens, A.R., University of Leeds, p.p. 161-171.
- [25] HOBBS, D.W. (1980) - "The effect of pulverized-fuel ash upon the workability of cement paste and concrete", Magazine of Concrete Research, vol. 32, p.p. 219-226.
- [26] BROWN, J.H. (1980) - "The effect of two different pulverized-fuel ashes upon the workability and strenght of concrete", Cement and Concrete Association, Technical report nº 536, 18 p.p.
- [27] HELMUTH, R.A. (1986) - "Water-reducing properties of fly ash in cement pastes, mostars and concretes: causes and test methods", Proc. of the second Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, vol. 1, p.p. 723-741.
- [28] DOMONE, P.L. e TANK, S.B. (1986) - "Use of condensed silica fume in portland cement grouts", Proc. of the second Int. Conf. on fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, vol. 2, p.p. 1231-1260.
- [29] AİTCIN, P.C., BALLIVY, G. e PARIZEAU, R. (1984) - "The use of condensed silica fume in grouts", Innovative cement grouting ACI Special Publication SP-83, p.p. 1-17.
- [30] PCI COMMITTEE ON POST-TENSIONING (1972) - "Recommended Practice for Grouting of Post-Tensioned Prestressed Concrete", PCI Journal, p.p. 18-25.
- [31] SERVICE D'ETUDES TECHNIQUES DES ROUTES ET AUTOROUTES - SETRA/LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES - LCPC (1973) - "Directive Provisoire sur les Injections des gaines des ouvrages en béton précontraint", Ministère de l'Amenagement du Territoire, de l'Équipement, du Logement et du Tourisme, 42 p.p..

- [32] ASOCIACIÓN TÉCNICA ESPAÑOLA DEL PRETENSADO (INSTITUTO EDUARDO TORROJA DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEL CEMENTO) (1974) - "Recomendaciones para la ejecución y control de la inyección", 30 p.p..
- [33] FIP (1975) - "Guides To Good Practice, Practical Construction - grout and grouting of prestressed concrete", Cap. 3, p.p. 15-22.
- [34] REBAP (1983) - "Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado", D.L. nº 349/83, Imprensa Nacional, Lisboa.
- [35] BARROSO, M.J.G. (1969) - "Caldas de injeção à base de cimento - contribuição para o estudo da sua influência na resistência ao corte de maciços rochosos", tese apresentada a concurso para especialista, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Serviço de Barragens - Divisão de Fundações e Túneis, Lisboa, 201 p.p..
- [36] NP EN 445 (2000) - "Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço - Métodos de ensaio", Norma Portuguesa, IPQ, 19 p.p..
- [37] NP EN 446 (2000) - "Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço - Procedimentos para injeção", Norma Portuguesa, IPQ, 14 p.p..
- [38] NP EN 447 (2000) - "Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço - Especificações para as caldas de injeção correntes", Norma Portuguesa, IPQ, 10 p.p..
- [39] NP 2064 (1991) - "Cimentos - Definições, composição, especificações e critérios de conformidade", Norma Portuguesa, IPQ, 15 p.p..
- [40] NP EN 197-1 (2001) - "Cimento - Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes", Norma Portuguesa, IPQ, 35 p.p..
- [41] FIB-BULLETIN Nº 20 (2002) - "Grouting of tendons in prestressed concrete - Guide to good practice", Ed. International Federation for Structural Concrete (FIB), Lausanne, 48 p.p..
- [42] FIB-BULLETIN Nº 11 (2001) - "Factory applied corrosion protection of prestressing steel, state-of-art report", Ed. International Federation for Structural Concrete (FIB), Lausanne, 14 p.p..
- [43] NF P 18-891 (1986) - "Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique - Produits pour injection dans des structures en béton - Essai

- d'injectabilité à la colonne de sable en milieu sec et humide", Norma Francesa, 9 p.p..
- [44] NP EN 196-1 (1996) - "Método de ensaio de cimentos - Parte 1: Determinação das resistências mecânicas", Norma portuguesa, 29 p.p..
- [45] B.S. 4447 (1973) - "Specification for the performance of prestressing anchorages for post-tensioned construction", Norma inglesa, 9 p.p..
- [46] FIP - FEDERATION INTERNATIONALE DE LA PRECONTRAINTÉ (1981) - "Recommendations for acceptance and application of post-tensioning systems", 30 p.p..
- [47] RECOMMANDATIONS RILEM/FIP/CEB-RPC 8 (1979) - "Essai de fatigue sur armatures de précontrainte", Ed. RILEM, Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de recherches sur les Matériaux et les Constructions, 6 p.p..
- [48] DRAFT prEN 447 (1992) - "Grout for prestressing tendons - specification for common grout", norma europeia, 6 p.p..
- [49] VENUAT, M. (1972) - "Aditivos y tratamientos de morteros y hormigones", Editores Técnicos Asociados, S.A., Barcelona, p.p. 197-202.
- [50] LNEC (1988) - "Aditivos para as caldas de injeção de cimento para a ponte ferroviária sobre o rio Douro", Nota Técnica, Departamento de Materiais de Construção, Núcleo de Aglomerantes e Betões, Lisboa, 3 p.p..
- [51] ENQUIRY pr EN 445 (1991) - "Grout for prestressing tendons-test methods", norma europeia, 15 p.p..
- [52] DRAFT pr EN 445 (1992) - "Grout for prestressing tendons-test methods", norma europeia, 15 p.p..
- [53] LNEC (1979) - "Cimentos-determinação da resistência mecânica", Especificação E 29, Lisboa, 7 p.p..
- [54] SIKA (2000/01) - "Prontuário/Catálogo de fichas técnicas - Construir com Segurança", Edição nº 4, V.N. Gaia
- [55] DURIEZ, M. e ARRAMBIDE, J. (1961) - "Nouveau Traité de Matériaux de Construction", Ed. Dunod, Paris, 2ª edição, vol. I, pp. 975-1029.

[56]. BROOKFIELD - "More solutions to sticky problems", Ed. Brookfield Engineering Laboratories, Inc., Massachusetts, U.S.A..

ANEXO A

ESTUDO COMPARATIVO DE NORMALIZAÇÃO SOBRE CALDAS DE INJECCÃO DAS BAINHAS DE PRÉ-ESFORÇO

A1 - ESTUDO COMPARATIVO INICIAL

(QUADROS A1.1a A A2.9b)

A2 - ESTUDO COMPARATIVO POSTERIOR

(QUADROS A3.1 A A3.14)

A1 - ESTUDO COMPARATIVO INICIAL

(QUADROS A1.1a A A2.9b)

Quadro A1.1a - Estudo comparativo inicial de normalização: EN 447 com normalização pré-existente - parte 1

EN 446 e EN 447	PCI Committee on post-tensioning "Recommended practice for grouting of post-tensioned prestressed concrete"	SETRA - LCPC "Directive provisoire sur les injections de gaines des ouvrages en béton précontraint"
<p>1. EN 447 - ESPECIFICAÇÕES PARA AS CALDAS DE INJEÇÃO</p> <p>1.1. - <u>Materiais</u></p> <p>a) <u>Generalidades:</u> Teor de cloretos nas caldas $\leq 0,1\%$ da massa de cimento.</p>		
<p>b) <u>Cimento</u> Tipo CEM I (ENV 197-1) Nota: nalguns países membros do CEN é autorizada a utilização de cimentos com um teor até 20% de escória granulada de alto forno ou cinza volante</p>	<p>b) <u>Cimento:</u> cimento portland, tipo I, II ou III, conforme ASTM C150 O cimento deve ser fresco e não conter grumos ou outra indicação de hidratação. (cimento do tipo III é apenas utilizado para injeções em tempo frio)</p>	<p>b) <u>Cimento:</u> C.P.A. 325 - não apresente o fenómeno de falsa presa; - teor em cloretos $\leq 0,02\%$; - temperatura (na altura de fabrico da calda) $< 40^{\circ}\text{C}$ (a calda ficaria espessa rapidamente); - fornecido em sacos de 50 kg armazenados ao abrigo da humidade (dificuldade de pesar quando fornecido a granel).</p>
<p>c) <u>Água:</u> Deverá cumprir as exigências da Norma Europeia EN 1008</p>	<p>c) <u>Água:</u> - potável; - limpa; - isenta de impurezas em quantidades prejudiciais para o cimento portland ou para o aço de pré-esforço (cloretos, fluoretos, sulfitos e nitratos).</p>	<p>c) <u>Água:</u> - potável; - caso não seja possível (potável), fazer análise química prévia para se assegurar que não contém elementos susceptíveis de provocar corrosão dos aços. (- teor $\text{Cl}^- < 250 \text{ mg/litro}$; - isenta de detergentes).</p>
<p>d) <u>Adjuvantes:</u> - Deverão respeitar as exigências da Norma Europeia 934-4. - É autorizada a utilização de adjuvantes simples ou de misturas de adjuvantes.</p>	<p>d) <u>Adjuvantes:</u> - Não usar adjuvantes com cloretos (máx. de 0,5% da massa do adjuvante, assumindo 1 lb adjuv/96 lb cimento (1 saco), fluoretos, sulfitos e nitratos. - Pó de alumínio, gerador de H_2, ou outro gás aprovado podem ser usados para obter expansões da calda de 5 a 10%.</p>	<p>d) <u>Adjuvantes:</u> - Adjuvantes utilizados serão objecto de um "agrément" especial para caldas de injeção; (adjuvantes sem iões agressivos - cloretos, sulfuretos, nitratos; interdição de utilização de produtos que possam libertar hidrogénio).</p>

Asociación técnica española del pretensado/Instituto Eduardo Torroja "Recomendaciones para la ejecución y control de la inyección - H.P. 3-73"	FIP Guides to good practice-practical construction "Grout and grouting of prestressed concrete"	REBAP/RBLH
	<p>a) <u>Generalidades:</u> Teor de cloretos nas caldas: $\leq 750 \text{ mg Cl}^-/\text{litro calda}$ (Para A/C = 0,40:750 mg/l ~ 0,054% massa cimento).</p>	<p>a) <u>Generalidades:</u> Indicações gerais do RBLH para betões, argamassas ou caldas de injeção: Quantidades máximas de: - Halogenetos (Cl⁻): 0,0% da massa de ligante - Sulfuretos (S): 0,0% da massa de ligante - Sulfatos (SO₃): 3,5% da massa de ligante - Álcalis (Na₂O): 0,6% da massa de ligante</p>
<p>b) <u>Cimento:</u> - portland, tipo P-350; - idade ≤ 1 mês - temperatura $< 40^\circ\text{C}$</p>	<p>b) <u>Cimento:</u> - portland; - idade < 1 mês; - temperatura $\leq 40^\circ\text{C}$ - armazenado em local seco (- teor de Cl $\leq 0,1\%$, - superf. específica $\geq 270 \text{ m}^2/\text{kg} = 2700 \text{ cm}^2/\text{g}$; - temperatura do cimento elevada: reacção dos adjuvantes pode ser indevidamente acelerada; isto pode reduzir a expansão da calda dentro da bainha. Além disso acelera o endurecimento da calda).</p>	<p>b) <u>Cimento:</u> - de fabricação recente; - temperatura $< 40^\circ\text{C}$ (no momento da aplicação). - RBLH: indicações gerais para betões, argamassas e caldas.</p>
<p>c) <u>Água:</u> Não deverá conter substâncias prejudiciais para as armaduras activas ou para a própria calda de cimento, em particular: - ião cloro $\leq 250 \text{ mg/litro}$; - pH ≥ 7 - não apresentar vestígios de hidratos de carbono.</p>	<p>c) <u>Água:</u> - Se possível, de abastecimento público. - A água não deve conter ingredientes prejudiciais para o aço ou para a calda. Não deve conter: - iões Cl⁻ $> 500 \text{ mg/litro}$ - qualquer matéria orgânica. (Diferentes países estabelecem limites para teor em cloretos e sulfatos; O uso de água que não de abastecimento público depende de testes preliminares-calda feita com esta água e com água destilada: - tempo de presa não deve diferir mais de 25%; - tensão de rotura compressão aos 14 dias não deve variar mais que 5%).</p>	<p>c) <u>Água:</u> - RBLH: indicações gerais para betões, argamassas e caldas.</p>
<p>d) <u>Adjuvantes:</u> - Podem utilizar-se se se demonstrar, mediante ensaios adequados, que o seu emprego melhora as propriedades das caldas (indicadas em 1.2); - Em qualquer caso deverão estar isentos de substâncias prejudiciais para as armaduras ou para a própria calda. tais como cloretos, sulfatos ou nitratos</p>	<p>d) <u>Adjuvantes:</u> - Aceita-se o uso de adjuvantes se testes provam que o seu uso melhora as propriedades da calda (ex: aumentar trabalhabilidade, reduzir exsudação, introduzir ar, expandir a calda, ...) - Devem estar isentos de produtos prejudiciais para o aço ou a calda (ex: cloretos, nitratos, sulfatos, ...) (Pó de alumínio: há produção de hidrogénio, mas isto não faz perigar o aço devido ao efeito protector de FeO₃CaO; o pH deve ser > 9; segundo SZILARD, R-ACI Journal-January 1968, o pó de alumínio aumenta a aderência e reduz a exsudação; algumas publicações francesas mostram cepticismo quanto ao uso de pó de alumínio)</p>	<p>d) <u>Adjuvantes:</u> - RBLH: indicações gerais para betões, argamassas e caldas, particularmente: - Devem ter a sua utilização sancionada pela experiência; caso contrário devem ser submetidos a ensaios que provem a sua eficiência e inocuidade.</p>

EN 446 e EN 447	PCI Committee on post-tensioning "Recommended practice for grouting of post-tensioned prestressed concrete"	SETRA - LCPC "Directive provisoire sur les injections de gainés des ouvrages en béton précontraint"
e) <u>Inertes:</u>		e) <u>Inertes</u> - Elementos finos inertes: em caso excepcional da sua utilização devem satisfazer à Directive Provisoire 66 e além disso: - $D_{\text{máx.}} < 300 \mu\text{m}$ - massa minerais finos inertes/massa cimento $\leq 25\%$.
1.2 - <u>Propriedades das caldas</u> a) <u>Fluidez:</u> - Imediatamente após a mistura: Ensaio imersão $\geq 30''$ Ensaio cone $\leq 25'' (50'')$ * - 30 minutos após a mistura: Ensaio imersão $\leq 80'' (200'')$ * Ensaio cone $\leq 25'' (50'')$ * - À saída da bainha: Ensaio imersão $\geq 30''$ Ensaio cone $\geq 10''$ * Caldas de injeção preparadas em misturadoras com elevada velocidade de rotação	a) <u>Fluidez:</u> injectabilidade medida no cone de fluidez - U.S. Corps of Engineers Method CRD - C 79 ($\phi_{\text{saída}} = 1/2'' = 12,7 \text{ mm}$): - $t_{\text{escoamento}} \text{ cone} \geq 11''$, imediatamente após a amassadura; - ensaio do cone não aplicável a caldas que incorporem aditivos tixotrópicos.	a) <u>Fluidez:</u> característica essencial: $13'' \leq t_{\text{escoam.}} \text{ cone Marsh} \leq 25''$
b) <u>Exsudação:</u> $\leq 2\%$, ao fim de 3 horas	b) <u>Exsudação:</u> (são sugeridos correntemente em normas internacionais os seguintes limites para avaliar a aceitação da calda: - $\leq 2\%$ do volume, 3 horas após a amassadura; - máx. de 4%; - água exsudada deve ser reabsorvida passadas 24 horas)	b) <u>Exsudação:</u> - característica essencial: - $\leq 2\%$ ao fim de 3 horas (valor muito elevado para injeção de cabos de grande altura); - reabsorção completa de água exsudada às 24 horas (importância particular em injeção em tempo frio - riscos de congelamento).
c) <u>Variação de volume:</u> - $1\% \leq \text{v.v.} \leq 5\%$ (-) retracção (+) expansão	c) <u>Variação de volume:</u> - Pó de alumínio, gerador de H_2 , ou outro gás aprovado podem ser usados para obter expansões da calda entre 5 e 10%.	c) <u>Variação de volume:</u> retracção $\leq 2800 \mu\text{m}$ aos 28 dias (ensaio L.C.P.C.)
d) <u>Resistência à compressão:</u> - $\geq 30 \text{ MPa}$, aos 28 dias - $\geq 27 \text{ MPa}$, aos 7 dias (quando se pretende estimar a resistência provável aos 28 dias, a partir da resistência aos 7 dias). - Provetes: prismas $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ou cilindros com $\phi = 10 \text{ cm}$ e $h = 8 \text{ cm}$; nalguns países utilizam-se cubos com aresta $\leq 10 \text{ cm}$ (utilização de cubos deve ser autorizada pelas autoridades competentes).	d) <u>Resistência à compressão:</u> - $\sim 40 \text{ MPa}$, aos 28 dias (cura a $65^\circ\text{F} = 18,3^\circ\text{C}$ e 70% H.R.) - Provetes: cubos com aresta = $2'' = 5,08 \text{ cm}$.	d) <u>Resistência à compressão:</u> - $\geq 30 \text{ MPa}$, aos 28 dias. - Provetes: prismas $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$.
e) <u>Outras propriedades:</u>	e) <u>Outras propriedades:</u>	e) <u>Outras propriedades:</u> - Resist. à tracção por flexão: - $\geq 4 \text{ MPa}$, aos 28 dias - provetes: $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ - Tempos de presa: - princípio de presa ≥ 3 horas (medido à temp. de 30°C) - tempo quente) - fim de presa ≤ 24 horas (medido à temp. de 5°C) - tempo frio; tempo fim de presa muito elevado pode conduzir a exsudações importantes para além das 3 horas. - Absorção capilar: a título indicativo: calda com 28 dias: $\leq 1 \text{ g/cm}^2$ após 14 dias de ensaio.

Asociación técnica española del pretensado/Instituto Eduardo Torroja "Recomendaciones para la ejecución y control de la inyección - H.P. 3-73"	FIP Guides to good practice-practical construction "Grout and grouting of prestressed concrete"	REBAP/RBLH
<p>e) <u>Inertes</u>:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Inertes finos: não se recomenda a sua utilização, excepto para grandes bainhas, caso em que podem ajudar a reduzir a sedimentação. - Isentos de impurezas ou substâncias prejudiciais, deverão ser rolados (maior injectabilidade) e com granulometria contínua (evitar segregação) 	<p>e) <u>Inertes</u>:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Areia: não é recomendado o seu uso, excepto para bainhas com grande secção transversal. - Massa dos agregados $\leq 30\%$ massa de cimento. - (Uso de areia só para bainhas com $\phi > 150-200$ mm; Reduz a retração). 	<p>e) <u>Inertes</u>:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Inertes finos: não se recomenda a sua utilização, excepto para grandes bainhas, caso em que podem ajudar a reduzir a sedimentação. - Isentos de impurezas ou substâncias prejudiciais, deverão ser rolados (maior injectabilidade) e com granulometria contínua (evitar segregação)
<p>a) <u>Fluidez</u>: facilidade de colocação em obra pode ser determinada pela fluidez (cone Marsh):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Recomenda-se que a consistência da calda seja a máxima compatível com a injectabilidade. - Valores mais aconselháveis da fluidez: entre 17" e 25". 	<p>a) <u>Fluidez</u>: recomenda-se que a viscosidade seja ensaiada com instrumentos calibrados em CP (centipoise). Indicação:</p> <ul style="list-style-type: none"> - bainhas horizontais: 500 a 2500 CP; - bainhas verticais: 400 a 1500 CP. <p>A injectabilidade necessária depende de:</p> <ul style="list-style-type: none"> - diâmetro e comprimento da bainha; - percentagem de aço na área da secção da bainha; - rugosidade das paredes da bainha. <p>Recomenda-se o uso do cone Marsh.</p>	<p>a) <u>Fluidez</u>:</p> <p>A composição da calda deve conferir-lhe as necessárias características de fluidez.</p>
<p>b) <u>Exsudação</u>:</p> <ul style="list-style-type: none"> - $\leq 2\%$, ao fim de 3 horas; - $\leq 4\%$, como máximo absoluto; - calda deve reabsorver água exsudada passadas 24 horas. 	<p>b) <u>Exsudação</u>:</p> <ul style="list-style-type: none"> - $\leq 2\%$ vol., 3 horas após a mistura; - $\leq 4\%$, como máximo; - reabsorção após 24 horas da água exsudada (segundo VOVES, B., uma elevada percentagem de escória aumenta a exsudação). 	<p>b) <u>Exsudação</u>:</p> <p>Outra característica das caldas de injeção que pode ter interesse em certos casos.</p>
<p>c) <u>Variação de volume</u>:</p> <ul style="list-style-type: none"> - $-2\% \leq V.V. \leq +10\%$ 	<p>c) <u>Variação de volume</u>:</p> <p>(É de reear que ao fim de 30 minutos a reacção de um agente expansivo tenha terminado).</p>	<p>c) <u>Variação de volume</u>:</p> <p>Outra característica das caldas de injeção que pode ter interesse em certos casos.</p>
<p>d) <u>Resist. à compressão</u>:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ≥ 300 kg/cm², aos 28 dias. - Provetes: prismas 4x4x16 cm³. 	<p>d) <u>Resist. à compressão</u>:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ≥ 30 MPa, aos 28 dias <p>(a resist. à compressão por si só não é importante, mas dá indicação da qualidade da calda; calda com 30 MPa aos 28 dias (~ 20 MPa aos 7 dias), indica uma calda com boas propriedades (aderência, resist. ao corte, resist. à congelação).</p>	<p>d) <u>Resist. à compressão</u>:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ≥ 17 MPa, aos 7 dias - Provetes: cubos de aresta = 10 cm.
<p>e) <u>Outras propriedades</u>:</p> <ul style="list-style-type: none"> - <u>Tempos de presa</u>: princípio e fim de presa das caldas (métodos iguais às pastas de cimento): - princípio de presa: não deverá produzir-se antes de decorrer o tempo mínimo necessário para realizar as operações de injeção. - fim de presa: terminada a injeção, não deve demorar mais que o necessário, principalmente quando são de temer baixas temperaturas. 	<p>e) <u>Outras propriedades</u>:</p> <ul style="list-style-type: none"> - <u>Resist. à congelação</u>: em climas onde pode surgir repentinamente baixas temperaturas, deve-se provar por testes que os adjuvantes utilizados conferem resist. à congelação após 36 h, a temperatura 2-5°C; para este fim recomenda-se que a calda contenha de 6-10% de pequenas bolhas dispersas de gás (>10% poros reduzem bastante a resist. à compressão; < 5% poros, pouco aumenta a resistência à congelação). - (A adição de álcool à calda para prevenir congelamento só é aceitável em circunstâncias extremas - aumenta exsudação e retarda endurecimento da calda). 	<p>e) <u>Outras propriedades</u>:</p> <ul style="list-style-type: none"> - <u>Resist. à congelação</u>: outra característica das caldas de injeção que pode ter interesse em certos casos.

Quadro A1.3a - Estudo comparativo inicial de normalização: EN 447 com normalização pré-existente - parte 3

EN 446 e EN 447	PCI Committee on post-tensioning "Recommended practice for grouting of post-tensioned prestressed concrete"	SETRA - LCPC "Directive provisoire sur les injections de gaines des ouvrages en béton précontraint"
<p>1.3. <u>Doseamento e Amassadura</u></p> <p>a) <u>Doseamento</u>:</p> <ul style="list-style-type: none"> - doseamento dos componentes em massa, excepto água de amassadura que também pode ser doseada em volume 	<p>a) <u>Doseamento</u>:</p>	<p>a) <u>Doseamento</u>:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cimento: em sacos de 50 kg; - adjuvante: pré-doseado em correspondência com 1 saco de cimento ou com 1 amassadura - Água: medida com doseador ou outros meios precisos (é de banir doseamento com balde ou com haste graduada).
<ul style="list-style-type: none"> - Precisão do doseamento: ± 2% para o cimento e adjuvantes; ± 1% para a água 		<ul style="list-style-type: none"> - Precisão do doseamento: 2% para o peso do cimento; 1% para o peso da água.
<ul style="list-style-type: none"> - Relação A/C: A/C ≤ 0,44 	<ul style="list-style-type: none"> - Relação A/C: A/C ≤ 0,45 (cimento tipo I ou II); Cimento tipo III: A/C determinada com base em ensaios 	<ul style="list-style-type: none"> - Relação A/C: A/C ≤ 0,40 - caldas sem adjuvante; A/C ≤ 0,38 - caldas com adjuvante. (o valor correspondente da exsudação indicará se estes valores máximos são aceitáveis ou não).
<p>b) <u>Amassadura</u>:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ordem de adição dos componentes: - água; - cimento; - adjuvantes. 	<p>b) <u>Amassadura</u>:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ordem de adição dos componentes: - água; - cimento; - adjuvantes, <p>ou de acordo com indicações do fabricante do adjuvante.</p>	<p>b) <u>Amassadura</u>:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ordem de adição dos componentes: seguir estritamente o definido na fórmula da composição da calda; atenção especial para adjuvante
	<ul style="list-style-type: none"> - Tempo de amassadura: com equipamento corrente, mistura satisfatório após 1,5 a 3 minutos de amassadura. 	<ul style="list-style-type: none"> - Tempo de amassadura: determinado nos ensaios de conveniência: - misturadoras comuns: 2 a 8 min. - misturadoras de rolos: ~ 2 min. - misturadoras de hélice: até próx. de 8 min.

Asociación técnica española del pretensado/Instituto Eduardo Torroja "Recomendaciones para la ejecución y control de la inyección - H.P. 3-73"	FIP Guides to good practice-practical construction "Grout and grouting of prestressed concrete"	REBAP/RBLH
a) <u>Doseamento</u> :	a) <u>Doseamento</u> : - Em peso (materiais pesados)	a) <u>Doseamento</u> :
- Relação A.C: A.C ≤ 0,45 (valores óptimos entre 0,38 e 0,43)	-	-
b) <u>Amassadura</u> : - Ordem de adição dos componentes: - água; - 2/3 cimento; - adjuvante; - resto do cimento	b) <u>Amassadura</u> : - Ordem de adição dos componentes: - água; - 2/3 cimento; - adjuvante; - resto do cimento	b) <u>Amassadura</u> : - Ordem de adição dos componentes: - água; - cimento
Tempo de amassadura: ≤ 4 minutos	- Tempo de amassadura: recomenda-se ≤ 4 minutos	- Tempo de amassadura: deve ser ≤ 5 minutos.

EN 446 e EN 447	PCI Committee on post-tensioning "Recommended practice for grouting of post-tensioned prestressed concrete"	SETRA - LCPC "Directive provisoire sur les injections de gaines des ouvrages en béton précontraint"
<p>2. EN 446 - PROCEDIMENTOS PARA INJEÇÃO</p> <p>2.1 - Equipamento</p> <p>a) <u>Misturadora/Reservatório de armazenamento:</u></p> <p>- Peneiro: Misturadora deve possuir peneiro de malha < 2 mm, para passagem da calda</p>	<p>a) <u>Misturadora/Reservatório de armazenamento:</u></p> <p>- Peneiro: - Antes da bombagem a calda deve ser crivada num peneiro de malha 0,125" = 3,175 mm; - Se a calda tiver um adjuvante tixotrópico, é suficiente um peneiro de malha 3/16" = 4,76 mm (nº 4); - O peneiro deve estar acessível para inspeção e limpeza.</p>	<p>a) <u>Misturadora/Reservatório de armazenamento:</u></p> <p>- Peneiro: Misturadora deve possuir: - peneiração grossa do cimento antes da colocação na misturadora (malha 20 mm); - peneiração da calda antes da bombagem da colocação no reservatório de armazenamento (malha 2 mm).</p>
<p>- Características da misturadora: deverá permitir obter uma calda com uma dispersão homogénea do cimento e do adjuvante e com o mínimo de grumos; e com as propriedades indicadas na EN 447</p>	<p>- Características da misturadora: capaz de amassar continuamente, produzindo uma calda isenta de grumos e cimento não disperso, (As misturadoras para rebocos existentes no mercado, bem como as misturadoras de betão não são aplicáveis para fazer caldas).</p>	<p>Características da misturadora: Deverá produzir uma calda com consistência homogénea e coloidal, dispersando e desfloculando perfeitamente o cimento. Podem-se usar diversos tipos de misturadoras (rolos, hélice,...), sendo a sua eficácia função da velocidade de rotação, potência, forma da cuba, etc.) (-amassaduras de cerca de 150 kg de cimento necessitam de um motor com potência superior a 2cv. - misturadoras de hélice: recomenda-se velocidade de rotação ~ 1500 rot./min.)</p>
<p>- Reservatório de armazenamento: - com agitador para manter a calda em movimento contínuo até à introdução nas bainhas; - durante as interrupções de injeção a calda deve ser recirculada; - a capacidade da misturadora e do reservatório de armazenamento deve permitir a injeção da bainha sem interrupções e com o ritmo exigido.</p>	<p>- Reservatório de armazenamento: A calda deve ser continuamente agitada até ser bombada.</p>	<p>- Reservatório de armazenamento: - Após mistura, a calda será mantida continuamente em movimento até à injeção através de uma agitação lenta (agitador com velocidade de rotação normalmente compreendida entre 60 e 160 rot./min.); - Em caso de espera prolongada devido a um incidente, far-se-á um controle da fluidez antes da injeção da calda.</p>
<p>b) <u>Bomba:</u> - pressão de injeção: deve permitir manter uma pressão ≥ 1 MPa (deve estar equipada com manómetro)</p>	<p>b) <u>Bomba:</u> - pressão de injeção: capaz de dar pressão de pelo menos 1,5 MPa. (manómetro com escala até no máx. 3,0 MPa, montado entre a saída da bomba e a entrada na bainha).</p>	<p>b) <u>Bomba:</u> - pressão de injeção: um caudal normal deve ser assegurado até uma pressão de 1 MPa. Pressão de injeção deverá ser ≤ 1,5 MPa (bomba equipada com manómetro robusto ± 0,1 MPa).</p>
<p>- Sobressões: deve estar instalada válvula de sobressão para evitar pressões > 2 MPa</p>	<p>- Sobressões: bypass automático ou manual para evitar pressão > 2,5 MPa durante a injeção. (Se exceder esta pressão, resulta uma separação do cimento e da água, que pode causar entupimento; também pode danificar o elemento estrutural).</p>	<p>- Sobressões: - Bomba deve estar munida de um dispositivo de segurança que limita a pressão a um máximo de 1,8 MPa (risco de romper o betão envolvente das bainhas). - Válvula de derivação entre a bomba e o ponto de injeção para permitir amostragem da calda e realizar a descompressão da calda na tubagem de refluxo (descompressão é necessária em qualquer intervenção em caso de anomalia e também para transferir a tubagem de injeção de um cabo para outro)</p>
<p>- Vedada a utilização de ar comprimido na injeção.</p>	<p>Bomba alimentada por gravidade através de tremonha, que deve estar pelo menos parcialmente cheia de calda durante o período de injeção, para evitar entrada de ar na bainha.</p>	

Quadro A2.1b - Estudo comparativo inicial de normalização: EN 446 com normalização pré-existente - parte 1 - Cont.

Asociación técnica española del pretensado/Instituto Eduardo Torroja "Recomendaciones para la ejecución y control de la inyección - H.P. 3-73"	FIP Guides to good practice-practical construction "Grout and grouting of prestressed concrete"	REBAP/RBLH
<p>a) <u>Misturadora/Reservatório de armazenamento:</u> - Peneiro: Equipamento auxiliar: - peneiro 2 UNE 7050 (2 mm) para argamassas; - peneiro 0,16 UNE 7050 (0,16 mm) para caldas</p>	<p>a) <u>Misturadora/Reservatório de armazenamento:</u> - Peneiro: Calda deve passar por um peneiro para verificar ausência de grumos. (Se ficam no peneiro pequenos grumos o cimento está demasiado frio, rejeita-se a calda. Recomenda-se o peneiro nº 16 - 1,19 mm).</p>	<p>a) <u>Misturadora/Reservatório de armazenamento:</u> - Peneiro: Antes da sua utilização convém passar a calda por um peneiro.</p>
<p>- Características da misturadora: Deverá ser capaz de preparar um produto de injeção de consistência uniforme e, se possível, de carácter coloidal. Recomenda-se que o motor tenha a potência mínima de 2cv/100 kg mistura.</p>	<p>- Característica da misturadora: Mecânica, para obter calda homogénea. (- potência recomendada para o motor: 2HP/saco - misturadora de elevada velocidade: com o mínimo de 1000 rot./min. - máxima velocidade de uma das partes da misturadora na calda ≤ 15 m/segundo)</p>	<p>- Características da misturadora: O fabrico de calda deve ser feito mecanicamente, de modo a obter a necessária homogeneidade.</p>
<p>- Reservatório de armazenamento: Agitador para manter o produto de injeção em contínuo movimento desde o fim da amassadura até que se injecta, sem perder as suas características.</p>	<p>- Reservatório de armazenamento: Após mistura, a calda é mantida continuamente em movimento.</p>	<p>- Reservatório de armazenamento: A calda deve ser continuamente agitada até à sua utilização.</p>
<p>b) <u>Bomba:</u> - pressão de injeção: bomba deve ser suficientemente potente para poder dar pressões > 10 atmosferas. Pressão de injeção deve ser < 10 atm. (pressão máx. recomendável: 3 a 7 atmof. - Sobrepressões: bomba dotada de dispositivo de segurança que evite as sobrepressões (por exemplo, através de circuito fechado com válvula de segurança que se abre para passagem da calda, quando a injeção não avança).</p>	<p>b) <u>Bomba:</u> - pressão de injeção: bomba deve ser capaz de exercer pressões pelo menos de 10 bares. (Uma boa impressão do processo de injeção é obtido pela leitura contínua da pressão de injeção na bainha) - Sobrepressões: dispositivo de segurança para evitar pressões > 20 bares</p>	<p>b) <u>Bomba:</u> - pressão de injeção: bomba deve assegurar caudal necessário a uma pressão máxima de 2 MPa. - Sobrepressões: válvula automática para limitar a pressão a 2 MPa.</p>
<p>- Vedada a utilização de bombas de ar comprimido; - Bomba accionada por motor individual ou manualmente. (para bainhas curtas aconselha-se bomba manual; para bainhas compridas (~25-30 m): bomba a motor). - Alimentação da bomba por gravidade e não por sucção (tende a introduzir ar na mistura).</p>	<p>- Interdito o uso de ar comprimido; - O circuito de sucção da bomba deve ser estanque ao ar.</p>	<p>- bomba mecânica (e não de ar comprimido).</p>

EN 446 e EN 447	PCI Committee on post-tensioning "Recommended practice for grouting of post-tensioned prestressed concrete"	SETRA - LCPC "Directive provisoire sur les injections de gaines des ouvrages en béton précontraint"
<p>c) Acessórios: - tubagem: o diâmetro e a pressão nominal devem ser compatíveis com o caudal da bomba, a pressão máxima prevista e o comprimento de transporte necessário. As uniões não devem reduzir o diâmetro interior da tubagem. - Uniões de entrada: as tubagens de entrada devem ser solidamente ligadas às entradas das bainhas. Devem ser evitadas aberturas estreitas ou estrangulamentos para eliminar o risco de entupimento. De um modo geral coloca-se um manómetro na peça de ligação da tubagem à bainha (esta recomendação só se aplicará a bainhas de comprimento > 30 m). Em caso de sobrepressão anormal súbita, um manómetro suplementar colocado na peça de ligação da tubagem à bainha indicará se a sobrepressão se verifica na bainha ou na tubagem de injeção.</p>	<p>c) Acessórios: Sugere-se ter disponível equipamento de limpeza com água para quando surgirem dificuldades de injeção. Este equipamento será em adição ao equipamento de injeção; deverá utilizar uma outra fonte de potência que o equipamento de injeção, com capacidade suficiente para fazer sair qualquer porção de calda bloqueada, e capaz de desenvolver uma pressão de pelo menos 3 MPa.</p>	<p>c) Acessórios: As tubagens, válvulas e uniões, que ligam a bomba às bainhas, deverão ter uma secção suficiente para não travar a passagem da calda; devem ser robustas, facilmente desmontáveis e resistir normalmente a pressões de 2 MPa.</p>
<p>2.2. Técnica de Injeção a) Pessoal: a injeção deve ser efectuada sob a orientação de uma pessoa com formação e experiência na produção, ensaio e sistemas de controlo, a qual será a responsável pelo fabrico e injeção das caldas.</p>	<p>-</p>	<p>a) Pessoal: deve estar sob as ordens de um "responsável" competente.</p>
<p>b) Localização das aberturas de entrada e saída: - aberturas de entrada ou saída: nas ancoragens ou empalmes. - aberturas de saída: no ponto mais elevado da bainha ou nas suas proximidades, se a diferença entre o ponto mais elevado e o ponto mais baixo for > 0,5 m. - aberturas de entrada: nos pontos mais baixos, no caso de bainhas muito inclinadas, verticais ou em forma de gancho e em pontos específicos quando a calda de injeção é injectada por fases. (a injeção de bainha com um perfil ondulado deve ser feita a partir do ponto de cota mais baixa se a diferença máxima da cota for.. >1,5 m).</p>	<p>b) Localização das aberturas de entrada e saída: - aberturas em ambas as extremidades; - nos cabos ondulados todos os pontos altos devem ter purgas, excepto quando a curvatura do cabo é pequena, como nas lajes contínuas. - abertura de saída: nos pontos baixos se as armaduras são colocadas, tensionadas e injectadas num ambiente com gelo.</p>	<p>b) Localização das aberturas de entrada e saída: - aberturas de saída: nos pontos altos da bainha, sempre que o desnível seja > 0,3 m (onde se podem criar bolsas de ar); o seu espaçamento será no máximo 60 m) - (nos pontos baixos podem ser úteis as purgas, caso haja risco de congelamento durante o período de execução). - (os tubos de purga devem resistir a uma pressão mínima de 2 MPa, a qualquer temperatura ambiente. O seu diâmetro será no mínimo de 10 a 15 mm, quando são utilizados como pontos de injeção o diâmetro será ≥ 17 mm)</p>
	<p>c) Bainhas: - Área bainha ≥ 2 x Área armadura - para armaduras constituídas por associação de fios, barras ou cordões. - $\phi_{bainha} \geq \phi_{nom. armad} + 1/4"$ para armaduras constituídas por um simples fio, barra ou cordão.</p>	<p>c) Bainhas: Devem estar isentas interiormente de materiais estranhos (areia, fita adesiva, ...), que podem provocar entupimento durante a operação de injeção.</p>

Asociación técnica española del pretensado/Instituto Eduardo Torroja "Recomendaciones para la ejecución y control de la inyección - H.P. 3-73"	FIP Guides to good practice-practical construction "Grout and grouting of prestressed concrete"	REBAP/RBLH
<p>c) <u>Acessórios:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - tubagens limpas (evitar picaduras que permitam entrada de ar). - boquilhas de injeção ajustáveis hermeticamente às tubagens da bomba (para não entrar ar). - ter em obra equipamento para injectar água, independente do equipamento de injeção, com capacidade suficiente para, em caso de avarias no equipamento de injeção poder limpar rapidamente a bainha que estava a ser injectada. 		
	<p>a) <u>Pessoal:</u> todas as operações de injeção devem ser executadas por pessoal experiente</p>	
	<p>b) <u>Localização das aberturas:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - em qualquer mudança de secção importante da bainha (devem ser evitadas mudanças bruscas do diâmetro das bainhas); - nos pontos altos da bainha; - nas duas extremidades; - máximo de 40 m de cabo sem aberturas; <p>(tubos de drenagem nos pontos mais baixos são de difícil instalação; o seu correcto funcionamento não é garantido; o fecho destas saídas durante as operações de injeção é frequentemente incómodo; alguns países (ex.: Bélgica e países Escandinavos com excepção da Dinamarca) recomendam o uso de tubos de drenagem, enquanto outros países não).</p>	<p>b) <u>Localização das aberturas de entrada e saída:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Respiradouros nas extremidades das bainhas e nas zonas altas do seu traçado; - No caso das bainhas de grande comprimento devem existir ainda respiradouros suplementares convenientemente espaçados.
	<p>c) <u>Bainhas:</u> Devem permitir a passagem franca da calda e estarem isentas de materiais estranhos (óleo, areia, fitas, ...) que podem (alguns) causar entupimento durante a injeção. Recomenda-se:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Área calda $\geq 2 \times$ Área armadura; - $\phi_{bainha} \geq \phi_{armad} + 10 \text{ mm}$ 	<p>c) <u>Bainhas:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Área interior bainha (secção transversal) $> 2 \times$ Área armadura; - $\phi_{int \text{ bainha}} \geq \phi_{armad} + 10 \text{ mm}$

<p>EN 446 e EN 447</p>	<p>PCI Committee on post-tensioning "Recommended practice for grouting of post-tensioned prestressed concrete"</p>	<p>SETRA - LCPC "Directive provisoire sur les injections de gaines des ouvrages en béton précontraint"</p>
<p>d) <u>Precauções antes da injeção:</u> - Intervalo de tempo entre tensionamento do aço e injeção: - Bainhas devem ser injectadas o mais cedo possível após o tensionamento do aço. - Se o intervalo de tempo entre a introdução das armaduras de pré-esforço e a injeção das bainhas é susceptível de permitir a corrosão do aço, convém prever a utilização de óleos solúveis de protecção no aço ou de ar seco nas bainhas.</p>	<p>d) <u>Precauções antes da injeção:</u></p>	<p>d) <u>Precauções antes da injeção:</u> - Intervalo de tempo entre tensionamento do aço e injeção: - De um modo geral, a injeção deve ser feita o mais rapidamente possível após o tensionamento dos cabos; o intervalo máximo aceitável entre o tensionamento e a injeção é de 8 dias. - Em certos casos particulares poderá ser necessário reduzir este período máx. (ambientes corrosivos) ou poder admitir períodos mais alargados, sendo então indispensável assegurar uma protecção eficaz das armaduras (acima de 3 dias é prudente proteger as armaduras com produtos que se possam eliminar antes da injeção (ex.: óleos solúveis).</p>
<p>- Limpeza das bainhas: - Pode tornar-se necessário ter a garantia de que as bainhas e as aberturas de entrada e saída permitirão a injeção da calda. Para se obter essa garantia deverá ser introduzido ar comprimido seco na bainha. - Toda a água existente na bainha deve ser expulsa usando ar comprimido e as aberturas de saída nos pontos mais baixos. As consequências da eventual presença de água na bainha devem ser tomadas em consideração na escolha do procedimento de injeção mais apropriado.</p>	<p>- Limpeza das bainhas: - A limpeza das bainhas metálicas deve ser opção do empreiteiro do pré-esforço. (Tradicionalmente a limpeza era usada para limpar a bainha de materiais estranhos e limpar as superfícies da bainha e dos cordões para facilitar a injeção; - Quando os cordões são lavados, a água é removida por ar (livre de óleo) ou deslocada pela calda. - Recentemente injeções experimentais com bainhas rígidas e armaduras de pré-esforço colocadas após betonagem indicam que a lavagem não é necessária e pode ser indesejável para cordões longos desde que seja difícil remover a água da bainha). - Bainhas com paredes de betão devem ser limpas para garantir que o betão está convenientemente húmido. - A água usada para lavagem de bainhas pode conter cal apagada ou cal viva na dosagem de 0,1 lb/galão (~ 10 gr./litro).</p>	<p>- Limpeza das bainhas - Pouco antes da injeção os cabos serão lavados por circulação de água limpa. A lavagem será interrompida quando a água que sai na extremidade oposta é perfeitamente clara (interessa que as superfícies das armaduras e das bainhas estejam húmidas no momento da injeção para evitar entupimento por desidratação da calda; no caso de as armaduras estarem protegidas por óleo solúvel, a lavagem deve ser particularmente cuidadosa). - à lavagem dos cabos segue-se a sopragem de ar comprimido (as purgas serão fechadas sistematicamente uma a uma, começando pelas mais próximas da entrada de ar). As bainhas lavadas e depois sopradas serão assinaladas para evitar omissões (estas operações permitem controlar a provável livre passagem da calda e pôr em evidência as eventuais comunicações entre bainhas).</p>
<p>e) <u>Temperaturas:</u> - temperatura da calda: - durante a injeção: de 10 a 25°C - fora destes limites devem ser tomadas precauções especiais, válidas no local de injeção, que assegurem um enchimento adequado das bainhas. - independentemente destas exigências, a temperatura da calda fresca não deverá ser superior a 35°C</p>	<p>e) <u>Temperaturas:</u> - temperatura da calda: - temperatura da calda: ≤ 90°F (32°C), durante a amassadura e bombagem; se necessário, arrefecer a água de amassadura.</p>	<p>e) <u>Temperaturas:</u> - temperaturas da calda: quando se prepara a calda com água quente (tempo frio), a temperatura da calda não deverá exceder 20°C.</p>

Asociación técnica española del pretensado/Instituto Eduardo Torroja "Recomendaciones para la ejecución y control de la inyección - H.P. 3-73"	FIP Guides to good practice-practical construction "Grout and grouting of prestressed concrete"	REBAP/RBLH
<p>d) <u>Precauções antes da injeção:</u> - Intervalo de tempo entre tensionamento do aço e injeção: - A injeção deverá realizar-se o mais cedo possível após o tensionamento dos cabos. não devendo transcorrer mais de um mês entre o tensionamento e a injeção, excepto se for prevista uma adequada protecção das armaduras. - Em ambientes agressivos o prazo indicado deverá diminuir-se convenientemente.</p>	<p>d) <u>Precauções antes da injeção</u> - Intervalo de tempo entre tensionamento do aço e injeção: - Injeção realizada com intervalo de tempo mínimo possível após tensionamento do aço. - Se por razões estruturais ou climáticas tiver que ser adiada, recomenda-se a protecção do aço por métodos ou produtos que não impeçam a aderência última da calda. (- para H.R. > 60%: cada $\Delta t = +11^{\circ}\text{C} \Rightarrow$ duplicação da velocidade da corrosão - protecção: p. ex.: óleos. - foram detectadas falhas no aço devidas a longos intervalos de tempo entre pré-esforço e injeção, agravada com factores ambientais agressivos)</p>	<p>d) <u>Precauções antes da injeção:</u> - Intervalo de tempo entre tensionamento do aço e injeção: - Recomendável não exceder o prazo de 7 dias entre a aplicação do pré-esforço e a protecção da armadura. Razões de alta agressividade ambiente (p. ex.: humidade e temperaturas elevadas) podem aconselhar a redução deste prazo. - No caso de, por circunstâncias particulares (construtivas, climáticas, ...), o prazo tiver que ser dilatado, deverá proceder-se a uma protecção provisória por meio de processos e produtos adequados que, no entanto, não venham a prejudicar a aderência.</p>
<p>- Limpeza das bainhas: - Antes da injeção deverá limpar-se a bainha com ar comprimido, observando-se se este chega a sair pela extremidade oposta de forma contínua e regular. Comprovar-se-á, assim, se existe algum tampão na bainha, capaz de impedir a injeção. Em caso afirmativo, deverá localizar-se, para sua eliminação, picando o betão se necessário. - Se as bainhas são de betão, deverá injectar-se água para humedecer este betão, pois de outra forma este dessecaria a injeção, com o consequente risco de criar uma obstrução. - Igualmente se os cordões foram lubrificados, deverá injectar-se água até à eliminação do produto utilizado. - As ligações das boquilhas de injeção estarão limpas de betão ou qualquer outro material, e serão herméticas a fim de evitar possíveis fugas de ar. - Antes de iniciar a injeção deverão abrir-se todos os tubos de purga.</p>	<p>- Limpeza das bainhas: - Antes da betonagem inspeccionar as bainhas (com ar comprimido, detectar fugas) e reparar qualquer defeito. - Antes da injeção podem-se descobrir entupimentos ou fendas através de ar comprimido e fechando as purgas. - A lavagem com água pode ser usada para humedecer a bainha; é no entanto muito duvidoso se a sujidade é extraída da bainha (a dispersão indesejada da calda pode ser evitada com o uso de um adjuvante adequado; alguns países acham preferível deixar a água na bainha). - Em climas frios devem-se tomar precauções para evitar o congelamento da água na bainha antes da injeção; depois de um período frio deve-se tomar cuidado para que a bainha e os cordões estejam sem gelo, antes de começar a injeção (as bainhas podem ser cheias com mistura de água e álcool e fechadas; adicionar hidróxido de sódio em benzoato de sódio é recomendado para eliminar o perigo de corrosão; outro método é eliminar a água nas bainhas com ar comprimido; drenar nos pontos baixos nem sempre é realizável).</p>	<p>- Limpeza das bainhas: As bainhas deverão ser inspeccionadas imediatamente após a betonagem, a fim de detectar eventual obstrução; para isso poder-se-á insuflar ar comprimido ou fazer jogar o cabo, se este já se encontrar montado, ou fazer passar um objecto - testemunha em caso contrário.</p>
<p>e) <u>Temperaturas:</u> - temperatura da calda</p>	<p>e) <u>Temperaturas:</u> - temperatura da calda:</p>	<p>e) <u>Temperaturas:</u> - temperatura da calda:</p>

Quadro A2.4a - Estudo comparativo inicial de normalização: EN 446 com normalização pré-existente - parte 4

EN 446 e EN 447	PCI Committee on post-tensioning "Recommended practice for grouting of post-tensioned prestressed concrete"	SETRA - LCPC "Directive provisoire sur les injections de gaines des ouvrages en béton précontraint"
<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura ambiente: - durante a injeção: de 5 a 30°C - fora destes limites devem ser tomadas precauções especiais, válidas no local de injeção, que assegurem um enchimento adequado das bainhas 	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura ambiente: - quando a temperatura atmosférica for < 32°F (0°C), as bainhas devem ser mantidas isentas de água, para evitar danos devidos ao seu congelamento (isto é normalmente acompanhado com drenos nos pontos baixos) 	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura ambiente: - quando a temperatura atmosférica for > 25°C, há risco de entupimento devido a pressões mais rápidas da calda. Precauções: - fazer circular água fria nos cabos antes da injeção; - evitar exposição ao sol das tubagens de injeção e dos sacos de cimento; - fazer a injeção de manhã cedo (inércia térmica do betão).
<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura do elemento estrutural: - durante a injeção: de 5 a 25°C. - fora destes limites devem ser tomadas precauções especiais, válidas no local de injeção, que assegurem em enchimento adequado das bainhas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura do elemento estrutural: - temperatura do betão $\geq 35^\circ\text{F}$ (2°C), desde o instante da injeção até a $R_{\text{comp. calda}} \geq 8 \text{ MPa}$, curada em obra em cubos de aresta 2" (5,08 cm) 	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura do elemento estrutural: - temperatura do betão > 5°C; se for inferior, tomar disposições, p. ex.: - manter o betão a uma temperatura positiva durante toda a presa, aquecendo com vapor, infravermelhos ou resistências interiores; - circulação de água quente nas bainhas até ao instante da injeção; - preparação da calda com água quente; - injectar no início do dia para aproveitar as temperaturas em geral crescentes. - utilizar caldas com tempo princípio de presa reduzido.
<p>f) Operações de injeção da calda:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Período de utilização da calda fresca: caldas utilizadas até 30 minutos após a mistura (sem retardador de presa). 	<p>f) Operações de injeção da calda:</p>	<p>f) Operações de injeção da calda:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Período de utilização da calda fresca: em caso de espera prolongada devido a um incidente, será efectuado antes de qualquer injeção, um controlo da fluidez.
<ul style="list-style-type: none"> - Velocidade de injeção: deverá situar-se, normalmente, entre 5 e 15 metros/minuto 	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidade de injeção: em condições normais o equipamento de injeção deve ser capaz de injectar continuamente o cabo mais comprido, no máximo em 20 minutos 	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidade de injeção: recomendam-se velocidade entre 6 e 12 metros/minuto.
<ul style="list-style-type: none"> - Comprimento de injeção (o comprimento máximo a ser preenchido numa única operação deve ser < 50 metros, salvo se forem previstos pontos suplementares de injeção) 	<ul style="list-style-type: none"> - 	<ul style="list-style-type: none"> -
<ul style="list-style-type: none"> - Pontos de injeção: - Bainhas injectadas a partir do ponto de cota mais baixa. - A injeção de bainhas com um perfil ondulado deve ser feita a partir do ponto de cota mais baixa se a diferença máxima de cota for superior a 1,5 metros. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pontos de injeção: - Se a pressão de injeção em aplicação exceder o máximo recomendado (2,5 MPa), a calda pode ser injectada por qualquer purga que tenha sido ou esteja preparada para ser tapada, desde que o sentido de escoamento se mantenha. Se se adopta este procedimento, a purga que vai ser usada para injeção deve ser provida de válvula de fecho. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pontos de injeção: - Bainhas injectadas pela extremidade mais baixa; operação contínua e regular.

Asociación técnica española del pretensado/Instituto Eduardo Torroja "Recomendaciones para la ejecución y control de la inyección - H.P. 3-73"	FIP Guides to good practice-practical construction "Grout and grouting of prestressed concrete"	REBAP/RBLH
<p>- Temperatura ambiente: - durante 48 horas seguintes à injeção $\geq 2^{\circ}\text{C}$ (a não ser que se aqueça o elemento a injectar de modo que a temperatura desde que seja $\geq 5^{\circ}\text{C}$ nessas 48 horas). - Não injectar se se teme congelamento num prazo de 2 dias.</p>	<p>- Temperatura ambiente: -</p>	<p>- Temperatura ambiente: - Até 48 horas após a injeção: $\geq 5^{\circ}\text{C}$</p>
<p>- Temperatura do elemento estrutural: - temperatura da peça $\geq 5^{\circ}\text{C}$ (de 5 a 10°C: calda deve conter 5 a 10% de pequenos poros- $R_{\text{congelamento}}$).</p>	<p>- Temperatura do elemento estrutural: - não realizar a injeção se a temperatura na bainha for $< 4^{\circ}\text{C}$ durante as 48 horas seguintes à injeção, excepto se se proteger a estrutura (temperatura da estrutura $> 5^{\circ}\text{C}$, durante 5 dias). - o ponto de congelamento da calda verifica-se entre -2 e -4°C: - Ensaio para verificar que a calda tem R_{gelo}: amassadura; manter durante 36 horas a 2 a -5°C; então baixar bruscamente a temperatura até -20°C \Rightarrow calda não tem aumento de volume. (isto consegue-se com 6 a 10% de poros pequenos e dispersos na calda).</p>	<p>- Temperatura do elemento estrutural:</p>
<p>f) Operações de injeção da calda: - Período de utilização da calda fresca: não devem decorrer mais de 30 minutos desde a amassadura até ao início da injeção, a não ser que se usem retardadores.</p>	<p>f) Operações de injeção da calda: - Período de utilização de calda fresca: calda deve ser usada na primeira meia hora após amassadura, excepto se se usarem retardadores.</p>	<p>f) Operações de injeção da calda: - Período de utilização da calda fresca: caldas utilizadas até 30 minutos após a mistura (sem retardadores de presa).</p>
<p>- Velocidade de injeção: entre 6 e 12 metros/minuto.</p>	<p>- Velocidade de injeção entre 6 e 12 metros/minuto (injeção contínua, sem interrupções).</p>	<p>- Velocidade de injeção entre 6 e 12 metros/minuto</p>
<p>- Pontos de injeção: A injeção faz-se pela ancoragem mais baixa ou pelo tubo de purga inferior da bainha, com todos os restantes tubos de purga abertos.</p>	<p>- Pontos de injeção: Bainhas injectadas a partir dos pontos mais baixos. (se não há grande diferença de altura entre o ponto mais alto e mais baixo do cabo, é aceitável injectar por uma purga ligada à bainha ou por uma extremidade até à outra).</p>	<p>- Pontos de injeção: Bainhas injectadas através do ponto de injeção situado a cota mais baixa; caso não haja grande diferença de cotas ao longo da bainha, a injeção pode ser realizada por uma das extremidades.</p>

EN 446 e EN 447	PCI Committee on post-tensioning "Recommended practice for grouting of post-tensioned prestressed concrete"	SETRA - LCPC "Directive provisoire sur les injections de gaines des ouvrages en béton précontraint"
-	- Quando não se consegue manter o sentido do escoamento, a calda deve ser removido com água para fora da bainha	-
<p>- Fecho de purgas e fim da injeção:</p> <p>- Prosseguir a injeção até a fluidez da calda nas aberturas ser idêntica à injectada.</p> <p>- Fecho das aberturas de saída à medida que a injeção prossegue.</p> <p>- Logo após a injeção as aberturas de saída nos pontos mais altos devem ser abertas para permitir a saída de água de exsudação.</p>	<p>- Fecho de purgas e fim da injeção:</p> <p>- A calda deve fluir da primeira purga após a entrada até remover toda a água de lavagem residual ou ar. sendo então tapada a purga ou fechada de outro modo; as restantes purgas devem ser fechadas em sequência, e do mesmo modo.</p> <p>- Calda deve ser bombada através da bainha e fluir continuamente na abertura de saída até deixar de se ver sair vestígios de água ou ar. O tempo de escoamento (cone) da calda à saída não deve ser menor do que o da calda injectada.</p> <p>Para se assegurar que os cordões se mantêm cheios de calda, devem ser fechadas as aberturas de entrada e saída. (investigação corrente indica que o uso de "tubos em pé" nos pontos altos dos cordões injectados é um substituto satisfatório de válvula de fecho; os "tubos em pé" permitem livre expansão que tende a expulsar qualquer água de exsudação que ocorre nos pontos altos).</p>	<p>- Fecho de purgas e fim da injeção:</p> <p>- As purgas de uma bainha só serão fechadas definitivamente após o "responsável" se assegurar que a calda à saída é idêntica à bombada pela máquina e que não contém bolhas de ar (isto implica deixar escoar-se uma certa quantidade de calda pelas purgas intermédias e pela extremidade).</p> <p>- Os dispositivos de fecho das purgas devem suportar a pressão máxima da calda (a utilização de tubos plásticos dobrados sobre eles próprios e cintados é admissível desde que correctamente ligados às bainhas e com espessura que permita a subida de pressão sem "hérnias" ou rotura).</p>
<p>- Precauções para prevenir saída de calda da bainha após injeção:</p> <p>- Após conclusão da injeção manter a pressão a 0,5 MPa durante 1 minuto.</p>		<p>- Precauções para prevenir saída de calda da bainha após injeção:</p> <p>- Após o fecho de todas as saídas (intermédias e extremidade) mantém-se a pressão de 0,5 MPa ao nível do cabo; a abertura de entrada só é fechada quando esta pressão fica estável durante no mínimo 1 minuto, sem necessidade de nova bombagem</p>
<p>g) <u>Precauções após injeção:</u></p> <p>- As ancoragens, os respiradouros e outros elementos metálicos que permanecerão sempre onde foram colocados deverão ser protegidos contra a corrosão e a penetração de água e de outros agentes agressivos.</p>	<p>g) <u>Precauções após injeção:</u></p> <p>- As tampas ou válvulas existentes não devem ser retiradas ou abertas até a calda ficar firme (ganhar presa).</p>	<p>g) <u>Precauções após injeção:</u></p> <p>- Selagem das ancoragens:</p> <p>- faz-se antes ou depois da injeção, segundo os procedimentos do pré-esforço e as prescrições técnicas das ancoragens ou da parte da obra respeitante.</p> <p>(A selagem após injeção tem duas vantagens:</p> <p>a) A injeção pode ser feita logo a seguir à aplicação do pré-esforço;</p> <p>b) Não fica vestígio do tubo de saída (na ancoragem))</p> <p>- Após um intervalo de cerca de 24 horas, e após a verificação do seu enchimento, os tubos de purga serão cortados cuidadosamente.</p>

Asociación técnica española del pretensado/Instituto Eduardo Torroja "Recomendaciones para la ejecución y control de la inyección - H.P. 3-73"	FIP Guides to good practice-practical construction "Grout and grouting of prestressed concrete"	REBAP/RBLH
<p>- Fecho de purgas e fim da injeção: À medida que a calda de injeção vai saindo pelos tubos de purga mais próximos do ponto por onde se injecta, vão-se fechando estes, deixando previamente fluir por eles a calda, até que tenha a mesma consistência que a que se injecta, e tenha cessado de sair borbulhas de ar.</p>	<p>- Fecho de purgas e fim da injeção: - Injeção deve prosseguir até que a consistência da calda que sai pela extremidade livre e pelas purgas seja a mesma da calda injectada. - Fecho das aberturas de saída à medida que o enchimento da bainha prossegue (logo que a calda sai com as mesmas características da injectada; o mesmo se aplica à saída da extremidade). - Se se usar agente expansivo, as purgas devem ser abertas após injeção para permitir saída da água separada nos pontos altos da bainha. Em seguida estas aberturas são fechadas.</p>	<p>- Fecho de purgas e fim de injeção: - Prosseguir a injeção até que a calda que vai saindo pelos vários respiradouros (que vão sendo progressivamente obturados) tenha consistência idêntica à da calda no ponto de injeção.</p>
<p>- Precauções para prevenir saída de calda da bainha após injeção: - Após a injeção, manter a pressão nas bainhas durante 30 segundos pelo menos, e depois fechar a válvula.</p>	<p>- Precauções para prevenir saída de calda da bainha após injeção: - Após injeção manter a pressão a 0,5 MPa durante 5 minutos, após fecho das saídas.</p>	
	<p>g) <u>Precauções após injeção:</u> - Todas as aberturas de saída deverão ser hermeticamente fechadas após o final da injeção, para evitar a entrada de água, de materiais descongelados e outros agentes corrosivos. - As ancoragens que vão permanecer no local devem ser protegidas adequadamente, e deve-se evitar a entrada de água ou agentes possivelmente agressivos que corroam o aço ou a própria ancoragem.</p>	

EN 446 e EN 447	PCI Committee on post-tensioning "Recommended practice for grouting of post-tensioned prestressed concrete"	SETRA - LCPC "Directive provisoire sur les injections de gainnes des ouvrages en béton précontraint"
<p>h) Pós-injecção-</p> <p>- Definição: operação complementar, posterior à injecção, destinada a substituir o ar ou água existentes nas bainhas por calda de injecção, <u>antes</u> da presa da calda original.</p> <p>- Efectuada com calda de injecção acabada de misturar.</p> <p>(Se as armaduras de pré-esforço forem constituídas por cordões, pode aplicar-se a calda sob pressão. Imediatamente após a injecção da calda deve proceder-se à pós-injecção, aumentando gradualmente a pressão até um máximo de 1 MPa. Convém que as ancoragens sejam seladas de modo que as extremidades dos cabos ultrapassem as ancoragens.</p> <p>- Se as armaduras de pré-esforço forem constituídas por varões, fios ou cordões, a pós-injecção da calda pode ser efectuada quando a maior parte da água de exsudação estiver separada na bainha e imediatamente antes da calda ganhar presa. A bombagem da calda através de aberturas de entrada em vários pontos pode tornar-se necessária para expulsar a água de exsudação pelas aberturas de saída).</p>		
<p>i) <u>Reinjecção</u>:</p> <p>- Definição: operação complementar posterior à injecção, destinada a substituir o ar ou água existentes nas bainhas por calda de injecção <u>depois</u> da presa da calda de injecção original.</p> <p>- Se após a presa da calda nas bainhas o controlo nas aberturas de entrada e saída revelar a presença de água ou vazios, deve proceder-se à reinjecção. Esses vazios deverão ser cheios com calda acabada de misturar. Em certos casos pode tornar-se necessário efectuar a reinjecção em vácuo.</p>		<p>i) Reinjecção:</p> <p>- Definição: operação de reparação necessária devido a anomalias de enchimento durante a injecção. Consiste em completar, na medida do possível, o enchimento das bainhas com uma calda apropriada.</p> <p>- Preferível injecção lenta sob baixa pressão (0,3 a 0,4 MPa) de modo a assegurar um enchimento lento que facilita a penetração do produto.</p> <p>- Sobre reinjecção esta norma refere:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Introdução. 2. Estudos e trabalhos preliminares: <ol style="list-style-type: none"> 2.1 Exame visual da obra; 2.2 Marcação das bainhas; 2.3 Detecção de defeitos de injecção; 2.4 Controlo das possibilidades de reinjecção; 2.5 Tipos de calda: <ul style="list-style-type: none"> - à base cimento: cimento retardado; cimento especial - à base de resinas. 2.6 Escolha da calda: estudo e controlo. 3. Operações de reinjecção: <ol style="list-style-type: none"> 3.1 Colocação das purgas; 3.2 Reinjecção; 3.3 Controlos.

<p>Asociación técnica española del pretensado/Instituto Eduardo Torroja "Recomendaciones para la ejecución y control de la inyección - H.P. 3-73"</p>	<p>FIP Guides to good practice-practical construction "Grout and grouting of prestressed concrete"</p>	<p>REBAP/RBLH</p>
<p>h) Pós-injecção: - Em bainhas muito compridas ou de grande secção útil, recomenda-se reinjectar antes de decorridas 2 horas da injeção, para eliminar a possível redução de volume da mistura e os possíveis vazios situados na parte superior das bainhas.</p>		

Quadro A2.7a - Estudo comparativo inicial de normalização: EN 446 com normalização pré-existente - parte 7

EN 446 e EN 447	PCI Committee on post-tensioning "Recommended practice for grouting of post-tensioned prestressed concrete"	SETRA - LCPC "Directive provisoire sur les injections de gaines des ouvrages en béton précontraint"
<p>2.3 - <u>Controlo de Qualidade:</u> a) <u>Generalidades</u> - em que consiste: - Autocontrolo efectuado pelo empreiteiro, de acordo com regras estabelecidas pelo cliente ou autoridades competentes. - Controlo efectuado por entidade independente para verificar os resultados do autocontrolo do empreiteiro.</p>	<p>a) <u>Generalidades:</u></p>	<p>a) <u>Generalidades:</u></p>
<p>b) <u>Materiais:</u> é necessário assegurar que apenas serão usados materiais em conformidade com as Normas (Europeias). Ver 1.1 - Materiais constituintes</p>	<p>b) <u>Materiais:</u> é necessário assegurar que apenas serão usados materiais em conformidade com as Normas. Ver 1.1 - Materiais constituintes:</p>	<p>b) <u>Materiais:</u> é necessário assegurar que apenas serão usados materiais em conformidade com as Normas. Ver 1.1 - Materiais constituintes</p>
<p>c) <u>Equipamento:</u> avaliação efectuada pelas autoridades competentes: - Verificação e aprovação do equipamento de fabrico e da qualificação do pessoal. - Verificação e aprovação das instalações de injeccção. Ver 2.1 - Equipamento</p>	<p>c) <u>Equipamento:</u> Ver 2.1 - Equipamento</p>	<p>c) <u>Equipamento:</u> o material deve ser aprovado pelo Dono da Obra. Ver 2.1 - Equipamento</p>

Quadro A2.7b - Estudo comparativo inicial de normalização: EN 446 com normalização pré-existente - parte 7 - Cont.

Asociación técnica española del pretensado/Instituto Eduardo Torroja "Recomendaciones para la ejecución y control de la inyección - H.P. 3-73"	FIP Guides to good practice-practical construction "Grout and grouting of prestressed concrete"	REBAP/RBLH
a) <u>Generalidades:</u>	a) <u>Generalidades:</u>	a) <u>Generalidades:</u>
b) <u>Materiais:</u> é necessário assegurar que apenas serão usados materiais em conformidade com as Normas. Ver 1.1 - Materiais constituintes	b) <u>Materiais:</u> é necessário assegurar que apenas serão usados materiais em conformidade com as Normas. Ver 1.1 - Materiais constituintes	b) <u>Materiais:</u> é necessário assegurar que apenas serão usados materiais em conformidade com as Normas. Ver 1.1 - Materiais constituintes
c) <u>Equipamento:</u> Ver 2.1 - Equipamento	c) <u>Equipamento:</u> - Antes de iniciar as operações de injeção, os equipamentos de lavagem com água e ar comprimido devem estar utilizáveis. - Ver 2.1 - Equipamentos	c) <u>Equipamento:</u> Ver 2.1 - Equipamento.

EN 446 e EN 447	PCI Committee on post-tensioning "Recommended practice for grouting of post-tensioned prestressed concrete"	SETRA - LCPC "Directive provisoire sur les injections de gaines des ouvrages en béton précontraint"
<p>d) <u>Calda de injeção:</u> Os ensaios da calda devem ser efectuados pelo menos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Antes do início dos trabalhos: até 24 horas antes: - Durante as operações de injeção: com a seguinte frequência mínima: - Exsudação: 2 ensaios/dia; uma amostra colhida na misturadora e outra na abertura de saída quando a fluidez da calda tiver um valor satisfatório. - Variação de volume: 1 ensaio/dia. - Resistência mecânica: 1 ensaio/7 dias, com o mínimo de 2 ensaios/trabalho. - Fluidez: 3 ensaios/8 horas. - Se se registarem variações importantes na origem dos constituintes da calda. 	-	<p>d) <u>Calda de injeção:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Ensaios de estudo: ensaios prévios de verificação sumária (fluidez, exsudação). Analisar pelo menos 1 mês antes da injeção. - Ensaios de conveniência: para verificar se a composição resultante dos estudos em laboratório conduz a resultados satisfatórios nas condições do estaleiro. A realizar o mais tardar 24 horas antes da injeção: amassaduras com um mínimo de 50 kg de cimento, com determinação da fluidez e exsudação em amostras colhidas no início e no fim do esvaziamento da misturadora. Resultados satisfatórios se: - Fluidez: $t_{padrão} \pm 3$ segundos, mantendo-se entre 13 e 25". - Exsudação: $\leq 2\%$, às 3 horas. - Ensaios de Controlo: para controlar que a calda realmente injectada tem as características requeridas. Ensaios efectuados no estaleiro. - Colheita das caldas: <ul style="list-style-type: none"> - à entrada: quer no reservatório de armazenamento, quer, de preferência, à saída da bomba (munida de derivação) - à saída: na saída mais distante. - Frequência dos ensaios: Fluidez: <ul style="list-style-type: none"> - controlo à entrada: 3 ensaios/tonelada de cimento. - controlo à saída: 1 ensaio/bainha ou por grupo de bainhas de comprimentos semelhantes injectadas simultaneamente. - Exsudação: 1 ensaio/tonelada de cimento, com o mínimo de 3 ensaios/obra. - Resistências mecânicas: estes ensaios podem ser efectuados (aos 28 dias). - Resultados satisfatórios se: - Fluidez: ± 3 segundos que a fluidez do ensaio de conveniência, continuando entre 13 e 25". - Exsudação: $\leq 2\%$, às 3 horas.
<p>e) <u>Eficiência da injeção da calda:</u> É avaliada com meios adequados. Deve ser efectuada uma inspecção visual nas ancoragens e nas aberturas de entrada e saída intermédias. Em certos casos pode ser realizada uma inspecção não destrutiva das bainhas</p>	-	<p>e) <u>Eficiência da injeção da calda:</u> O dono da obra pode prescrever um controlo do bom preenchimento das bainhas através de gamagrafia, radiografia ou outros métodos de investigação não destrutivos. (Caso o resultado destes controlos mostrem defeitos sérios ou repetidos de enchimento das bainhas, o Dono da obra poderá solicitar ao empreiteiro:</p> <ul style="list-style-type: none"> - uma campanha complementar de controlos - uma modificação das condições de execução das injeções. - uma retoma das zonas mal injectadas, após aviso do L.C.P.C.)

<p>Asociación técnica española del pretensado/Instituto Eduardo Torroja "Recomendaciones para la ejecución y control de la inyección - H.P. 3-73"</p>	<p>FIP Guides to good practice-practical construction "Grout and grouting of prestressed concrete"</p>	<p>REBAP/RBLH</p>
<p>d) <u>Calda de injeção:</u> - Estabilidade (exsudação e variação de volume): 1 vez/série de bainhas a injectar, homogéneas em comprimento, disposição e forma. - Fluidez: medida à entrada e à saída da calda da bainha. - Amassadura: comprovar dosificação da água e dos aditivos: 1 vez/dia.</p>	<p>d) <u>Calda de injeção:</u> Recomenda-se verificar a resistência à compressão e a exsudação da calda, assim como a expansão, quando se usa um agente expansivo.</p>	<p>-</p>
<p>e) <u>Eficiência da injeção da calda:</u> Em casos especiais pode recorrer-se ao controlo por radiografia</p>	<p>e) <u>Eficiência da calda de injeção:</u> Recomenda-se controlo radiográfico quando se suspeita de grandes vazios na bainha, que podem ser acessíveis à penetração de água do exterior. (Defeitos que podem ser determinados por investigação radiográfica: - Enchimento incompleto das bainhas; - Bolsas de água ou ar; - Fendas, se a direcção da fenda é sensivelmente a mesma da direcção da radiação; - Localização dos cordões de pré-esforço; rotura do cordão; - Localização e desvio das bainhas; - Bolsas de inertes).</p>	<p>-</p>

Quadro A2.9a - Estudo comparativo inicial de normalização: EN 446 com normalização pré-existente - parte 9

EN 446 e EN 447	PCI Committee on post-tensioning "Recommended practice for grouting of post-tensioned prestressed concrete"	SETRA - LCPC "Directive provisoire sur les injections de gaines des ouvrages en béton précontraint"
f) <u>Outras verificações:</u> - Verificação de volumes:	f) <u>Outras verificações:</u>	f) <u>Outras verificações:</u> - Verificação de volumes: o "responsável" verificará que as quantidades de calda são compatíveis com o previsto (volume de calda a preparar é superior em cerca de 20% ao volume teórico dos vazios das bainhas)
- Verificação da pressão	-	Verificação da pressão: o "responsável" seguirá a evolução da pressão, que deve aumentar progressivamente
- Verificação das temperaturas: Ver 2.2.e) Temperaturas.	- Verificação das temperaturas: Ver 2.2.e) Temperaturas.	- Verificação das temperaturas: Ver 2.2.e) Temperaturas.

Asociación técnica española del pretensado/Instituto Eduardo Torroja "Recomendaciones para la ejecución y control de la inyección - H.P. 3-73"	FIP Guides to good practice-practical construction "Grout and grouting of prestressed concrete"	REBAP/RBLH
f) <u>Outras verificações:</u> - Verificação de volumes: é imprescindível manter a saída da calda pelos tubos de purga tempo suficiente para alcançar a uniformidade e sobretudo a total eliminação de borbulhas de ar. (Considera-se apropriado verter 20% a 40% do volume de calda injectada).	f) <u>Outras verificações:</u> - Verificação de volumes:	f) <u>Outras verificações:</u>
- Verificação da pressão: controlar a pressão no manómetro (pode ser indicativo do desenvolvimento da injeção).	- Verificação da pressão: uma boa impressão de processo de injeção é obtido pela leitura contínua da pressão de injeção na bainha	-
- Verificação das temperaturas: No tempo frio comprovar as temperaturas durante as 48 horas seguintes à injeção. Ver 2.2.e) - Temperaturas.	- Verificação das temperaturas: Havendo perigo de congelamento, a temperatura da bainha deve ser verificada antes e durante 48 horas após a injeção. Ver 2.2.e) - Temperaturas	- Verificação das temperaturas: Ver 2.2.e) - Temperaturas.

A2 - ESTUDO COMPARATIVO POSTERIOR

(QUADROS A3.1 A A3.14)

Quadro A3.1 - Estudo comparativo posterior de normalização: Boletim nº 20 da FIB com normalização pré-existente - parte

EN 446 e EN 447	FIP Guides to good practice-practical construction "Grout and grouting of prestressed concrete" - Setembro 1975	FIB (CEB-FIP) - Guides to good practice "Grouting of tendons in prestressed concrete" - Julho 2002
<p>1. EN 447 - ESPECIFICAÇÕES PARA AS CALDAS DE INJEÇÃO</p> <p>1.1. - <u> Materiais</u></p> <p>a) <u> Generalidades:</u> Teor de cloretos nas caldas ≤ 0,1% da massa de cimento.</p>	<p>a) <u> Generalidades:</u> Teor de cloretos nas caldas: ≤ 750 mg Cl⁻/litro calda (Para A:C = 0,40:750 mg/l ~ 0,054% massa cimento).</p>	<p>a) <u> Generalidades:</u> As caldas não devem conter mais do que: Cl⁻ < 0,1% do peso do cimento SO₄²⁻ < 4,5% do peso do cimento S²⁻ < 0,01%</p>
<p>b) <u> Cimento</u> Tipo CEM I (ENV 197-1) Nota: nalguns países membros do CEN é autorizada a utilização de cimentos com um teor até 20% de escória granulada de alto forno ou cinza volante</p>	<p>b) <u> Cimento:</u> - portland; - idade < 1 mês; - temperatura ≤ 40°C - armazenado em local seco (- teor de Cl ≤ 0,1%, - superf. específica ≥ 270 m²/kg = 2700 cm²/g; - temperatura do cimento elevada: reacção dos adjuvantes pode ser indevidamente acelerada; isto pode reduzir a expansão da calda dentro da bainha. Além disso acelera o endurecimento da calda).</p>	<p>b) <u> Cimento:</u> - portland corrente de acordo com as normas nacionais aplicáveis. Além disso deve satisfazer os seguintes requisitos: - Cl⁻ < 0,05% - S²⁻ < 0,01% - Ausência de grumos; - Ausência de substâncias nocivas para o aço de pré-esforço: - Aditivos < 0.1%; só são admitidos agentes de moagem; - Ausência de falsa presa; - Para controlo da qualidade da consistência, a granulometria do cimento pode ser definida pela superfície específica de Blaine; - Data de fabrico do cimento deve estar impressa em cada saco para controle da idade antes da utilização. As propriedades do cimento variam com a idade, por isso aconselha-se cuidado na armazenagem prolongada.</p>
<p>c) <u> Água:</u> Deverá cumprir as exigências da Norma Europeia EN 1008</p>	<p>c) <u> Água:</u> - Se possível, de abastecimento público. - A água não deve conter ingredientes prejudiciais para o aço ou para a calda. Não deve conter: - iões Cl⁻ > 500 mg/litro - qualquer matéria orgânica. (Diferentes países estabelecem limites para teor em cloretos e sulfatos; O uso de água que não de abastecimento público depende de testes preliminares-calda feita com esta água e com água destilada: - tempo de presa não deve diferir mais de 25%; - tensão de rotura compressão aos 14 dias não deve variar mais que 5%).</p>	<p>c) <u> Água:</u> Não deve conter ingredientes prejudiciais para o aço de pré-esforço ou para a calda; - Cl⁻ < 300 mg/l - SO₄²⁻ < 200 mg/l - Ausência de matéria orgânica; - Quando não se dispuser de água de abastecimento público devem ser realizadas análises químicas, devendo satisfazer às Normas Nacionais aplicáveis.</p>

EN 446 e EN 447	FIP Guides to good practice-practical construction "Grout and grouting of prestressed concrete" - Setembro 1975	FIB (CEB-FIP) - Guides to good practice "Grouting of tendons in prestressed concrete" - Julho 2002
<p>d) <u>Adjuvantes:</u> - Deverão respeitar as exigências da Norma Europeia 934-4. - É autorizada a utilização de adjuvantes simples ou de misturas de adjuvantes.</p>	<p>d) <u>Adjuvantes:</u> - Aceita-se o uso de adjuvantes se testes provam que o seu uso melhora as propriedades da calda (ex: aumentar trabalhabilidade, reduzir exsudação, introduzir ar, expandir a calda, ...) - Devem estar isentos de produtos prejudiciais para o aço ou a calda (ex: cloretos, nitratos, sulfatos, ...) (Pó de alumínio: há produção de hidrogénio, mas isto não faz perigo ao aço devido ao efeito protector de FeO_3CaO; o pH deve ser > 9; segundo SZILARD, R-ACI Journal-January 1968, o pó de alumínio aumenta a aderência e reduz a exsudação; algumas publicações francesas mostram cepticismo quanto ao uso de pó de alumínio)</p>	<p>d) <u>Adjuvantes:</u> - Não devem conter qualquer substância prejudicial para o aço de pré-esforço, principalmente tiocianetos, nitritos, nitratos, ..., sulfatos, devendo ainda cumprir os seguintes requisitos: - $Cl^- < 0,10\%$ do peso do adjuvante em pó; - $Cl^- < 1 \text{ gr/l}$ do adjuvante líquido; - pH deve estar dentro dos limites indicados pelo fabricante; - Resíduo seco: dentro do limite de $\pm 5\%$ do valor especificado; Os adjuvantes são geralmente plastificantes, estabilizadores e agentes retardadores, que melhoram: - fluidez de 1 dada razão A/C; - eliminação da água exsudada; - evitar segregação e injeções com elevada pressão; - retardamento da presa da calda; - assegurar estabilidade da calda. Os adjuvantes podem também providenciar propriedades adicionais, tais como: - acelerar a presa; - introduzir ar para melhorar a R_{gelo} durante o tempo de presa; - tixotropia; - inibição de corrosão. Porém, alguns ensaios mostraram que a eficácia dos inibidores de corrosão não é segura, sendo recomendado confirmar a eficácia em ensaios sobre amostras representativas que incluam o aço de pré-esforço. O produto deve estar em sacos ou recipientes ou em misturas pré-embaladas com a identificação e as instruções do fabricante. Retardadores de presa de calda são particularmente úteis para injeção de bainhas muito compridas. Deve-se ter o cuidado de usar os adjuvantes dentro do prazo de validade</p>
<p>e) <u>Inertes:</u></p>	<p>e) <u>Inertes:</u> - Areia: não é recomendado o seu uso, excepto para bainhas com grande secção transversal. Massa dos agregados $\leq 30\%$ massa de cimento. (Uso de areia só para bainhas com $\phi > 150-200 \text{ mm}$: Reduz a retracção).</p>	<p>e) <u>Inertes -</u></p>
<p>1.2 - <u>Propriedades das caldas</u> a) <u>Fluidez:</u> - Imediatamente após a mistura: Ensaio imersão $\geq 30''$ Ensaio cone $\leq 25'' (50'')$* - 30 minutos após a mistura: Ensaio imersão $\leq 80'' (200'')$* Ensaio cone $\leq 25'' (50'')$* - À saída da bainha: Ensaio imersão $\geq 30''$ Ensaio cone $\geq 10''$ * Caldas de injeção preparadas em misturadoras com elevada velocidade de rotação</p>	<p>a) <u>Fluidez:</u> recomenda-se que a viscosidade seja ensaiada com instrumentos calibrados em CP (centipoise). Indicação: - bainhas horizontais: 500 a 2500 CP; - bainhas verticais: 400 a 1500 CP. A injectabilidade necessária depende de: - diâmetro e comprimento da bainha; - percentagem de aço na área da secção da bainha; - rugosidade das paredes da bainha. Recomenda-se o uso do cone Marsh.</p>	<p>a) <u>Fluidez:</u> - $< 25''$ no ensaio do cone. - Para caldas tixotrópicas outros limites e outros ensaios devem ser aplicados (anexo B – ensaio de imersão e ensaio de medição da viscosidade com "scissometre"). Outros ensaios são utilizados nalguns países. - $< 25''$ no ensaio cone pelo menos $30'$ após confecção da calda (ou outro tempo definido pelo fabricante ou pelo projectista). Este tempo de escoamento não deve variar mais de 20% neste período.</p>

EN 446 e EN 447	FIP Guides to good practice-practical construction "Grout and grouting of prestressed concrete" - Setembro 1975	FIB (CEB-FIP) - Guides to good practice "Grouting of tendons in prestressed concrete" - Julho 2002
b) <u>Exsudação</u> : ≤ 2%, ao fim de 3 horas	b) <u>Exsudação</u> : - ≤ 2% vol., 3 horas após a mistura; - ≤ 4%, como máximo; - reabsorção após 24 horas da água exsudada (segundo VOVES, B., uma elevada percentagem de escória aumenta a exsudação).	b) <u>Exsudação</u> : Exsudação de água e ar de uma calda depois de 3 h em repouso deve ser <0,3%, medida nos ensaios de exsudação dos anexos B1 e B2 (ensaio do tubo inclinado de 5 m e ensaio vertical de 1,5 m). Este requisito (<0,3%) é o mesmo para a calda em repouso durante 24 horas.
c) <u>Variação de volume</u> : - 1% ≤ v.v. ≤ 5% (-) retracção (+) expansão	c) <u>Variação de volume</u> : (É de recear que ao fim de 30 minutos a reacção de um agente expansivo tenha terminado).	c) <u>Variação de volume</u> : - 0,5% ≤ v.v. ≤ 5% (-) retracção (+) expansão
d) <u>Resistência à compressão</u> : - ≥ 30 MPa, aos 28 dias - ≥ 27 MPa, aos 7 dias (quando se pretende estimar a resistência provável aos 28 dias, a partir da resistência aos 7 dias). - Provetes: prismas 4×4×16 cm ³ ou cilindros com φ = 10 cm e h = 8 cm; nalguns países utilizam-se cubos com aresta ≤ 10 cm (utilização de cubos deve ser autorizada pelas autoridades competentes).	d) <u>Resist. à compressão</u> : - ≥ 30 MPa, aos 28 dias (a resist. à compressão por si só não é importante, mas dá indicação da qualidade da calda; calda com 30 MPa aos 28 dias (~ 20 MPa aos 7 dias), indica uma calda com boas propriedades (aderência, resist. ao corte, resist. à congelação).	d) <u>Resist. Mecânica</u> : Não é considerado um parâmetro de observância obrigatória, mas as seguintes são as orientações habituais: - R _{comp.7dias} > 27 MPa (cubos de 10 cm de aresta) - Alguns países escolhem a R _{flexão} , que deverá ser > 3 MPa aos 7 dias.
e) <u>Outras propriedades</u> :	e) <u>Outras propriedades</u> : - <u>Resist. à congelação</u> : em climas onde pode surgir repentinamente baixas temperaturas, deve-se provar por testes que os adjuvantes utilizados conferem resist. à congelação após 36 h, a temperatura 2-5°C; para este fim recomenda-se que a calda contenha de 6-10% de pequenas bolhas dispersas de gás (>10% poros reduzem bastante a resist. à compressão; < 5% poros, pouco aumenta a resistência à congelação). (A adição de álcool à calda para prevenir congelamento só é aceitável em circunstâncias extremas - aumenta exsudação e retarda endurecimento da calda).	e) <u>Outras propriedades</u> : - <u>Tempo início de presa da calda</u> : > 3 horas. - <u>Tempo fim de presa da calda</u> : < 24 horas. - <u>Ensaio de estabilidade</u> com o tubo inclinado para a aprovação inicial da amassadura da calda: exsudação < 0,3% das 0 às 24 horas. - <u>Sedimentação e densidade</u> : A variação da densidade nas amostras colhidas na parte superior e inferior do tubo do ensaio de exsudação não deve exceder 5%. - <u>Outros ensaios</u> : alguns países realizam ensaios para determinação da absorção capilar, exsudação sob pressão e corrosão.
1.3. <u>Doseamento e Amassadura</u> a) <u>Doseamento</u> : - doseamento dos componentes em massa, excepto água de amassadura que também pode ser doseada em volume	a) <u>Doseamento</u> : - Em peso (materiais pesados)	a) <u>Doseamento</u> :
- Precisão do doseamento: ± 2% para o cimento e adjuvantes; ± 1% para a água	-	- Precisão do doseamento: cimento: 2% (+ 1% e -1% do peso definido) água: 2%
- Relação A/C: A/C ≤ 0,44		
b) <u>Amassadura</u> : - Ordem de adição dos componentes: - água; - cimento; - adjuvantes.	b) <u>Amassadura</u> : - Ordem de adição dos componentes: - água; - 2/3 cimento; - adjuvante; - resto do cimento	b) <u>Amassadura</u> : - Ordem de adição dos componentes é geralmente: - água - cimento - adjuvantes, excepto quando recomendado de um modo diferente pelos fornecedores.
	- Tempo de amassadura: recomenda-se ≤ 4 minutos	

EN 446 e EN 447	FIP Guides to good practice-practical construction "Grout and grouting of prestressed concrete" - Setembro 1975	FIB (CEB-FIP) - Guides to good practice "Grouting of tendons in prestressed concrete" - Julho 2002
<p>2. EN 446 - PROCEDIMENTOS PARA INJEÇÃO</p> <p>2.1 - Equipamento</p> <p>a) <u>Misturadora/Reservatório de armazenamento:</u></p> <p>- Peneiro: Misturadora deve possuir peneiro de malha < 2 mm, para passagem da calda</p>	<p>a) <u>Misturadora/Reservatório de armazenamento:</u></p> <p>- Peneiro: Calda deve passar por um peneiro para verificar ausência de grumos. (Se ficam no peneiro pequenos grumos o cimento está demasiado frio, rejeita-se a calda. Recomenda-se o peneiro nº 16 - 1,19 mm).</p>	<p>a) <u>Misturadora/Reservatório de armazenamento:</u></p> <p>- O volume do recipiente da misturadora deve ser semelhante ao do reservatório de armazenamento. Estes recipientes devem estar ligados com uma válvula de fecho.</p> <p>- Peneiro a montante da bomba para evitar grumos.</p>
<p>- Características da misturadora: deverá permitir obter uma calda com uma dispersão homogénea do cimento e do adjuvante e com o mínimo de grumos; e com as propriedades indicadas na EN 447</p>	<p>- Característica da misturadora: Mecânica, para obter calda homogénea. (- potência recomendada para o motor: 2HP/saco - misturadora de elevada velocidade: com o mínimo de 1000 rot./min. - máxima velocidade de uma das partes da misturadora na calda ≤ 15 m/segundo)</p>	<p>- Características da misturadora: Mecânica, de elevada velocidade. Misturadoras podem ser de diferentes tipos, diferindo em vários parâmetros como potência, velocidade da mistura (r.p.m.), forma e dimensões do equipamento de mistura (hélice, etc.), volume da amassadura, unidade de mistura coloidal adicional ou não, etc.. Para o utilizador é importante a qualidade/homogeneidade da calda singular, conseguida com a misturadora particular. É especialmente importante determinar o regime óptimo de mistura da misturadora, para a calda do projecto proposto, que pode ser confirmado pelo ensaio de sedimentação nos ensaios de eficiência.</p>
<p>- Reservatório de armazenamento: - com agitador para manter a calda em movimento contínuo até à introdução nas bainhas; - durante as interrupções de injeção a calda deve ser recirculada; - a capacidade da misturadora e do reservatório de armazenamento deve permitir a injeção da bainha sem interrupções e com o ritmo exigido.</p>	<p>- Reservatório de armazenamento: Após mistura, a calda é mantida continuamente em movimento.</p>	<p>- Reservatório de armazenamento: Mistura em movimento antes da bombagem</p>
<p>b) <u>Bomba:</u> - pressão de injeção: deve permitir manter uma pressão ≥ 1 MPa (deve estar equipada com manómetro)</p>	<p>b) <u>Bomba:</u> - pressão de injeção: bomba deve ser capaz de exercer pressões pelo menos de 10 bares. (Uma boa impressão do processo de injeção é obtido pela leitura contínua da pressão de injeção na bainha)</p>	<p>b) <u>Bomba:</u> - Com máxima pressão de 20 bares. - A saída da calda deve ser tal que acima da pressão máxima seja capaz de manter uma velocidade acima de 12 m/min nas bainhas. À saída da bomba deve existir 1 manómetro e 1 válvula de fecho. Como opcional 1 medidor de caudal. - Pressão de injeção na entrada não deve exceder 10 bares.</p>
<p>- Sobressões: deve estar instalada válvula de sobressão para evitar pressões > 2 MPa</p>	<p>- Sobressões: dispositivo de segurança para evitar pressões > 20 bares</p>	
<p>- Vedada a utilização de ar comprimido na injeção.</p>	<p>- Interdito o uso de ar comprimido; - O circuito de sucção da bomba deve ser estanque ao ar.</p>	

EN 446 e EN 447	FIP Guides to good practice-practical construction "Grout and grouting of prestressed concrete" Setembro 1975	FIB (CEB-FIP) - Guides to good practice "Grouting of tendons in prestressed concrete" - Julho 2002
<p>c) <u>Acessórios</u>:</p> <p>- tubagem: o diâmetro e a pressão nominal devem ser compatíveis com o caudal da bomba, a pressão máxima prevista e o comprimento de transporte necessário. As uniões não devem reduzir o diâmetro interior da tubagem.</p> <p>- Uniões de entrada: as tubagens de entrada devem ser solidamente ligadas às entradas das bainhas. Devem ser evitadas aberturas estreitas ou estrangulamentos para eliminar o risco de entupimento.</p> <p>De um modo geral coloca-se um manómetro na peça de ligação da tubagem à bainha (esta recomendação só se aplicará a bainhas de comprimento > 30 m). Em caso de sobrepressão anormal súbita, um manómetro suplementar colocado na peça de ligação da tubagem à bainha indicará se a sobrepressão se verifica na bainha ou na tubagem de injeção.</p>		<p>c) <u>Acessórios</u>:</p> <p>- mangueira: suficientemente larga, mas não excessivamente e ligada com engates rápidos e estanques nas duas extremidades. Deve resistir com segurança adequada à máxima pressão de injeção da bomba. As mangueiras para calda e as válvulas devem ter um diâmetro interior no mínimo de 19 mm, mas preferencialmente de 25 mm. Devem ser flexíveis para se acomodarem à geometria que for necessária. Algumas válvulas de reserva e engates devem estar disponíveis para as operações de injeção maiores.</p> <p>Deve ser realizada sem falta uma limpeza completa destes acessórios depois de toda a operação de injeção.</p>
<p>2.2. <u>Técnica de Injeção</u></p> <p>a) <u>Pessoal</u>: a injeção deve ser efectuada sob a orientação de uma pessoa com formação e experiência na produção, ensaio e sistemas de controlo, a qual será a responsável pelo fabrico e injeção das caldas.</p>	<p>a) <u>Pessoal</u>: todas as operações de injeção devem ser executadas por pessoal experiente</p>	<p>a) <u>Pessoal e instrução prática</u>: a garantia de qualidade da calda só pode ser conseguida por pessoal devidamente qualificado e treinado. Isto aplica-se a todos os níveis de operários, incluindo encarregado, técnicos e instruídos. Para além das designações e identificação das pessoas responsáveis pela realização das operações de injeção de maior importância, deve ser garantida a existência de um plano sistemático de controlo em acção. Muitas das principais empresas de pré-esforço pós tensionado realizam planos de instrução e controlo, e nalguns países há planos de certificação obrigatórios.</p> <p>São dados exemplos de requisitos típicos para o pessoal de pós-tensão e injeção, com os itens a satisfazer para:</p> <ul style="list-style-type: none"> - técnico/engenheiro para injeção das caldas; - encarregado para injeção das caldas; - operários para injeção das caldas; - Instrução/treino de injeção de caldas.

EN 446 e EN 447	FIP Guides to good practice-practical construction "Grout and grouting of prestressed concrete" Setembro 1975	FIP Guides to good practice "Grouting of tendons in prestressed concrete" Julho 2002
<p>b) <u>Localização das aberturas de entrada e saída:</u> - aberturas de entrada ou saída: nas ancoragens ou empalmes. - aberturas de saída: no ponto mais elevado da bainha ou nas suas proximidades, se a diferença entre o ponto mais elevado e o ponto mais baixo for > 0,5 m. - aberturas de entrada: nos pontos mais baixos, no caso de bainhas muito inclinadas, verticais ou em forma de gancho e em pontos específicos quando a calda de injeção é injectada por fases. (a injeção de bainha com um perfil ondulado deve ser feita a partir do ponto de cota mais baixa se a diferença máxima da cota for > 1,5 m).</p>	<p>b) <u>Localização das aberturas:</u> - em qualquer mudança de secção importante da bainha (devem ser evitadas mudanças bruscas do diâmetro das bainhas); - nos pontos altos da bainha; - nas duas extremidades; - máximo de 40 m de cabo sem aberturas; (tubos de drenagem nos pontos mais baixos são de difícil instalação; o seu correcto funcionamento não é garantido; o fecho destas saídas durante as operações de injeção é frequentemente incómodo; alguns países (ex.: Bélgica e países Escandinavos com excepção da Dinamarca) recomendam o uso de tubos de drenagem, enquanto outros países não).</p>	<p>b) <u>Localização das aberturas</u> (diâmetro mínimo 19 mm): - na ancoragem do cabo; - nos pontos altos da bainha, quando a distância vertical entre o ponto mais alto e mais baixo for superior a 0,5 m. - em casos especiais, no ponto mais baixo do cabo com pequeno raio de curvatura. - nas principais mudanças de secção, como trompetes de uniões e ancoragens. - em distâncias intervaladas específicas de projecto (variam entre 30-75 m, conforme a geometria do cabo, injeção e equipamento). - Ao localizar aberturas, ter atenção aos pontos de mudança significativa da direcção ou de mudança da secção transversal. - Em bainhas verticais muito altas, quando a pressão de injeção se torna excessiva, é necessária injeção por patamares, sendo necessárias entradas extra. - Para cabos compridos poderá ser necessário proceder à injeção através de sucessivas entradas; neste caso, uma saída pode também funcionar como entrada intermédia. - Normalmente não são necessárias aberturas intermédias em cabos curtos e baixos, em que o desnível entre qualquer ponto do cabo é inferior e cerca de 0,5 m. - Podem ser necessários drenos nos pontos baixos para aplicações especiais em instalações durante o inverno. É necessário cuidado neste caso para evitar blocagens em condições de congelação.</p>
	<p>c) <u>Bainhas:</u> Devem permitir a passagem franca da calda e estarem isentas de materiais estranhos (óleo, areia, fitas, ...) que podem (alguns) causar entupimento durante a injeção. Recomenda-se: - Área calda $\geq 2 \times$ Área armadura; - $\phi_{bainha} \geq \phi_{armad.} + 10 \text{ mm}$</p>	<p>c) <u>Bainhas:</u> Necessitam de secção transversal suficiente para assegurar que o cabo possa ser instalado e que a bainha possa ser completamente cheia com calda, de modo a garantir a protecção contra a corrosão assim como a ligação ao betão. Área da secção transversal da bainha deve ser normalmente, $2,5 \times$ Área da secção do aço de pré-esforço. Dependendo do comprimento e geometria do cabo, assim como do método de instalação (feixe completo), a razão pode reduzir-se para 2,0. As bainhas com muito pequeno diâmetro podem conduzir a entupimentos de calda, atrito excessivo e pressões muito elevadas no betão, podendo também criar dificuldades na introdução do aço de pré-esforço (enfiamto). Para sistemas de pré-esforço de varões o diâmetro das bainhas deve respeitar as indicações dos fornecedores. A razão das áreas de aço/bainha neste caso é com frequência maior, uma vez que os varões são geralmente muito curtos e rectos, mas é recomendado cuidado a este respeito. É prevista a possibilidade de se utilizarem bainhas plásticas, pois reconhece-se que as bainhas metálicas não constituem uma protecção estanque contra a corrosão. Com a utilização de bainhas de polietileno e polipropileno com espessura suficiente e com juntas convenientemente estanques consegue-se uma protecção adicional à conferida pela calda de cimento. Para além deste são referidos outros sistemas de protecção, mas que já não utilizam calda de cimento e que, portanto, caem fora do domínio deste estudo.</p>

EN 446 e EN 447	FIP Guides to good practice-practical construction "Grout and grouting of prestressed concrete" - Setembro 1975	FIB (CEB-FIP) - Guides to good practice "Grouting of tendons in prestressed concrete" - Julho 2002
<p>d) <u>Precauções antes da injeção:</u> - Intervalo de tempo entre tensionamento do aço e injeção: - Bainhas devem ser injectadas o mais cedo possível após o tensionamento do aço. - Se o intervalo de tempo entre a introdução das armaduras de pré-esforço e a injeção das bainhas é susceptível de permitir a corrosão do aço, convém prever a utilização de óleos solúveis de protecção no aço ou de ar seco nas bainhas.</p>	<p>d) <u>Precauções antes da injeção</u> - Intervalo de tempo entre tensionamento do aço e injeção: - Injeção realizada com intervalo de tempo mínimo possível após tensionamento do aço. - Se por razões estruturais ou climáticas tiver que ser adiada, recomenda-se a protecção do aço por métodos ou produtos que não impeçam a aderência última da calda. (- para H.R.> 60%: cada $\Delta t = +11^{\circ}\text{C} \Rightarrow$ duplicação da velocidade da corrosão - protecção: p. ex.: óleos. - foram detectadas falhas no aço devidas a longos intervalos de tempo entre pré-esforço e injeção, agravada com factores ambientais agressivos)</p>	<p>d) <u>Precauções antes da injeção</u> - Intervalo de tempo entre tensionamento do aço e injeção: como regra geral, a injeção deve ser realizada o mais rapidamente possível e realizável após tensionamento do aço. Se o aço de pré-esforço permanece na bainha (tensionado ou não) por um largo período de tempo, têm que ser tomadas medidas temporárias para protecção contra a corrosão. Para monocordões lubrificadas individualmente e embainhados não é necessária protecção suplementar. Recorde-se que a injeção pode ser adiada devido ao tempo quente (2.2.e)). A ENV 13670 – "Execution of concrete structures" recomenda: Máx. de 12 semanas entre o fabrico do cabo e a injeção. Máx. de 4 semanas na cofragem antes da betonagem. Cerca de 2 semanas sob tensão antes de aplicar a protecção (permanente ou provisória contra a corrosão). Se em casos excepcionais a injeção tem que ser adiada para além dos prazos referidos anteriormente, o aço de pré-esforço tem que ser protegido por 1 dos seguintes processos: Utilizar cordões protegidos com 1 camada de óleo solúvel em água que não necessita de abundância de água para o retirar. Esta é a solução preferida. Neste caso, a redução da aderência deve ser verificada com o projectista. Sabe-se que há produtos que têm um efeito mínimo na aderência. Soprar ar seco através da bainha. Isto requer uma instalação de grandes dimensões com secador, ventilador e um considerável consumo de potência fixo. Em qualquer caso, todos os pontos de acesso às bainhas nas ancoragens, purgas ou drenos devem ser convenientemente fechados para evitar a entrada de ar e humidade na bainha. Para sistemas com varões, usam-se protecções com ceras insolúveis (massa consistente). Para sistemas de varões lisos os óleos solúveis em água podem ser lavados com água para promover a aderência. Se ocorre um adiamento imprevisto, usam-se, mas não se recomendam, as seguintes medidas provisórias de protecção: A utilização de pó VPI (vapour phase inhibitor) é problemática dada a concentração ao longo da bainha que pode variar consideravelmente, com sobre e infra dosagem. Uma destas condições pode conduzir a uma corrosão localizada. Para além disto, o pó VPI é tóxico. Para demais pormenores, remete-se para as FIP Recommendations "Corrosion protection of prestressing steels" [...]</p>

EN 446 e EN 447	FIP Guides to good practice-practical construction "Grout and grouting of prestressed concrete" - Setembro 1975	FIB (CEB-FIP) - Guides to good practice "Grouting of tendons in prestressed concrete" - Julho 2002
<p>- Limpeza das bainhas: - Pode tornar-se necessário ter a garantia de que as bainhas e as aberturas de entrada e saída permitirão a injeção da calda. Para se obter essa garantia deverá ser introduzido ar comprimido seco na bainha. - Toda a água existente na bainha deve ser expulsa usando ar comprimido e as aberturas de saída nos pontos mais baixos. As consequências da eventual presença de água na bainha devem ser tomadas em consideração na escolha do procedimento de injeção mais apropriado.</p>	<p>- Limpeza das bainhas: - Antes da betonagem inspeccionar as bainhas (com ar comprimido, detectar fugas) e reparar qualquer defeito. - Antes da injeção podem-se descobrir entupimentos ou fendas através de ar comprimido e fechando as purgas. - A lavagem com água pode ser usada para humedecer a bainha; é no entanto muito duvidoso se a sujidade é extraída da bainha (a dispersão indesejada da calda pode ser evitada com o uso de um adjuvante adequado; alguns países acham preferível deixar a água na bainha). - Em climas frios devem-se tomar precauções para evitar o congelamento da água na bainha antes da injeção; depois de um período frio deve-se tomar cuidado para que a bainha e os cordões estejam sem gelo, antes de começar a injeção (as bainhas podem ser cheias com mistura de água e álcool e fechadas; adicionar hidróxido de sódio em benzoato de sódio é recomendado para eliminar o perigo de corrosão; outro método é eliminar a água nas bainhas com ar comprimido; drenar nos pontos baixos nem sempre é realizável).</p>	<p>- Limpeza das bainhas: Se o aço de pré-esforço é instalado depois da betonagem, deve ser verificada a limpeza dentro das bainhas. Para este efeito deve ser soprada através da bainha uma bitola de calibração com um diâmetro ligeiramente inferior ao diâmetro interno (D.I.) da bainha. A bitola de calibração deve estar ligada a um fio, de modo que possa ser puxada para trás no caso da presença de uma obstrução na bainha.</p>
<p>e) <u>Temperaturas:</u> - temperatura da calda: - durante a injeção: de 10 a 25°C - fora destes limites devem ser tomadas precauções especiais, válidas no local de injeção, que assegurem um enchimento adequado das bainhas. - independentemente destas exigências, a temperatura da calda fresca não deverá ser superior a 35°C</p>	<p>e) <u>Temperaturas:</u> - temperatura da calda:</p>	
<p>- Temperatura ambiente: - durante a injeção: de 5 a 30°C - fora destes limites devem ser tomadas precauções especiais, válidas no local de injeção, que assegurem um enchimento adequado das bainhas</p>	<p>- Temperatura ambiente:</p>	<p>- Temperatura ambiente: quando se prevêm temperaturas abaixo de 5°C, devem-se colocar termómetros registadores rigorosos, para registo da temperatura do ar e da estrutura adjacente às bainhas a injectar. - Quando os trabalhos de injeção têm de ser realizados em climas muito quentes, deve-se ter muito cuidado para evitar obstrução da calda e entupimentos na bainha.</p>

EN 446 e EN 447	FIP Guides to good practice-practical construction "Grout and grouting of prestressed concrete" Setembro 1975	FIB (CEB-FIP) - Guides to good practice "Grouting of tendons in prestressed concrete" - Julho 2002
<p>- Temperatura do elemento estrutural: - durante a injeção: de 5 a 25°C. - fora destes limites devem ser tomadas precauções especiais, válidas no local de injeção, que assegurem em enchimento adequado das bainhas.</p>	<p>- Temperatura do elemento estrutural: - não realizar a injeção se a temperatura na bainha for < 4°C durante as 48 horas seguintes à injeção, excepto se se proteger a estrutura (temperatura da estrutura > 5°C, durante 5 dias). - o ponto de congelamento da calda verifica-se entre -2 e -4°C: - Ensaio para verificar que a calda tem R_{gelo}: amassadura; manter durante 36 horas a 2 a -5°C; então baixar bruscamente a temperatura até -20°C ⇒ calda não tem aumento de volume. (isto consegue-se com 6 a 10% de poros pequenos e dispersos na calda).</p>	<p>- Temperatura do elemento estrutural: - Não realizar a injeção se a temperatura da estrutura adjacente à bainha for < 3°C ou se for provável descer abaixo de 3°C durante as 48 horas seguintes, excepto se o elemento for aquecido de modo a manter a temperatura do local da calda injectada acima de 5°C pelo menos durante 48 horas. Nenhum material que contenha gelo ou geada pode ser usado e a bainha e o equipamento devem estar também livres de gelo e geada. - A estrutura não deve estar a temperatura > 35°C para evitar aquecimento rápido e presa da calda. A prática passada ia no sentido de se utilizar água arrefecida, mas a tecnologia actual permite formular caldas que suportam elevadas temperaturas. Em casos extremos os trabalhos de injeção deverão ser realizados de noite ou de manhã cedo, quando a temperatura da estrutura está mais baixa. Misturas especiais com retardadores podem ser usadas depois de realizados testes de eficiência.</p>
<p>f) Operações de injeção da calda: - Período de utilização da calda fresca: caldas utilizadas até 30 minutos após a mistura (sem retardador de presa).</p>	<p>f) Operações de injeção da calda: - Período de utilização de calda fresca: calda deve ser usada na primeira meia hora após amassadura, excepto se se usarem retardadores.</p>	<p>f) Operações de injeção da calda: Deve-se verificar se todas as purgas estão convenientemente instaladas conforme os desenhos de pormenor, se estão fechadas e livres de qualquer obstrução. As posições de purga devem ser marcadas com uma etiqueta presa no cabo e o número da purga para identificação anotado nos registos de injeção. Só pouco antes do início da operação de injeção se devem abrir todas as purgas. Imediatamente antes do início da operação de injeção, as bainhas dos cordões de pré-esforço devem, normalmente, ser sopradas com ar comprimido de modo a expulsarem a água e resíduos presentes nas bainhas e a detectarem obstruções e bloqueamentos, sendo no entanto isto dispensado para cabos de varões de pequena dimensão. Ligar a misturadora e a bomba de acordo com o manual de instruções e iniciar a amassadura de acordo com o método estabelecido, observando a sequência de colocação das componentes (água, cimento, adjuvante). Verificar a consistência da calda na bomba ou no tubo de saída, ligar o tubo de saída com a ligação mais baixa da calda, abrir a válvula na bomba e na entrada (na bainha), de modo que a calda amassada se escoe dentro da bainha. O escoamento da calda dentro da bainha deve ter uma velocidade superior a 12 m/minuto. A injeção deve-se processar sempre no mesmo sentido. Prosseguir com a amassadura e injeção até a calda se escoar para fora da primeira purga. Quando a consistência da calda for semelhante à previamente medida na bomba, a purga pode ser fechada. Progressivamente fechar todas as purgas para o fim do cabo, de acordo com o método estabelecido. Quando a calda se escoar da última saída com a consistência correcta, fechar a saída e manter a pressão durante cerca de 1 minuto. No caso de a pressão descer durante este período, isto indica uma fuga que tem que ser investigada. Se a pressão de injeção atingir o valor de cerca de 10 bares, a extremidade da mangueira da calda deve ser desligada da entrada e ligada à última saída onde saiu calda com a consistência correcta. São considerados casos especiais as uniões dos cabos, cabos verticais, horizontais e exteriores, nos quais se devem observar precauções especiais.</p>

EN 446 e EN 447	FIP Guides to good practice-practical construction "Grout and grouting of prestressed concrete" - Setembro 1975	FIB (CEB-FIP) - Guides to good practice "Grouting of tendons in prestressed concrete" - Julho 2002
- Velocidade de injeção: deverá situar-se, normalmente, entre 5 e 15 metros/minuto	- Velocidade de injeção: entre 6 e 12 metros/minuto (injeção contínua, sem interrupções).	- Velocidade de injeção: dentro da bainha: > 12 m/minuto.
- Comprimento de injeção (o comprimento máximo a ser preenchido numa única operação deve ser < 50 metros, salvo se forem previstos pontos suplementares de injeção)		
- Pontos de injeção: - Bainhas injectadas a partir do ponto de cota mais baixa. - A injeção de bainhas com um perfil ondulado deve ser feita a partir do ponto de cota mais baixa se a diferença máxima de cota for superior a 1,5 metros.	- Pontos de injeção: Bainhas injectadas a partir dos pontos mais baixos. (se não há grande diferença de altura entre o ponto mais alto e mais baixo do cabo, é aceitável injectar por uma purga ligada à bainha ou por uma extremidade até à outra).	
- Fecho de purgas e fim da injeção: - Prosseguir a injeção até a fluidez da calda nas aberturas ser idêntica à injectada. - Fecho das aberturas de saída à medida que a injeção prossegue. - Logo após a injeção as aberturas de saída nos pontos mais altos devem ser abertas para permitir a saída de água de exsudação.	- Fecho de purgas e fim da injeção: - Injeção deve prosseguir até que a consistência da calda que sai pela extremidade livre e pelas purgas seja a mesma da calda injectada. - Fecho das aberturas de saída à medida que o enchimento da bainha prossegue (logo que a calda sai com as mesmas características da injectada; o mesmo se aplica à saída da extremidade). - Se se usar agente expansivo, as purgas devem ser abertas após injeção para permitir saída da água separada nos pontos altos da bainha. Em seguida estas aberturas são fechadas.	Injeção a elevada pressão: Procedimento normalizado nalguns países para cabos de pré-esforço. É realizada do seguinte modo: Sela-se uma ancoragem com um tampo e a outra é selada ficando os cordões salientes, usando, normalmente, argamassa seca pré-embalada. A injeção inicia-se pela extremidade tamponada até a calda sair pela ancoragem-purga. Então todas as saídas são fechadas e a pressão da calda sobe acima dos 12 bares. Esta pressão empurra a água para os interstícios dos cordões, gotejando nas extremidades salientes dos cordões. O processo pára quando deixar de sair água. Isto tem o efeito de reduzir a água contida na calda, prevenindo a exsudação ou segregação. Esta prática é utilizada para caldas realizadas com cimento comum e água, não deverá ser necessária para caldas projectadas para satisfazer os requisitos gerais indicados em 1.2. Este método e os seus efeitos foram discutidos e introduzidos na aprovação de cabos com grande capacidade (>1500 kN), na Alemanha, em 1979 [...].
- Precauções para prevenir saída de calda da bainha após injeção: - Após conclusão da injeção manter a pressão a 0,5 MPa durante 1 minuto.	- Precauções para prevenir saída de calda da bainha após injeção: - Após injeção manter a pressão a 0,5 MPa durante 5 minutos, após fecho das saídas.	- Precauções para prevenir saída de calda da bainha após injeção: Após injeção manter a pressão durante 1 minuto.

EN 446 e EN 447	FIP Guides to good practice-practical construction "Grout and grouting of prestressed concrete" - Setembro 1975	FIB (CEB-FIP) - Guides to good practice "Grouting of tendons in prestressed concrete" - Julho 2002
<p>g) <u>Precauções após injeção:</u> - As ancoragens, os respiradouros e outros elementos metálicos que permanecerão sempre onde foram colocados deverão ser protegidos contra a corrosão e a penetração de água e de outros agentes agressivos.</p>	<p>g) <u>Precauções após injeção:</u> - Todas as aberturas de saída deverão ser hermeticamente fechadas após o final da injeção, para evitar a entrada de água, de materiais descongelados e outros agentes corrosivos. - As ancoragens que vão permanecer no local devem ser protegidas adequadamente, e deve-se evitar a entrada de água ou agentes possivelmente agressivos que corroam o aço ou a própria ancoragem.</p>	
<p>h) <u>Pós-injeção:</u> - Definição: operação complementar, posterior à injeção, destinada a substituir o ar ou água existentes nas bainhas por calda de injeção, <u>antes</u> da presa da calda original. - Efectuada com calda de injeção acabada de misturar. (Se as armaduras de pré-esforço forem constituídas por cordões, pode aplicar-se a calda sob pressão. Imediatamente após a injeção da calda deve proceder-se à pós-injeção, aumentando gradualmente a pressão até um máximo de 1 MPa. Convém que as ancoragens sejam seladas de modo que as extremidades dos cabos ultrapassem as ancoragens. - Se as armaduras de pré-esforço forem constituídas por varões, fios ou cordões, a pós-injeção da calda pode ser efectuada quando a maior parte da água de exsudação estiver separada na bainha e imediatamente antes da calda ganhar presa. A bombagem da calda através de aberturas de entrada em vários pontos pode tornar-se necessária para expulsar a água de exsudação pelas aberturas de saída).</p>		<p>h) <u>Pós-injeção:</u> Reinjeção ou pós-injeção devem ser executadas entre 30 minutos a cerca de 1 hora após a injeção das bainhas, e enquanto a calda está fluida, se existirem dúvidas se a bainha está completamente cheia. Uma indicação de enchimento incompleto são as purgas que não estão cheias de calda, quando abertas 30 minutos após a injeção. Pode então ser necessária uma pressão de injeção superior a 12 bar. A re-injeção é normalmente executada a partir de uma única extremidade. As purgas são abertas progressivamente na direcção do fluxo de injeção e fechadas de novo, depois de o ar ou possivelmente de água terem sido expulsos e alguma calda complementar tenha sido expulsa por pressão através da purga.</p>
<p>i) <u>Reinjeção:</u> - Definição: operação complementar posterior à injeção, destinada a substituir o ar ou água existentes nas bainhas por calda de injeção <u>depois</u> da presa da calda de injeção original. - Se após a presa da calda nas bainhas o controlo nas aberturas de entrada e saída revelar a presença de água ou vazios, deve proceder-se à reinjeção. Esses vazios deverão ser cheios com calda acabada de misturar. Em certos casos pode tornar-se necessário efectuar a reinjeção em vácuo.</p>		

EN 446 e EN 447	FIP Guides to good practice-practical construction "Grout and grouting of prestressed concrete" - Setembro 1975	FIB (CEB-FIP) - Guides to good practice "Grouting of tendons in prestressed concrete" - Julho 2002
<p>2.3 - <u>Controlo de Qualidade:</u> a) <u>Generalidades</u> - em que consiste: - Autocontrolo efectuado pelo empreiteiro, de acordo com regras estabelecidas pelo cliente ou autoridades competentes. - Controlo efectuado por entidade independente para verificar os resultados do autocontrolo do empreiteiro.</p>	<p>a) <u>Generalidades:</u></p>	<p>a) <u>Generalidades:</u> - Todas as entradas e saídas da calda devem ser claramente marcadas. - Durante a injeção deve ser realizado um controlo de qualidade regular. Devem ser colhidas amostras de calda à saída da bomba e na saída da bainha mais afastada da misturadora. A frequência da amostragem é normalmente definida nas especificações do projecto ou requerida pelos engenheiros. Os procedimentos de segurança da qualidade interna devem prever as verificações mínimas indicadas em d) e f).</p>
<p>b) <u>Materiais:</u> é necessário assegurar que apenas serão usados materiais em conformidade com as Normas (Europeias). Ver 1.1 - Materiais constituintes</p>	<p>b) <u>Materiais:</u> é necessário assegurar que apenas serão usados materiais em conformidade com as Normas. Ver 1.1 - Materiais constituintes</p>	
<p>c) <u>Equipamento:</u> avaliação efectuada pelas autoridades competentes: - Verificação e aprovação do equipamento de fabrico e da qualificação do pessoal. - Verificação e aprovação das instalações de injeção. Ver 2.1 - Equipamento</p>	<p>c) <u>Equipamento:</u> - Antes de iniciar as operações de injeção, os equipamentos de lavagem com água e ar comprimido devem estar utilizáveis. - Ver 2.1 - Equipamentos</p>	
<p>d) <u>Calda de injeção:</u> Os ensaios da calda devem ser efectuados pelo menos: - Antes do início dos trabalhos: até 24 horas antes: - Durante as operações de injeção: com a seguinte frequência mínima: - Exsudação: 2 ensaios/dia: uma amostra colhida na misturadora e outra na abertura de saída quando a fluidez da calda tiver um valor satisfatório. - Variação de volume: 1 ensaio/dia. - Resistência mecânica: 1 ensaio/7 dias, com o mínimo de 2 ensaios/trabalho. - Fluidez: 3 ensaios/8 horas. - Se se registarem variações importantes na origem dos constituintes da calda.</p>	<p>d) <u>Calda de injeção:</u> Recomenda-se verificar a resistência à compressão e a exsudação da calda, assim como a expansão, quando se usa um agente expansivo.</p>	<p>d) <u>Calda de injeção:</u> - Tempo de escoamento (e. Fluidez): o tempo de escoamento da calda deve ser determinado e registado para o primeiro cabo a ser injectado e posteriormente em cada 2 h (na bomba). Se surgir desvios de cerca de 20% deve ser chamado o especialista da injeção de caldas para analisar e tomar as medidas necessárias. Não se deve modificar a calda por simples adição da água, sem a aprovação do especialista da injeção. - Exsudação e V. Volume: deve-se ensaiar uma amostra por cada ½ dia, com pelo menos 2 amostras por cada fase/periodo de injeção para v.v. e exsudação, registando-se os resultados. - Resistência à compressão: devem ser preparados 3 provetes para determinação da resistência à compressão aos 7 dias. - Consistência: inspecção visual da consistência da calda na bomba e na saída da bainha. - Densidade: medida da densidade na bomba e na saída da bainha é recomendada 1 por cada ½ dia, com um mínimo de 2 por fase/periodo de injeção.</p>

EN 446 e EN 447	FIP Guides to good practice-practical construction "Grout and grouting of prestressed concrete" - Setembro 1975	FIB (CEB-FIP) - Guides to good practice "Grouting of tendons in prestressed concrete" - Julho 2002
<p>e) <u>Eficiência da injeção da calda:</u> É avaliada com meios adequados. Deve ser efectuada uma inspecção visual nas ancoragens e nas aberturas de entrada e saída intermédias. Em certos casos pode ser realizada uma inspecção não destrutiva das bainhas</p>	<p>e) <u>Eficiência de injeção da calda:</u> Recomenda-se controlo radiográfico quando se suspeita de grandes vazios na bainha, que podem ser acessíveis à penetração de água do exterior. (Defeitos que podem ser determinados por investigação radiográfica: - Enchimento incompleto das bainhas; - Bolsas de água ou ar; - Fendas, se a direcção da fenda é sensivelmente a mesma da direcção da radiação; - Localização dos cordões de pré-esforço; rotura do cordão; - Localização e desvio das bainhas; - Bolsas de inertes).</p>	<p>e) <u>Eficiência da injeção da calda/Enchimento completo da bainha:</u> Controlo de qualidade interno: até no máximo 30 minutos após a injeção da calda deve-se verificar o enchimento completo nos locais acessíveis tais como saídas, ligações, tampos, entradas e bainhas expostas. Outra inspecção visual ou por furação cuidadosa das partes expostas, a presença de calda deve ser verificada. Devem-se registar estas observações. Nas primeiras 12 horas após injeção e após presa da calda, todas as saídas e entradas são abertas e verificadas para enchimento completo. Purgas que não estejam completamente cheias, ou contenham ar ou água exsudada têm que ser cheias "à mão" com calda da mesma qualidade. Pode-se fazer 1 recipiente superior com uma lata ou com 1 funil. O interior da purga deve ser agitado com um arame para ajudar a sair o ar aprisionado e a água. Como remate dos cabos interiores, devem-se cortar as purgas ou desbastar com berbequim até uma profundidade semelhante ao recobrimento das armaduras, formando um rebaixo que deve ser convenientemente tamponado ou selado. Verificação do enchimento completo das bainhas: - Faz parte da verificação do controlo de qualidade a inspecção visual do enchimento completo da parte acessível e muitas vezes crítica da bainha. Porém, presentemente não existe nenhum método aceite em geral e provado para verificar enchimento completo da bainha com calda "in situ", após o endurecimento da calda. Nos EUA os fornecedores estão a ser encorajados a deixar tubos de acesso em ancoragens para inspecção de sondagem por trás da cabeça de ancoragem. - Pode-se usar a seguinte definição de "vazios permitidos": os vazios geralmente existentes nas partes enrugadas das bainhas, cobrindo menos de 5% do diâmetro da bainha, não devem comunicar nem possibilitar a migração da água. Verificação antes do endurecimento: - Verificação das purgas, tampos, ligações e drenos por furação ligeira fazem parte dos procedimentos do controle de qualidade normalizada. - A comparação do volume de calda de facto injectada com a teoricamente necessária, ajuda a evitar erros grosseiros. - No Reino Unido o designado teste do "Sistema de Controlo de Qualidade de Caldas de Oxford" foi desenvolvido para verificar o enchimento completo da bainha imediatamente após a injeção (Concrete Society Technical Report 47) e para medir e informar (relatório) muitos parâmetros durante o processo de injeção. Verificação após endurecimento: Métodos simples de detectar vazios após endurecimento de calda fazem parte das medidas do controlo de qualidade normalizado, devendo incluir: - Inspeção visual do enchimento nas ancoragens, através da furação ligeira contra o tampo ou removendo-o - Verificação do enchimento de qualquer parte exposta das bainhas, por furação ligeira da bainha, em particular nos pontos altos, secções de fluxo inferior dos pontos altos e secções horizontais. Métodos especiais: devem ser usadas só se existirem dúvidas confirmadas quanto ao enchimento estar incompleto. Tais métodos, realizados normalmente por especialistas incluem: - Endoscopia (método mais usual e mais aceite). - Métodos sónicos e ultrasónicos. - Radiografia ou termografia. Alguns destes métodos estão sujeitos a interpretação, devendo ser convenientemente avaliados antes de confiar nos resultados.</p>

EN 446 e EN 447	FIP Guides to good practice-practical construction "Grout and grouting of prestressed concrete" - Setembro 1975	FIB (CEB-FIP) - Guides to good practice "Grouting of tendons in prestressed concrete" - Julho 2002
		Se se encontrar vazios, é necessária injeção para remediar, que frequentemente é realizada com assistência de vácuo.
f) Outras verificações: - Verificação de volumes:	f) Outras verificações: - Verificação de volumes:	- Verificação de volumes: a comparação do volume de calda de facto injectada com a teoricamente necessária ajuda a evitar erros grosseiros.
- Verificação da pressão	- Verificação da pressão: uma boa impressão de processo de injeção é obtido pela leitura contínua da pressão de injeção na bainha	
- Verificação das temperaturas: Ver 2.2.e) Temperaturas.	- Verificação das temperaturas: Havendo perigo de congelamento, a temperatura da bainha deve ser verificada antes e durante 48 horas após a injeção. Ver 2.2.e) - Temperaturas	- Verificação das temperaturas: Temperatura dos constituintes da calda, da calda fresca, do ar e da estrutura adjacente à bainha a injectar. Uma vez por dia.

ANEXO B

CALDAS DE INJECCÃO UTILIZADAS NA OBRA DE CONSTRUÇÃO DA PONTE DE S. JOÃO SOBRE O RIO DOURO, E SEUS ACESSOS (DEVESAS – CAMPANHÃ)

B1 - BOLETINS DE RECEPÇÃO E ENSAIO DAS CALDAS

(QUADROS B1.1.1a A B1.7.6b)

B2 - RESUMO DAS CARACTERISTICAS DAS CALDAS

(QUADROS B2.1 A B2.7)

B1 - BOLETINS DE RECEPÇÃO E ENSAIO DAS CALDAS

(QUADROS B1.1.1a A B1.7.6b)

COMPOSIÇÕES 1

- Misturadora inicial - Stronghold
- Cimento: moagem especial – Classe de resistência 40
- Adjuvante : Combex 100 - 0,450 kg/100 kg cimento
- Água: Composição 1.1 - $A/C = 0.40$
 - " 1.2 - $A/C = 0.41$
 - " 1.3 - $A/C = 0.42$
 - " 1.4 - $A/C = 0.43$

Misturadora: inicial - Stronghold

Cimento: - moagem especial - Classe de resistência 40

Adjuvante: Conbex 100 - 0,450 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.40

Quadro B.1.1.1 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição nº. 1.1

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Teste no local da obra 2	10/10/85	-	-	-	-	-	-	205	365	389	--	-	-
Obra 2 - 1º tramo do tabuleiro - Viga 2	17/10/85	17.14	20	23	-	15,8	8	250	335	440	-	-	-
		17.23	18	-	-	11,0	8	-	-	-	-	-	-
Obra 2 - 1º tramo do tabuleiro - Vigas 1 e 3		11.18	20	24,5	-	16,0	7,2	-	-	-	-	-	-
		14.15	20	23	-	14,0	7	-	-	-	-	-	-
		14.26	-	-	-	19,0	7	-	-	-	-	-	-
		14.38	19	-	-	14,5	7	-	-	-	-	-	-
		14.52	20	24,5	-	14,0	8	260	345	505	-	-	-
		15.23	-	-	-	15,5	8	-	-	-	-	-	-
Obra 2 - 2º tramo do tabuleiro - Viga 4		15.36	19	23,5	-	15,5	8	-	-	-	-	-	-
		17.05	17	-	-	17,6	10	-	-	-	-	-	-
		17.17	17	22	-	10,7	10	-	-	-	-	-	-
		17.42	15	22	-	12,1	5	-	-	-	-	-	-
Obra 2 - 2º tramo do tabuleiro - Vigas 4, 3 e 2		8.38	14,5	20	-	11,1	6	-	-	-	-	-	-
		8.50	15	-	-	11,2	6	-	-	-	-	-	-
		9.05	15	21	-	11,9	8,5	-	-	-	-	-	-
		9.23	15,5	21,5	-	12,0	8,5	-	-	-	-	-	-
		10.04	18	23	-	12,0	8,5	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	10,5	5	-	-	-	-	-	-
	10.48	18	22,5	-	11,2	-	-	-	-	-	-	-	
	10.58	17,5	22,5	-	9,9	-	-	-	-	-	-	-	

Misturadora: inicial - Stronghold

Cimento: moagem especial - Classe de resistência 40

Adjuvante: Conbex 100 - 0,450 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.41

Quadro B1.1.2 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 1.2

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 2 - 1.º tramo do tabuleiro - Viga 1	18/10/85	10.45	20	-	-	13,0	7,2	315	330	490	-	-	-
Obra 2 - 1.º tramo do tabuleiro - Viga 4	19/10/85	10.42	18	-	-	11,2	6	-	-	-	-	-	-

Misturadora: inicial - Stronghold

Cimento: moagem especial - Classe de resistência 40

Adjuvante: Conbex 100 - 0,450 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.42

Quadro B1.1.3 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 1.3

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d		
Obra 2 - 1º tramo do tabuleiro - Viga 4	19/10/85	9.07	13	-	-	11,6	7	-	-	-	-	-
		9.25	-	-	-	11,7	7	265	290	465	-	-
Obra 2 - 3º tramo do tabuleiro - Vigas 1, 2, 3 e 4	21/11/85	9.35	-	-	-	8,7	8	-	-	-	3,4	-
		10.01	9	11	-	9,1	8	-	340	517	-	-
		10.24	7,5	12,5	-	9,5	7	-	-	-	-	-
		10.45	-	-	-	9,5	6	-	-	-	-	-
		11.02	-	-	-	9,6	8	-	-	-	-	-
		11.20	10	13,5	-	8,9	6	-	-	-	-	
		11.37	10	14	-	9,0	9	-	-	-	-	

Misturadora: inicial - Stronghold

Cimento: moagem especial - Classe resistência 40

Adjuvante: Conbex 100 - 0,450 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.43

Quadro B1.1.4 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 1.4

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 2 - 2º tramo do tabuleiro - Viga 2	31/10/85	16.35	16,5	21	-	8,3	-	-	-	-	-	-	-
		16.55	-	-	-	9,8	-	220	245	-	-	-	-
Obra 2 - 2º tramo do tabuleiro - Viga 4, 2 e 1	6/11/85	9.08	-	-	-	8,0	5	-	-	-	-	-	-
		9.22	-	-	-	8,8	5	-	-	-	2,0	-	-
		9.31	-	-	-	10,0	6	-	-	-	-	-	-
		9.43	18	-	-	8,4	6	230	300	420	-	-	-
		9.53	-	-	-	9,8	6	-	-	-	-	-	-
	10.04	-	-	-	9,1	10	210	300	400	-	2,5	-	
	10.21	-	-	-	8,9	6	-	-	-	-	-	-	
	10.35	-	-	-	8,8	6	-	-	-	-	-	-	

COMPOSIÇÕES 2

- Misturadora inicial - Stronghold
- Cimento: fabrico corrente – Classe de resistência 30
- Adjuvante : Combex 100 - 0,450 kg/100 kg cimento
- Água: Composição 2.1 - $A/C = 0.36$
 - " 2.2 - $A/C = 0.37$
 - " 2.3 - $A/C = 0.38$
 - " 2.4 - $A/C = 0.39$
 - " 2.5 - $A/C = 0.40$

Misturadora: inicial - Stronghold

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Conbex 100 - 0,450 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.36

Quadro B1.2.1 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 2.1

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)	
								3 d	7 d	28 d			
Obra 9 - Tabuleiro 9B - fase inicial: Cabo 8	24/04/86	9.55	13	19,5	-	13,0	5	-	374 (6d)	540	-	2,4	-

Misturadora: inicial - Stronghold

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Conbex 100 - 0,450 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.37

Quadro B1.2.2 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 2.2

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 2 - 5º tramo do tabuleiro - Vigas 1, 2, 3 e 4	8/01/86	9.20	9	15	-	11,0	5,4	-	-	-	-	-	-
		9.30	9	15	-	12,0	5,4	-	-	-	2,6	-	-
		9.46	9	15	-	11,7	8	-	-	-	2,4	-	+6,1
		9.54	9	15	-	10,7	8	-	-	-	-	-	-
		10.01	8,5	16	-	11,4	8	-	-	-	2,2	-	-
		10.18	8,5	15	-	10,7	8,5	-	389	562	2,3	-	-
		10.28	9	15	-	12,3	9,5	-	-	-	-	-	-
		10.40	9	15,5	-	11,4	9,5	-	-	-	-	-	-
		11.15	7,5	9	-	13,9	-	-	-	-	-	-	-
		11.27	7,5	10	-	14,6	-	-	-	-	3,2	-	-
Obra 8 - Gigantes 11 e 12 - Tirantes 11 e 12	28/01/86	12.30	9	14	-	11,4	-	-	-	-	-	-	-
		12.42	9	12	-	-	-	-	-	-	1,9	-	-
		13.10	-	-	-	-	11,3	6	-	-	2,2	-	-
		13.30	-	-	-	-	12,7	6	-	-	-	-	-
Obra 2 - 6º tramo do tabuleiro - Vigas 1, 2 e 3	10/02/86	14.39	12,5	17,5	-	15,4	7	-	-	-	-	-	-
		14.46	13,0	18,5	-	15,1	6	-	-	-	-	-	-
		14.58	-	-	-	-	-	7	-	-	-	1,8	-
		15.03	13,5	17,5	-	14,8	7	-	-	-	-	-	-
		15.10	13,5	16	-	13,9	9,5	-	-	-	-	-	-
15.27	13	18,5	-	16,2	-	-	-	-	-	-	-		

Misturadora: inicial - Stronghold

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Ajuvante: Conbex 100 - 0,450 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.37

Quadro B1.2.2 b - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 2.2
Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)	
								3 d	7 d	28 d			
Obra 2 - 6º Tramo do Tabuleiro - Vigas 3 e 4	17/02/86	11.08	12	14	-	23,5	5,5	-	-	-	-	-	
		12.37	13	14,5	-	15,0	7	-	-	1,8	-	-	
		12.55	-	-	-	-	-	7	-	327	440	-	-
		15.24	12	-	-	-	18,2	6	-	-	-	-	-
		11.04	14	18	-	-	13,5	5	-	-	-	-	-
Obra 9 - Tabuleiro 9 A - fase inicial: cabos 1 a 12	21/02/86	11.15	-	-	-	-	7,5	-	-	-	1,2	-	
		11.25	11	17	-	-	14,8	7	-	-	-	-	
		11.42	11	18	-	-	13,5	7	-	-	-	0,8	
		11.54	-	18	-	-	15,3	7	-	-	-	-	
		12.11	-	19,5	-	-	14,0	8	-	-	-	-	
		12.25	-	-	-	-	-	7,5	-	453	615	-	-
		12.38	-	-	-	-	-	7	-	-	-	1,0 (0,8)*	-
		15.20	11	17	-	-	13,8	8	-	-	-	1,3	-
		15.33	12	17,5	-	-	15,1	8	-	-	-	-	-
		10.13	12	18	-	-	12,0	6	-	-	-	-	-
Obra 2 - 7º tramo (último) do tabuleiro - vigas 1, 2, 3 e 4	5/03/86	10.35	13,5	19,5	-	13,0	7	-	-	-	1,6	-	
		11.00	11,5	20	-	12,0	5	-	334	433	-	1,6	
		11.35	12	20,5	-	11,0	8	-	-	-	-	1,6	
		10.18	10	14,5	-	15,0	7	-	-	-	-	-	
Obra 9 - Tabuleiro 9A - fase intermédia: cabos 1 a 10	13/03/86	10.35	10,5	14,5	-	13,0	7	-	-	-	-	-	
		14.03	12	19	-	13,0	8,5	-	-	-	-	-	
		14.25	14	18	-	15,0	7,5	-	-	-	-	-	
		14.49	13,5	17,5	-	14,0	7	-	-	-	-	-	
		15.06	14,5	18	-	15,0	7	-	408	527	-	-	

* - O resultado entre parêntesis refere-se à exsudação determinada numa proveta de maior volume (2 litros).

Misturadora: inicial - Stronghold

Cimento: fábrica corrente - Classe de resistência 30

Ajuvante: Conbex 100 - 0,450 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.37

Quadro B1.2.2 c - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 2.2
Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d		
Obra 4 - 1.º fase, sub-fase A: Cabos T ₂ a T ₅	22/04/86	14.35	15,5	21	-	13,5	5	-	-	-	-	-
		15.07	14	19	-	11,8	5	-	-	1,4 (1,3)*	-	-
		15.19	13	19	-	11,8	5	-	-	2,0	-	-
		15.30	-	-	-	-	5	363	486	-	-	-
Obra 9 - Tabuleiro 9B - fase inicial: Cabos 2, 3, 7, 9 e 10	23/04/86	16.09	18	27	-	12,0	5	-	-	2,2	-	-
		16.26	18	26,5	-	13,9	5	-	-	2,2 (4,3)*	-	-
		16.51	18	26,5	-	15,4	5	-	-	-	-	-
		17.20	17,5	25,5	-	15,0	5	-	-	-	-	-
		17.30	14,5	25	-	13,4	5	354	510	-	-	-
		9.27	14	17	-	12,0	5	-	-	-	-	-
Obra 9 - Tabuleiro 9B - fase inicial: Cabos 4, 5 e 6	24/04/86	9.41	16	19,5	-	14,0	5	-	-	-	-	-
		11.05	14	14,5	-	12,0	-	-	-	3,6	-	-
Obra 8 - Gigante 3 e Tirante 3												
Obra 4 - 1.ª fase, sub-fase A e B: Cabos L ₁ a L ₁₄	6/05/86	9.30	14	23	-	12,0	5,5	-	-	-	-	-
		9.53	14	24	-	13,0	6	-	-	-	-	-
		10.05	14	21,5	-	13,0	7	-	-	-	-	-
		10.19	15	24	-	14,0	7	-	-	-	-	-
		10.32	14	23,5	-	14,0	9	-	-	-	1,5	-
		11.03	15	23	-	14,0	7,5	-	-	-	-	-
		11.18	12,5	24	-	13,0	7	-	-	-	1,1	-
		11.27	12,5	20	-	13,0	7	-	-	-	-	-
		11.45	13	21	-	13,0	7	-	-	-	-	-
		11.59	13	23	-	14,0	8	-	-	-	-	-
12.12	14,5	21,5	-	14,0	7	-	-	-	-	-		

* - O resultado entre parêntesis refere-se à exsudação determinada numa proveta de maior volume (2 litros).

Misturadora: inicial - Stronghold

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Ajувante: Conbex 100 - 0,450 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.37

Quadro B1.2.2 d - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição nº. 2.2
Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d		
Obra 4 - 1ª fase, sub-fase B: cabos T ₆ a T ₁₂	6/05/86	14.45	14,5	21	-	12,2	7	-	-	-	-	-
		15.11	17	23	-	12,1	7	-	-	1,8	-	-
		15.31	14	24	-	12,6	7	-	-	-	-	-
		15.41	15	24	-	12,0	8	-	342	447	1,7 (1,9)*	-
Obra 4 - 1ª fase, sub-fase B: Cabo T ₁₃	7/05/86	9.26	14	23	-	12,0	7	-	-	-	-	-
		15.24	19	22	-	13,0	7,5	-	-	-	-	-
Obra 4 - 1ª fase, subfase C: Cabos T ₁₄ a T ₂₁	20/05/86	15.42	20	22	-	13,3	7	-	-	-	2,7	-
		16.06	20	21	-	13,1	7	-	-	-	2,1 (2,1)*	-
		16.38	20.5	21,5	-	13,7	7	-	391	488	1,9	-

* - O resultado entre parêntesis refere-se à exsudação determinada numa proveta de maior volume (2 litros).

Misturadora: inicial - Stronghold
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 100 - 0,450 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.38

Quadro B1.2.3 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 2.3

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 2 - 4º tramo do tabuleiro - vigas 1, 2, 3 e 4	11/12/85	9.11	11,5	16,5	-	9,3	6	-	-	-	-	-	-
		9.27	-	-	-	10,1	8,5	-	-	-	-	2,3	+4,3
		9.47	-	19,5	-	9,9	10	-	-	-	-	-	-
		10.01	11,5	19,0	-	9,4	9	225	309	399	-	2,2	+5,3
		10.24	-	-	-	11,8	9	-	-	-	-	-	-
		10.34	-	-	-	10,7	6	-	-	-	-	-	-
		10.42	-	-	-	9,8	6	-	-	-	-	-	-
		11.02	-	-	-	9,0	-	-	-	-	-	1,4	+5,3
		11.46	12	19	-	8,9	7,5	-	-	-	-	2,0	-
		11.56	12	20	-	10,1	12	245	325	490	-	1,4	-
Obra 21 - vigas 3, 5, 8 e 12	19/12/85	10.03	14	18,5	-	11,8	4	-	-	-	-	-	-
		10.28	15	18,5	-	10,0	5,5	-	-	-	1,3	+5,9	
		10.39	15,5	18	-	11,1	3	-	-	-	-	-	
		10.57	15	18	-	10,3	3,5	-	-	-	-	-	
		11.10	-	-	-	10,3	3,5	-	304	408	-	1,3	+5,6
Obra 21 - viga 9	20/12/85	9.21	6	13	-	11,7	4,5	-	-	-	1,8	+5,6	
		9.37	-	-	-	12,7	6	-	-	-	-	-	
Obra 2 - 5 tramo do tabuleiro: Viga 1	8/01/86	9.04	9	14,5	-	10,0	4,8	-	-	-	-	-	
Obra 8 - Gigante 12	28/01/86	11.55	-	-	-	12,9	-	-	387	495	-	-	
Obra 8 - Gigantes 4 e 5	5/02/86	16.23	11	18	-	11,7	-	-	-	-	3,3	-	
		16.33	10	18	-	10,7	-	-	348	412	-	2,2	
		16.47	10	18	-	11,0	-	-	-	-	2,2	-	

Misturadora: inicial - Stronghold

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Conbex 100 - 0,450 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0,38

Quadro B1.2.3 b - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 2.3
Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)	
								3 d	7 d	28 d			
Obra 2 - 6º tramo do tabuleiro - viga 4	17/02/86	16.35	10	13	-	11,5	6	-	-	-	-	-	
		16.44	-	-	-	-	6	-	-	2,6	-	-	
Obra 9 - tabuleiro 9A - fase inicial: Cabo 1	21/02/86	10.51	17	18	-	12,7	5	-	-	-	-	-	
		14.26	20	27,5	-	12,0	5	-	-	-	-	-	
		14.42	20	24,5	-	14,0	6	-	-	3,3	-	-	
		14.59	20	23	-	14,0	6	-	396	531	4,4	-	-
		15.18	20	23	-	15,0	8	-	-	-	-	-	-
Obra 9 - tabuleiro 9B - fase final: Cabo 1	23/04/86	15.33	20	23	-	14,2	6,5	-	-	-	2,2 (1,0)*	-	
		15.55	18	27	-	11,0	5	-	-	-	-	-	
Obra 21 - Viga 4	9/05/86	9.12	12,5	21	-	14,0	6,5	-	-	-	1,8	-	
		16.02	24	28	-	12,6	8	-	-	-	-	-	
Obra 9 - tabuleiro 9B - fase intermédia: Cabos 1 a 10	19/05/86	16.22	23,5	28	-	14,0	7	-	-	-	1,7	-	
		16.39	23	27,5	-	13,6	6	-	-	-	-	-	
		16.57	22,5	28	-	12,1	8	-	-	-	1,8	-	
		17.18	20	27	-	13,8	6	-	-	-	1,2	-	
		17.28	-	-	-	-	6	447	531	-	-	-	

* - O resultado entre parêntesis refere-se à exsudação determinada numa proveta de maior volume (2 litros).

Quadro B1.2.3 c - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 2.3
Continuação

Misturadora: inicial - Stronghold
Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
Ajuvante: Conbex 100 - 0,450 kg/100 kg cimento
Água: A/C = 0.38

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kg/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 4 - 1ª fase, subfase C e D (tabuleiro): Cabos L ₁ a L ₁₄	28/05/86	10.54	18	25	-	13,4	6	-	-	-	-	-	-
		11.06	18	23	-	14,4	7	-	-	-	-	1,4	-
		11.32	18	24	-	15,4	7	-	-	-	-	-	-
		11.43	19	24	-	13,7	7	-	-	-	-	-	-
		12.00	19	24	-	12,2	7	-	-	-	-	-	-
		12.16	19	23	-	14,4	7	-	-	-	-	-	-
		12.32	19	25	-	14,4	6	-	-	-	-	1,2 (1,1)*	-
		12.48	19	24	-	14,3	7	-	-	-	-	-	-
		13.04	20	25	-	13,7	7	-	-	-	-	-	-
		13.18	20	25	-	13,2	7	-	-	-	-	-	-
		13.35	20	25	-	13,1	8	-	-	-	450	2,6	-
		13.52	20	24	-	13,7	8	-	-	-	-	-	-
		10.56	26,5	26	-	12,1	6	-	-	-	-	-	-
		11.29	27,5	27	-	14,0	6	-	472 (9d)	549	-	2,4 (2,4)*	-
Obra 4 - 1ª fase, subfase C e D: Cabos T ₂₂ a T ₂₈		11.52	28	28,5	-	12,9	6	-	-	-	1,9	-	
		12.10	29	28	-	15,3	-	-	-	-	1,2	-	
		10.17	25,5	27,5	-	13,6	7,5	-	332 (8d)	414	2,3 (2,2)*	-	
Subfase C e D: Cabos T ₂₉ e T ₃₀		10.37	26,5	27	-	17,0	-	-	-	-	-	-	
		11.59	23	31,5	-	15,4	-	-	-	-	2,7	-	
Obra 8 - gigante 9	12/06/86	10.16	22	25	-	12,0	6	-	-	-	-	-	
		10.31	21	25	-	13,0	7	-	-	-	-	-	
Obra 4 - Estr. IX - 1ª fase, Subfase B: Cabos T ₁₀ a T ₁₇		11.03	21	25	-	13,0	6	-	-	-	1,1 (1,1)*	-	
		11.16	21	25	-	13,0	6	-	377	492	1,0	-	
Obra 8 - Tirante 9	27/06/86	9.04	15	18	-	13,0	7	-	-	-	-	-	

* - O resultado entre parêntesis refere-se à exsudação determinada numa prova de maior volume (2 litros).

Misturadora: inicial - Stronghold

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Conbex 100 - 0,450 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.39

Quadro B1.2.4 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 2.4

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 2 - 6º tramo do tabuleiro - Viga 1	10/02/86	14.20	13	18,5	-	8,4	7	-	-	-	-	-	-
		14.28	13	18	-	12,0	7	-	-	-	-	-	-
Obra 8 - Gigante 10 e Tirante 10	12/06/86	17.13	28	34	-	11,1	-	-	-	-	1,6	-	-
		17.35	28	33,5	-	11,1	6	-	-	-	-	-	-
Obra 9 - Tabuleiro 9B - fase final: Cabos 1 a 10		19.03	26	30,5	-	10,0	7,5	-	-	-	-	-	-
		19.19	25,5	30	-	12,0	7	-	-	-	1,9	-	-
		19.36	25	30	-	13,0	7,5	344	492	-	-	-	-
		19.53	25	29,5	-	12,0	7	-	-	-	2,1	-	-
		20.11	25	29	-	12,0	7,5	-	-	-	-	-	-
		12.32	28,5	31	-	13,0	7	-	-	-	-	-	-
Obra 4 - Estr. IX - 1ª fase, sub-fase A: Cabos L ₁ a L ₁₄ e T ₁ a T ₉	13/06/86	12.48	29,5	30	-	11,0	7	-	-	-	-	-	-
		13.03	30	29	-	11,0	7,5	-	-	-	-	-	-
		13.19	30	29	-	11,0	5	-	-	-	1,4	-	-
		13.37	30	29,5	-	11,0	7	-	-	-	-	-	-
		13.54	31	29,5	-	11,0	7	-	-	-	-	-	-
		14.14	30	29,5	-	11,0	7,5	-	-	-	1,6	-	-
		14.42	33	30,5	-	11,0	7	-	-	-	-	-	-
		15.01	33	29,5	-	12,0	7,5	-	-	-	-	-	-
Obra 9 - Tabuleiro 9C - fase inicial: Cabos 1 a 4 e 6 a 8	3/07/86	15.08	33	29,5	-	-	8	323	427	-	-	-	-
		15.15	33	29,5	-	11,0	7	-	-	-	1,1	-	-
		14.58	28,5	30,5	-	12,0	6	-	-	-	-	-	-
		15.14	28	30	-	14,0	6	-	-	-	-	-	-
		15.29	30	30	-	13,0	-	-	-	-	1,1	-	-
		15.47	30	30	-	15,0	6	-	-	-	-	-	-
		15.55	30	30	-	-	6	345	460	-	0,8 (0,9)*	-	-
		16.03	30	30	-	14,0	-	-	-	-	-	-	

* - O resultado entre parêntesis refere-se à exsudação determinada numa proveta de maior volume (2 litros).

Misturadora: inicial - Stronghold

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Ajuvante: Conbex 100 - 0,450 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.39

Quadro B1.2.4 b - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 2.4
Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)	
								3 d	7 d	28 d			
Obra 9 - Tabuleiro 9C - fase inicial: Cabos 5 e 9	4/07/86	11.57	23	28	-	13,0	5,8	-	-	-	-	-	
		14.23	26	-	-	13,0	6,1	-	319	418	-	0,9 (1,0)*	-
Obra 8 - Gigantes 13 e 14; Tirantes 13 e 14	10/07/86	15.22	24	29	-	12,0	-	-	-	-	-	-	
		15.48	24	28	-	12,0	7	-	-	-	3,3	-	
Obra 4 - Estr. IX - 1ª fase Sub-fase B e C: Cabo L ₁₃	14/07/86	14.43	23	37	-	13,4	-	-	-	-	-	-	
				(temp. cimento elevada)									
		14.37	30,5	30	-	11,0	7,5	-	-	-	-	-	-
		14.53	30	29,5	-	10,9	8	-	-	-	1,0	-	-
		15.10	29	29	-	10,8	8	-	-	-	-	-	-
		15.32	29	29	-	11,4	8	-	-	-	-	-	-
		15.51	28	29,5	-	11,3	8	-	-	-	-	-	-
		16.18	28	29,5	-	12,7	6	-	-	-	1,0	-	-
		17.53	29	30	-	11,2	7	-	-	-	-	-	-
		18.01	-	-	-	-	-	-	310	375	-	-	-
Obra 4 - Estr. IX - 1ª fase, Subfase C: Cabos T ₁₈ a T ₂₆	15/07/86	9.34	25	27	-	12,0	9	-	-	-	-	-	
		9.49	24	27	-	13,0	7	-	-	-	1,6	-	
		10.35	26,5	27	-	13,0	8	-	-	-	1,6	-	
		11.08	27,5	27,5	-	12,0	9	-	-	-	1,0 (0,9)*	-	
		11.21	29	27,5	-	13,0	8	-	296	367	-	-	-

* - O resultado entre parêntesis refere-se à exsudação determinada numa proveta de maior volume (2 litros).

Misturadora: inicial - Stronghold

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Conbex 100 - 0,450 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0,39

Quadro B1.2.4 c - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 2.4
Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d		
Obra 9 - Tabuleiro 9 C - fase final: Cabos 1 a 9	14/08/86	8.59	16	19,5	-	11,3	10	-	-	-	-	-
		9.19	16	20	-	11,4	9	-	-	4,0	-	-
		9.34	16	21	-	11,2	8,5	-	-	-	-	-
		9.52	16,5	21	-	11,0	8	-	-	-	2,6	-
		10.05	17	22	-	11,3	7,5	-	303	388	-	2,0 (2,1)*

* - O resultado entre parêntesis refere-se à exsudação determinada numa proveta de maior volume (2 litros).

Misturadora: inicial - Stronghold

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Ajувante: Conbex 100 - 0,450 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.40

Quadro B1.2.5 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 2.5

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 4 - Estr. IX - 1ª fase, Subfase B e C; Cabos L ₃ a L ₅	14/07/86	17.00	28	30	-	11,0	7	-	-	-	-	-	
		17.17	29	30	-	10,8	6	-	-	-	0,9 (1,0)*	-	
		17.37	29	30	-	10,2	7	-	-	-	-	-	
Obra 9 - Tabuleiro 9C, fase intermédia: Cabos 1 a 9	24/07/86	15.01	21	26	-	10,1	7,5	-	-	-	-	-	
		15.26	22	27	-	10,6	7	-	-	-	2,6 (2,9)*	-	
		15.46	21,5	26	-	10,9	6,5	-	-	-	-	-	
		16.09	21,5	27	-	11,1	7,5	-	-	-	1,9	-	
		16.28	21	26	-	10,4	7	-	315	417	-	1,3	

* - O resultado entre parêntesis refere-se à exsudação determinada numa proveta de maior volume (2 litros).

COMPOSIÇÕES 3

- Misturadora: de rolos, com elevada velocidade de rotação
- Cimento: fabrico corrente – Classe de resistência 30
- Adjuvante : Combex 100 - 0,450 kg/100 kg cimento
- Água: Composição 3.1 - $A/C = 0.38$
 - " 3.2 - $A/C = 0.39$
 - " 3.3 - $A/C = 0.40$
 - " 3.4 - $A/C = 0.42$

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Conbex 100 - 0,450 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.38

Quadro B1.3.1 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 3.1

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d		
Obra 9 - Tabuleiro 9D - fase inicial: Cabos 1 a 9	11/09/86	9.41	22	27	-	10,4	-	-	-	-	-	-
		9.48	22	29	-	10,4	-	-	-	-	-	-
		10.10	24	31	-	10,4	6,5	-	-	-	-	-
		10.32	23	31	-	10,6	6,5	-	-	-	1,1 (0,2)*	-
		10.42	24	30	-	11,0	6,0	-	-	-	-	-
		11.18	24	32	-	11,0	6,5	-	-	-	0,7	-
		11.36	23,5	32	-	10,5	6	-	-	-	0,4	-
		11.49	23	34	-	10,4	6	-	370	466	0,4	-
		16.38	16	12,5	1,97	10,0	8	-	-	-	1,9 (1,0)*	-
		16.53	15	12,5	1,94	10,0	8	-	389	495	1,9	-
Obra 9 - Viga de encabeçam. do Pórtico 29	3/02/87	17.18	13	12	-	10,0	8	-	-	-	-	-
		10.25	-	-	-	10,5	-	-	-	-	-	-
		14.24	-	17	1,96	9,9	5,5	-	-	-	3,8	-
		14.48	11	16,5	1,99	10,0	5,5	-	-	-	2,9	-
		15.07	10,5	17	1,98	10,0	5,2	-	366	489	2,2	-
Obra 14 - Lage do encontro: Cabos 1 a 15	5/02/87	15.30	10,5	18	1,98	10,7	5,1	-	-	-	-	-
		16.10	10,5	17,5	1,98	10,6	5,5	-	-	-	1,7 (0,9)*	-

* - O resultado entre parêntesis refere-se à exsudação determinada numa proveta de maior volume (2 litros).

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Conbex 100 - 0,450 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.39

Quadro B1.3.2 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 3.2

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)	
								3 d	7 d	28 d			
Obra 8 - Gigantes 6 e 7; Tirantes 6 e 7	11/09/86	15.24	-	-	-	11,1	-	-	-	-	-	-	
		15.28	23	30	-	9,8	-	-	-	-	-	-	
		15.43	23	30	-	9,8	-	-	-	1,7	-	-	
		16.13	22	30	-	9,4	-	-	-	1,3 (1,1)*	-	-	
		16.28	22	30	-	10,6	-	-	292	369	-	-	-
		11.15	13	14	1,98	10,3	-	-	-	-	-	-	-
Obra 3 - Laje da plataforma - 2º Trecho: Cabos T ₁ a T ₂₉	2/02/87	12.55	10,5	14	1,94	10,5	5	-	-	-	1,9 (1,4)*	-	
		13.15	11	13	-	10,5	5	-	-	-	-	-	
		13.26	10,5	14	1,95	10,0	5	-	-	-	-	-	
		13.37	12	14	-	10,5	5	-	-	-	2,1	-	-
		13.46	12	14	1,94	10,5	5	-	327	426	2,1	-	-
		10.44	10	8	1,95	10,0	5	-	-	-	-	-	-
Obra 3 - Laje da plataforma - 2º Trecho: Cabos L ₁ a L ₈	3/02/87	10.58	10	9	1,96	10,5	5	-	-	-	1,8 (2,0)*	-	
		11.12	10	9	1,95	10,5	5	-	-	-	-	-	
		11.23	10	9,5	1,94	10,5	5	-	358	485	2,0	-	
		14.40	-	23	1,96	9,7	7	-	-	-	2,1 (1,7)*	3,7 (2,8)**	
Obra 4 - Tirantes de reforço do Viaduto da Rua Cândido dos Reis	6/02/87	14.50	-	24	1,96	10,0	6,5	-	376	481	1,3	0,0	
		9.53	14	18	1,96	12,0	6,5	-	-	-	-	-	
Obra 9 - Tabuleiro entre P ₂₆ /P ₂₉ : Cabos 1 a 9	26/02/87	10.08	14	18	1,96	11,5	6	-	-	-	1,9	-	
		10.38	18	19	1,96	12,0	6,5	-	-	-	1,4 (1,2)*	-	
		10.55	16	20	1,96	11,5	6,5	-	431	591	1,3	-	

* - O resultado entre parêntesis refere-se à exsudação determinada numa proveta de maior volume (2 litros).

** - O resultado entre parêntesis refere-se à variação de volume determinada numa proveta de maior volume (2 litros).

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Conbex 100 - 0,450 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.39

Quadro B1.3.2 b - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 3.2

Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d		
Obra 9 - Tabuleiro 9F - fase inicial (P ₂₉ /P ₃₁): Cabos 10 a 14	26/03/87	14.40	18	25	-	10,4	7	-	-	-	-	-
		15.15	17	23	1,93	11,1	6	281	351	-	1,3 (0,3)*	-
Obra 9 - Idem: Cabo 9 (s/feito)	27/03/87	9.33	15	-	-	12,0	-	-	-	-	-	-
Obra 9 - Idem: Cabos 6 a 9	30/03/87	10.12	13	13	1,94	10,7	6,5	-	-	-	1,3	-
		10.25	14	12	1,93	12,6	6,5	266	408	-	1,6 (1,0)*	-
Obra 9 - Tabuleiro entre P ₃₁ e P ₃₃ : Cabos 6 a 14	29/04/87	14.31	18	28	2,00	11,0	7	-	-	-	2,0	-
		14.40	18	28	-	11,0	7	-	-	-	-	-
		14.50	20	28	1,91	10,0	6,5	-	-	-	-	-
		15.06	20	29	1,92	10,0	6	-	-	-	2,0	-
		15.20	20	29	-	10,0	6,5	-	-	-	-	-
		15.28	21	29	-	12,0	6,5	-	-	-	-	-
		15.38	20	29	1,92	11,0	6,5	350	503	-	1,1 (1,3)*	-
Obra 9 - Tabuleiro entre P ₃₃ e P ₃₆ : Cabos 6 a 14	5/08/87	14.24	31	32	1,93	10,0	6	-	-	-	-	-
		14.34	30	33	1,94	12,0	6,5	-	-	-	1,1	-
		14.45	29	32	-	12,0	6,5	-	-	-	-	-
		14.59	29	31	1,94	11,0	7	-	-	-	1,3	-
		15.10	33	32	-	11,0	7,5	-	-	-	-	-
		15.30	33	32	1,94	11,0	7	418	557	-	1,0 (1,1)*	-

* - O resultado entre parêntesis refere-se à exsudação determinada numa proveta de maior volume (2 litros).

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 100 - 0,450 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.40

Quadro B1.3.3 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 3.3

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)	
								3 d	7 d	28 d			
Obra 3 - Laje da plataforma - 3º Trecho: Cabos T ₁ a T ₃₀ e L ₁ a L ₈	13/11/86	9.37	15	22	1,93	9,1	6	-	-	-	-	-	
		10.09	13	22	1,91	9,5	6	-	-	-	2,3	-	
		11.07	14	23	1,90	10,6	6	-	-	-	1,3	-	
		12.09	16	23	-	10,8	-	337	460	-	-	-	-
		14.46	13	22,5	1,93	9,1	6	-	-	-	-	-	-
		15.13	14	22	1,92	9,4	6	-	342	474	-	2,7 (2,7)*	-
		15.59	14	23	1,92	9,2	6,5	-	-	-	-	2,2	-
		9.59	12	17	1,95	10,1	6	-	-	-	-	2,2 (2,0)*	-
Obra 9 - Tabuleiro 9E - fase inicial: Cabos 1 a 8	12/12/86	10.35	12	19	1,94	10,2	7	-	-	-	1,8	-	
		11.10	12	20	1,94	10,0	-	380	513	-	1,3	-	
		10.20	16	19	1,96	10,0	6,5	-	296	394	-	1,8 (1,6)*	-
Obra 8 - Gigante 2	22/12/86	16.25	12,5	20	1,95	9,2	-	-	305	410	-	2,3 (1,1)*	-
		14.40	12	19	1,97	9,4	6,5	-	325	477	-	2,3 (2,2)*	-
Obra 9 - Viga de encabeçamento do Pórtico 28: Cabos 1 a 4	13/04/87	14.20	20	25	1,92	10,0	6,5	-	-	-	1,6	-	
		14.55	18	26	-	11,0	6,5	-	-	-	-	-	
		15.15	18	26	1,93	10,0	7	-	-	-	-	1,7 (1,8)*	
		15.45	18	29	1,92	10,0	7	-	-	-	-	-	
		16.29	20	30	-	10,0	7	-	325	405	-	1,0	
		14.57	27	31	1,98	9,4	8	-	-	-	-	2,0 (1,3)*	
Obra 9 - Pórtico 36 - Viga de encabeçam.: Cabos 1 a 4	6/07/87	15.07	24	31,5	1,97	9,6	7	-	-	-	1,4	-	
		15.30	-	-	-	-	-	8	314	383	-	-	

* - O resultado entre parêntesis refere-se à exsudação determinada numa proveta de maior volume (2 litros).

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Conbex 100 - 0,450 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.40

Quadro B1.3.3 b - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição nº 3.3

Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d		
Obra 16 - Laje de cobertura do encontro: Cabos 1 a 15	7/04/88	9.25	14	16	1,94	11,0	6	-	-	-	3,5	-
		10.06	18,5	23	1,93	13,0	6	-	-	-	-	-
		10.38	16	17	-	11,0	6	-	-	-	-	-
		11.12	12	16	1,92	11,0	6	-	-	-	4,4	-
		11.28	12	16	-	11,0	6	-	-	-	-	-
		11.47	12	16,5	1,93	11,0	6,5	-	340	437	-	2,2

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Conbex 100 - 0,450 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.42

Quadro B1.3.4 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 3.4

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)	
								3 d	7 d	28 d			
Obra 9 - Tabuleiro 9D - fase intermédia: Cabos 1 a 9	16/10/86	14.44	27	26,5	1,92	8,2	6	-	-	-	-	-	
		14.54	27	28	-	8,6	7	-	-	-	-	-	
		15.17	27	29	1,94	8,8	6,5	-	-	-	1,5 (0,7)*	-	
		16.05	26	30	1,88	8,9	6	-	-	-	1,7	-	
		16.25	22	29	1,86	8,4	7	-	254	353	1,6	-	
Obra 3 - Laje da plataforma - 4º Trecho: Cabos L ₁ a L ₈ e T ₁ a T ₇	20/10/86	15.06	21	25	1,88	9,2	6	-	-	-	-	-	
		15.41	21	24	1,89	9,1	6	-	-	-	1,8 (2,0)*	-	
		15.58	-	-	-	-	-	6	300	399	-	-	-
		16.17	20	25	1,89	8,0	6	-	-	-	-	-	
		16.37	20	24	1,89	8,9	6	-	-	-	2,3	-	
Obra 3 - Laje da plataforma - 4º Trecho: Cabos T ₈ a T ₃₀	21/10/86	17.14	18,5	25	1,90	9,4	7	-	-	-	1,0	-	
		9.38	17	20	1,93	8,4	6,5	-	-	-	-	-	
		10.11	17	21	1,93	9,0	6,5	-	-	-	2,0 (2,6)*	-	
		10.48	18	22	1,93	9,2	6	-	-	-	2,1	-	
		11.12	19	22	1,92	8,8	6	-	300	407	2,0	-	
Obra 9 - Tabuleiro 9D - fase final: Cabos 1 a 9	5/11/86	9.26	16	19	1,95	8,6	6	-	-	-	-	-	
		10.03	17	20	1,91	8,9	6,5	-	-	-	2,1 (2,1)*	-	
		10.25	17	20	1,91	9,3	6	-	-	-	1,8	-	
		10.50	18	22	1,91	9,1	6	-	316	434	1,1	-	
		14.26	18	25	1,90	8,9	-	-	-	-	2,3	-	
Obra 8 - Gigante 8 e Tirante 8		14.54	17	25	1,89	8,7	-	300	411	-	-	-	

* - O resultado entre parêntesis refere-se à exsudação determinada numa proveta de maior volume (2 litros).

COMPOSIÇÕES 4

- Misturadora: de rolos, com elevada velocidade de rotação
- Cimento: fabrico corrente – Classe de resistência 30
- Adjuvante : Combex 208 - 1,200 kg/100 kg cimento
- Água: Composição 4.1 - $A/C = 0.40$
 - " 4.2 - $A/C = 0.45$
 - " 4.3 - $A/C = 0.48$
 - " 4.4 - $A/C = 0.50$
 - " 4.5 - $A/C = 0.51$
 - " 4.6 - $A/C = 0.52$
 - " 4.7 - $A/C = 0.53$
 - " 4.8 - $A/C = 0.55$
 - " 4.9 - $A/C = 0.60$

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Combex 100 - 0,450 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.40

Quadro B1.4.1 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 4.1

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d 90 d		
Experiência em área anexa ao armazém de pré-esforço	20/04/88	11.45	21	-	-	>2 min	-	-	-	-	-	-

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 1,200 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.40

Quadro B1.4.2 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 4.2

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Experiência em área anexa ao armazém de pré-esforço	20/04/88	12.05	21	21,5	1,84	42,7	-	-	240	320	-	0,0	-

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Ajuvante: Conbex 208 - 1,200 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.48

Quadro B1.4.3 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 4.3

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)		
								3 d	7 d	28 d				
Obra 4 - Estrutura III (tabuleiro): Cabo 30 Obra 14 - 2º tramo do tabuleiro: Alma montante - cabo 1 e 3; Alma central - cabos 1, 2, 4 e 7; Alma jusante - cabos 1 a 7	29/09/88	16.15	20	27	-	45	7	-	-	-	-	-		
	7/04/89	14.36	15	20	1.96	48	6,5	-	-	-	-	-	-	
		14.55	16	20	1.96	47	6,5	-	-	-	-	-	-	
		15.43	17	20	1.96	50	6,5	-	-	-	-	-	-	
		16.20	13	20	1.96	51	7	-	-	-	-	-	-	
		16.46	13	20	1.96	47	7	-	-	-	-	-	-	
		17.05	13	20	1.96	49	6	-	-	-	-	-	-	
		17.23	13	20	1.96	49	6	-	-	-	-	-	-	
		17.48	9	20	1.96	53	8	-	183	260	-	-	-	-
		18.15	9	20	1.96	51	7	-	-	-	-	-	-	-
		19.00	11	19	1.95	48	7,5	-	-	-	-	-	-	-
		19.52	11	19	1.95	48	6	-	-	-	-	-	-	-
		9.34	11	17	1.96	45	7	-	-	-	-	-	-	-
		10.03	13	19	1.96	43	7,5	-	-	-	-	-	-	-
		10.24	11	17	1.96	45	6	-	171 (6d)	218 (27d)	-	-	-	-

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 1,200 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.50

Quadro B1.4.4 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º. 4.4

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)	
								3 d	7 d	28 d			
Experiência em área anexa ao armazém do pré-esforço	20/04/88		21	21,5	-	28,9	-	-	225	311	-	0,0 (0,0)*	-
Obra 10 - Tabuleiro 10A, 1ª fase (P ₃₀ /P ₃₈): Cabos 1 a 4	8/09/88	15.56	32	31,5	1,71	17	6	-	246	262	-	-	-
		16.05	33	31	-	19	6,5	-	-	-	-	-	-
		16.13	33	30,5	-	18	6	-	-	-	-	-	-
		16.21	20	28	-	29	6,5	-	-	-	-	-	-
Obra 4 - Estrutura III (tabuleiro): Cabos 1 a 29	29/09/88	17.15	19	29	-	23	7	-	-	-	-	-	-
		17.41	19	28,5	1,81	26	6	-	-	-	-	-	-
		18.26	18	27,5	1,80	26	7	-	-	-	-	-	-
		18.55	18	28	1,80	26	6,5	-	-	-	-	-	-
		19.51	18	28	1,81	27	6,5	-	-	-	-	-	-
		20.40	16	27	1,81	26	7	-	-	-	-	-	-
		21.45	15	27	1,80	28	7	-	-	-	-	-	-
		22.06	14	26	1,81	26	6,5	-	-	260	317	-	-
Obra 4 - Variante provisória - 1º tramo: Cabos T ₁ a T ₉ e L ₁ a L ₄	8/11/88	15.48	19	26,5	1,88	35	6	-	263	324	-	0,0 (0,0)*	-
		16.35	19	26,5	-	32	6	-	-	-	-	0,0	-
		16.46	18,5	25	-	27	6	-	-	-	-	-	-
Obra 4 - Variante provisória - 2º tramo: Cabos T ₁ a T ₃₀ e L ₁ a L ₃	7/12/88	13.02	13	19	1,94	42	6,5	-	234	277	-	0,0	-
		13.50	15	19	-	45	7,5	-	-	-	-	-	-
Obra 4 - Estrutura IV - Tabuleiro: Cabos 1 a 17, lado Sul (verticais)	6/01/89	9.35	11	14,5	-	42,5	-	-	-	-	-	-	-
		10.32	13	17	-	51,2	-	-	-	-	-	-	-
		10.59	13	17	1,81	42,9	-	-	-	203	250	-	0,0

* - O resultado entre parêntesis refere-se à exsudação determinada numa proveta de maior volume (2 litros).

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Conbex 208 - 1,200 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.50

Quadro B1.4.4 b - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 4.4

Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)		
								3 d	7 d	28 d				
Obra 4 - Estrutura IV - Tabuleiro: Cabos 2 a 19	9/01/89	10.33	8	16	1,83	47	7	-	-	-	-	-		
		11.18	8,5	16,5	1,83	61	7,5	206	271	-	0,0	-		
		16.33	11	15	-	85(*)	7	-	187	252	-	-	-	
(*) cimento "antigo" (mat. ret. peneiro)														
Obra 15 - Aduelas 0, 1 e 1' (sobre o pilar EI) - 6 cabos (2 por alma)	10/01/89	15.30	-	-	-	35	-	-	190	265	-	-	-	
		Obra 4 - Estrutura IV - Tabuleiro: Cabos 20 a 34	9.57	10	17	1,75	45,9	7	-	-	-	-	-	-
			10.34	12	24	1,77	41,5	7,5	230	291	-	-	-	-
			11.07	13	24	1,76	35,2	7,5	-	-	-	0,0	-	-
			11.39	13,5	24	1,76	36,5	7,5	-	-	-	-	-	-
			15.40	-	-	1,76	26,2	7	-	-	-	-	-	-
19.20	-	-	-	-	7	-	225	310	-	-	-	-		
Obra 10 - Tabuleiro entre os Pórticos 40 e 42: Cabos L ₁ a L ₉	12/01/89	14.53	17	20	1,77	36,7	5,5	-	-	-	-	-		
		16.28	12	19	1,78	35,6	5,5	208	288	-	0,0	-		
Obra 14 - 1º tramo do tabuleiro (Encontro /Pilar E7): Alma central: cabos 9 e 10	14/01/89	9.20	5,5	17	2,02 (?)	38	4	-	-	-	-	-		
		9.40	6	19	2,05 (?)	40,5	4	-	-	-	-	-		
		10.15	8	18	2,04 (?)	45	4	-	-	-	-	-		

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 1,200 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.50

Quadro B1.4.4 c - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 4.4

Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 4 - Variante Provisória: 4º tramo do tabuleiro: Cabos T ₁ a T ₃₀ e L ₁ a L ₄	24/01/89	14.04	12	16	-	28,5	5	-	-	-	-	-	
		15.02	11	16	1,81	42,5	5	-	-	-	-	-	
		16.04	10,5	16	1,80	49,7	5	202	271	-	-	-	
		17.00	10	15	-	68,3	5	-	-	-	-	-	
Obra 4 - Laje de transição entre a variante provisória e a estrutura XII: Cabos T ₁ a T ₁₂ e L ₁ a L ₆	3/02/89	14.15	15	20	-	36,5	5,5	-	-	-	-	-	
		15.12	16	21	-	50,0	5,5	204	265	-	-	-	
		15.55	16	20	-	37,9	5,5	-	-	-	-	-	
Obra 15 - Aduelas 2 e 2' do pilar E1: Cabo 2.1 (alma mont.)	14/03/89	9.23	10	16	1,83	69,9	-	-	-	-	-	-	
Obra 4 - Estrutura XI, Subfase A: Cabos T ₃ a T ₁₄ e L ₁ a L ₁₁	21/03/89	15.41	19	23,5	1,87	40	6,5	-	-	-	-	-	
		16.30	19	23	1,83	51	7	-	-	-	-	-	
		17.12	19	23	1,83	46	6,5	-	-	-	-	-	
		17.53	17	22	1,84	43	7	217	290 (30d)	0,0	-	-	
Obra 14 - 2º tramo do tabuleiro: Alma montante, cabos 4 e 5	7/04/89	18.33	14	20	1,84	40	7,5	-	-	-	-	-	
		11.45	13	19	1,78	40	6,5	-	-	-	-	-	
Obra 15 - Aduelas 0, 1 e 1' sobre o pilar D1: Cabos 1.1 a 1.6	17/04/89	14.45	15	19	1,78	40	5,5	-	-	-	-	-	
		15.10	15	19	1,76	42	6	174	243	0,0	-	-	

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Conbex 208 - 1,200 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.50

Quadro B1.4.4 d - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 4.4

Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d		
Obra 15 - Aduelas 3 e 3' sobre o pilar E1: Cabos 3.1 a 3.6	18/04/89	10.11	12	17,5	1,79	53	6	-	-	-	-	-
								-	-	-	-	-
								-	-	-	-	-
Obra 10 - Tabuleiro entre os Pórticos 53 e 55: Cabos 1 a 16 (longitudinais)	19/04/89	10.53	18	22	1,80	54	7	-	-	-	-	-
								-	-	-	-	-
								-	-	-	-	-
Obra 4 - Variante Provisória - Estrutura XII, Subfase C: cabos T ₁ a T ₁₄ e L ₁ a L ₆	2/05/89	15.12	20	27,5	1,77	30	6	-	-	-	-	-
								-	-	-	-	-
								-	-	-	-	-
								-	-	-	-	-
Obra 14 - 2º Tramo do tabuleiro: Alma montante - cabo 2 e alma central - cabo 3	4/05/89	10.10	15,5	19	-	35,2	5	-	-	-	-	-
								-	-	-	-	-
								-	-	-	-	-
		10.20	15	21	1,83	36,5	5	-	201	254 (35d)	0,0	-
								-	-	-	-	-

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Ajuvante: Conbex 208 - 1,200 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.50

Quadro B1.4.4 e - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 4.4

Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)	
								3 d	7 d	28 d			
Obra 4 - Estrutura III - A: Cabos verticais 1 a 9 e horizontais 1 a 30	8/05/89	15.16	21	25	-	56,9	6	-	-	-	-	-	
		15.30	21	25	-	48,7	6	-	-	-	-	-	-
		16.50	21	26	1,78	50,6	6	265	327	-	-	-	-
		18.06	20	-	1,76	39,0	6	-	-	-	-	-	-
		19.07	19	24,5	1,71	54,3	6	-	-	-	-	-	-
		19.30	19	24,5	1,71	59,0	6	-	-	-	-	-	-
		19.55	18,5	23	1,71	47,8	6	-	-	-	-	-	-
		20.16	18	23	1,72	40,7	6	-	-	-	-	-	-
		20.36	17	23	1,76	43,3	5,5	-	-	-	-	-	-
		21.00	16	22	1,76	64,3	6,5	-	-	-	-	-	-
		21.34	15	22,5	1,76	48,4	6	-	-	-	-	-	-
		22.00	14,5	22,5	1,71	52,3	5,5	-	-	-	-	-	-
		22.30	14,5	22	-	60,0	6	-	-	-	-	-	-
		Obra 4 - Estrutura VIII - laje interior, subfase A: cabos T ₁ a T ₈ e L ₁ a L ₄	11/05/89	9.39	18	20	1,71	55	6	-	-	-	-
10.28	17			21	1,72	56	6	193	233 (21d)	-	-	-	
Obra 4 - Estrutura V - 1ª fase - tabuleiro: Cabos 1 a 22	15/05/89	14.35	20	26	1,79	53	6,5	-	-	-	-	-	
		15.16	21	25	1,74	48	7,5	-	-	-	-	-	
		15.47	21,5	26	1,77	46	6,5	-	-	-	-	-	
		16.17	21,5	26	1,76	43	6,5	231	287	-	-	-	
Obra 4 - Estrutura XI - Subfase B: Cabos T ₁ a T ₁₃	29/05/89	11.20	22	25	1,76	36	6,5	-	-	-	-	-	
		12.22	26	29	1,70	39	6,5	-	-	-	-	-	
		13.05	24	26	1,70	24	6,5	202 (8d)	259	0,0	-	-	

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Conbex 208 - 1,200 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.50

Quadro B1.4.4 f - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 4.4
- Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)	
								3 d	7 d	28 d	90 d			
Obra 4 - Estrutura XI - Subfase B: Cabos L ₁ a L ₁₁	30/05/89	9.51	19	23	1,68	44	6,5	-	-	-	-	-	-	
		10.14	19	23	1,68	40	6,5	-	-	-	-	-	-	
		10.38	19	25	1,65	38	6,5	-	-	-	-	-	-	
		11.06	22,5	25	1,67	37	6,6	-	199	265	-	0,0	-	-
		11.42	21	25	1,64	30	6,5	-	-	-	-	-	-	-
		15.25	22,5	25	1,80	29	6,5	-	-	-	-	-	-	-
Obra 4 - Estrutura VIII - Subfase B: Cabos T ₁ a T ₆ e L ₁ a L ₄	31/05/89	15.47	23	25	1,75	36	6,5	-	-	-	-	-	-	
		16.06	22,5	25	1,86	48	6,5	-	-	-	-	-	-	
		10.18	-	26	1,74	41	-	-	-	-	-	-	-	
		11.20	21	25,5	1,76	40	6,5	-	218	293	-	-	-	
		12.01	22	26	1,76	39	5	-	-	-	-	-	-	
		15.06	22	28	1,76	36	6	-	-	-	-	-	-	
Obra 15 - Aduelas 2 e 2' sobre pilar D1: Cabos 2.1 a 2.6	3/06/89	9.30	17	21	1,75	57	6,2	-	-	-	-	-	-	
		9.53	17	21	1,75	55	6,2	-	-	-	-	-	-	
		10.25	16	23	1,78	53	6,2	-	170 (6d)	241 (27d)	-	0,0	-	
		10.42	17	23	1,76	51	6,5	-	-	-	-	-	-	
Obra 15 - Aduelas 4 e 4' sobre pilar E1: Cabos 4.1 a 4.3, 4.5 e 4.6	3/06/89	11.29	17	23	1,83	58	6,2	-	-	-	-	-	-	

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Conbex 208 - 1,200 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.51

Quadro B1.4.5 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição nº. 4.5

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 14 - 1º Tramo do tabuleiro - Alma central: Cabo 10	14/01/89	10.45	8	19	2,03 (?)	35	4	-	-	-	-	-	-
								-	-	-	-	-	-
								-	-	-	-	-	-
Obra 14 - 1º Tramo do tabuleiro - Alma central: Cabo 5 e 6	18/01/89	10.59 11.20 11.35	9 10 11	16 18 19,5	2,04 (?) 2,04 (?) 2,04 (?)	40 33 32	5 5 5,5	-	-	-	-	-	-
								-	-	-	-	-	-
								-	-	-	-	-	-

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Conbex 208 - 1,200 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.52

Quadro B1.4.6 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 4.6

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d		
Obra 14 - 1º tramo do tabuleiro - Alma central: cabos 7 e 8	14/01/89	11.25	11	18	2,03 (?)	33	4	-	-	-	-	-
		12.00	12	17	2,03 (?)	34	4	-	187	266	-	-
		12.42	16	18	2,01 (?)	36	4,5	-	-	-	-	-
		13.05	15	21	2,03 (?)	25	4,5	-	-	-	0,0	-
Obra 14 - 1º tramo do tabuleiro - Alma central: Cabos 1, 2 e 5	18/01/89	11.55	11	19	2,04 (?)	30	5,5	-	-	-	-	-
		14.50	18,5	18,5	2,01 (?)	22	7	-	-	-	0,0	-
		15.40	13	19	2,04 (?)	27	5	-	202	250	-	-
Obra 14 - 1º tramo do tabuleiro - Alma juzante: Cabos 6, 7, 9 e 10	8/02/89	9.52	9	13	1,66	38	5,5	-	-	-	-	-
		10.06	9	16	1,75	29	5,5	-	-	-	-	-
		10.42	14	18	Balança avariada	33	6,5	-	-	-	-	-
		11.00	15	18	-	32	6,5	-	233	306	0,0	-
		12.03	16	18	-	28	5	-	-	-	-	-
		10.24	15,5	18	1,78	28	4,5	-	-	-	-	-
Obra 14 - 1º tramo do tabuleiro - Alma jusante: Cabos 1 a 5, 7 e 8; Alma montante - cabos 9 e 10	13/02/89	10.48	15	18	1,77	30	3,5	-	-	-	-	-
		11.07	15	18	1,76	35	3,5	-	189	255	0,0	-
Obra 14 - 1º tramo do tabuleiro - Alma montante: cabo 5	16/02/89	8.43	7	19	1,77	42	5	-	-	-	-	-
Obra 14 - 1º tramo do tabuleiro - Alma montante - cabo 8	20/02/89	14.30	19	20	1,82	34	4,5	-	179	267	0,0	-
		14.55	18	20	1,81	30	4,5	-	-	-	-	-

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Conbex 208 - 1,200 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.52

Quadro B1.4.6 b - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição nº. 4.6

Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)	
								3 d	7 d	28 d	90 d			
Obra 15 - Aduelas 2 e 2' sobre pilar E1: Cabos 2.1 a 2.6	14/03/89	9.36	10	17	1,83	59,7	6	-	-	-	-	-	-	
		9.44	10	19	-	47,5	6	-	-	-	-	-	-	
		10.32	10	20	1,83	39,5	6	-	182	246	-	-	-	-
		11.10	10	21	1,83	38,7	6	-	-	-	-	0,0	-	-
		14.41	19	23	2,02 (?)	40	-	-	-	-	-	-	-	-
		15.53	18	22	2,02 (?)	35	6	-	-	-	-	-	-	-
Obra 4 - Estrutura XII: Subfase A: Cabos T ₁ a T ₁₆ e L ₁ a L ₆		16.27	15	21	2,00 (?)	48	6,5	-	212	274	-	0,0	-	
		17.20	17	21	2,03 (?)	37,5	6	-	-	-	-	-	-	

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 1,200 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.53

Quadro B1.4.7 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 4.7

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 14 - 1.º tramo do tabuleiro - Alma montante: Cabos 1 a 4	16/02/89	10.20	10,5	17	1,77	30	5	-	-	-	-	-	-
		10.52	10	19	1,77	36	5	-	194	281	-	0,0	-

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 1,200 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0,55

Quadro B1.4.8 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 4.8

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Experiência em área anexa ao armazém do pré-esforço	30/08/88	11.40	21	22,5	1,75	27	-	-	197	260	-	0,0	-
		12.12	21	24	1,71	24	-	-	190	217	-	0,0	-
Obra 10 - Tabuleiro 10A, 1ª fase (P ₃₆ /P ₃₈): Cabos 5 a 9	8/09/88	15.15	35	32	1,68	21	6,5	-	-	-	-	-	-
		15.28	35	31	1,70	17	6	-	218	238	-	0,0	-
		15.43	35	32	-	17	6,5	-	-	-	-	-	-
Obra 10 - Tabuleiro 10A, P ₃₈ /P ₄₀ : Cabos 1 a 7	26/10/88	10.25	27	29	1,71	17	5,5	-	-	-	-	-	-
		10.48	26	27	1,71	17	6	-	230	279	-	0,0	-
		11.13	28	30	-	17	5,5	-	-	-	-	-	-
Obra 4 - Variante provisória - 1º tramo: Cabos T ₁₀ a T ₂₉	8/11/88	14.50	20	26,5	-	18	6	-	-	-	-	0,0	-
Obra 14 - 1º tramo do tabuleiro - Alma central: Cabos 3 e 4	31/01/89	10.08	9	16	1,78	29,2	5	-	196	246	-	0,0	-
		11.21	11	16	-	27,8	5	-	-	-	-	-	-

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 1,200 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.60

Quadro B1.4.9 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 4.9

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d		
Experiência em área anexa ao armazém do pré-esforço	30/08/88	11.57	21	23,5	1,68	16	-	-	162	196	0,0	-
											(Vestígios de água)	

COMPOSIÇÕES 5

- Misturadora: de rolos, com elevada velocidade de rotação
- Cimento: fabrico corrente – Classe de resistência 30
- Adjuvante : Combex 208 - 0,600 kg/100 kg cimento
- Água: Composição 5.1 - $A/C = 0.45$
 - " 5.2 - $A/C = 0.50$
 - " 5.3 - $A/C = 0.55$

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Conbex 208 - 0,600 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.45

Quadro B1.5.1 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição nº 5.1

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 4 - Estrutura XI, subfase A: Cabos T ₁ e T ₂	21/03/89	14.25	22	23	1,89	25	7	-	-	-	-	-	-

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 0,600 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.50

Quadro B1.5.2 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 5.2

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 4 - Viaduto na Av. República - Tabuleiro: Cabos verticais 1 a 15, lados esquerdo e direito	29/09/88	9.25	18	26	1,84	18	-	-	-	-	-	-	-
		9.48	18	27	1,86	17	-	-	-	0,0	-	-	-
		10.20	21	27	1,80	17	-	-	-	-	-	-	-
		10.51	21	26	1,78	17	-	-	-	-	-	-	-
		11.51	21	26	1,82	19,5	-	-	347	413	-	0,0	-

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 0,600 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.55

Quadro B1.5.3 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 5.3

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d		
Obra 10 - Tabuleiro entre P ₃₈ e P ₄₀ : Cabos 8 e 9	26/10/88	11.32	28	29	1,68	12,0	6	-	209	273	0,0	-

COMPOSIÇÕES 6

- Misturadora: de rolos, com elevada velocidade de rotação
- Cimento: fabrico corrente – Classe de resistência 30
- Adjuvante : Combex 208 - 0,300 kg/100 kg cimento
- Água: Composição 6.1 - $A/C = 0.45$

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 0,300 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.45

Quadro B1.6.1 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 6.1

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 14 - 2º tramo do tabuleiro - Alma montante: Cabos 6 e 7	7/04/89	10.45	10	16,5	2,12	32	6,5	-	256	303	-	-	-

COMPOSIÇÕES 7

- Misturadora: de rolos, com elevada velocidade de rotação
- Cimento: fabrico corrente – Classe de resistência 30
- Adjuvante : Combex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento
- Água: Composição 7.1 - $A/C = 0.39$
 - " 7.2 - $A/C = 0.40$
 - " 7.3 - $A/C = 0.42$
 - " 7.4 - $A/C = 0.45$
 - " 7.5 - $A/C = 0.46$
 - " 7.6 - $A/C = 0.47$

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.39

Quadro B1.7.1 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição nº. 7.1

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 3 - Laje de transição entre as obras 2 e 3; Cabos T ₁ a T ₉ e L ₁ a L ₈	18/05/90	9.16	17	22	1,86	44	6,3	-	-	-	-	-	-
		9.35	17	22	1,86	47	6,3	-	-	-	-	-	-
		10.05	16	24	1,87	55	6,2	-	246	325	-	-	-

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.40

Quadro B1.7.2.a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 7.2

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d		
Obra 9 - Tabuleiro entre P ₃₃ e P ₃₆ (2ª fase): Cabos 0 a 5	4/05/90	9.01	14	23	1,86	56	7,5	-	-	-	-	-
		9.16	15	22	1,86	32	7,5	-	-	-	-	-
		9.30	15	22	1,86	41	7,5	210	271	-	-	-
Obra 6 - Laje da plataforma - 1º trecho: Cabos T ₁ a T ₂₄ e L ₁ a L ₈	22/05/90	14.30	23	28	1,88	39	6	-	-	-	-	-
		15.10	23	30	1,88	47	6,2	252	318	-	-	-
		16.25	26	27	1,86	35	6,5	-	-	-	-	-
		17.04	24	27	1,86	36	6	-	-	-	-	-
Obra 4 - Estrutura VA e VI: Cabos T ₄₆ e T ₄₇	23/05/90	14.28	19	25	1,86	39	6,5	-	158	261	-	-
		9.55	18	23	1,87	80	6,5	-	170	251	-	-
Obra 3 - Laje de transição entre as obras 2 e 3: Cabo T ₁₀	30/05/90											
Obra 6 - Laje da plataforma - 2º trecho: Cabos T ₁ a T ₂₄ e L ₁ a L ₈	5/06/90	14.14	22	27	1,85	80	6	-	-	-	-	-
		14.37	23	27	1,84	30/34	6	-	-	-	-	-
		15.28	23	28	1,84	34	6,2	-	-	-	-	-
		15.53	23	28	1,84	31	6,5	233	345	-	-	-
Obra 4 - Estrutura VIII - Subfase B (laje intermédia): Cabos T ₁ a T ₈ e L ₉ a L ₁₂	16/06/90	16.23	23	28	1,85	32	6	-	-	-	-	-
		9.22	17	23	1,88	67	6	-	-	-	-	-
		10.18	18	26	1,87	46	6,5	219 (6d)	263 (27d)	-	-	-
Obra 4 - Estrutura I e IIA - Laje: Cabos T ₁ a T ₃₅	22/06/90											
		10.00	17	23	1,87	52	6,5	-	-	-	-	-
		10.19	17	24	1,87	42	6	-	-	-	-	-
		11.15	17	24	1,86	35	6	-	-	-	-	-
	12.17	18	24	1,87	37	6	288	384	-	-	-	

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.40

Quadro B1.7.2 b - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição nº. 7.2

Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)	
								3 d	7 d	28 d			
Obra 6 - Laje da plataforma - 3º trecho: Cabos T ₁ a T ₂₄ e L ₁ a L ₈	26/06/90	9.49	19	25	1,87	46	6,5	-	-	-	-	-	
		10.39	19	26	1,86	43	6,5	-	-	-	-	-	
		11.08	19	26	1,86	36	7	250	287	-	-	-	-
		11.34	19	26	1,86	38	6,5	-	-	-	-	-	-
Obra 14 - Tabuleiro entre os pilares E ₃ e E ₂ ; todos os cabos	13/07/90	9.40	20	26	1,87	55	8	-	-	-	-	-	
		9.52	20	26	1,87	51	8	-	-	-	-	-	
		10.10	21	28	1,86	41	8,5	-	-	-	-	-	
		10.30	21	27	1,86	30	8	-	-	-	-	-	
		11.06	20	27	1,86	34	9,5	-	-	-	-	-	
		11.25	21	28	1,86	31	9,5	-	-	-	-	-	
		11.45	22	28	1,86	37	10	-	-	-	-	-	
		12.08	20	27	1,86	35	8,5	-	-	-	-	-	
		12.30	22	29	1,86	34	8,5	-	-	-	-	-	
		13.20	24	30	1,86	38	10,5	-	-	-	-	-	
13.48	24	31	1,86	37	8	-	-	-	-	-			
14.10	24	33	1,86	40	10	-	-	-	-	-			
14.28	23	32	1,86	36	10	-	262	311	-	-			

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.40

Quadro B1.7.2 c - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 7.2

Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 15 - Laje inferior do tabuleiro, entre aduelas 14/14' e 12/12': Cabos 12.1 a 12.8 e 14.1 a 14.8	18/07/90	9.08	25	29	1,87	48	8	-	-	-	-	-	-
		9.22	25	37	1,87	32	8	-	-	-	-	-	-
		9.55	27	32	1,87	36	8	-	-	-	-	-	-
		10.23	29	40	1,86	32	8	-	-	-	-	-	-
		10.56	30	40	1,87	33	10	-	-	-	-	-	-
		11.20	30	40	1,86	30	9,5	-	-	-	-	-	-
		11.40	31	38	1,86	31	10	-	-	-	-	-	-
		12.02	31	39	1,86	27	10	-	-	-	-	-	-
		12.20	32	40	1,86	32	9,5	-	-	-	-	-	-
		12.53	32	42	1,87	21	10	-	-	-	-	-	-
		14.03	32	40	1,87	23	10,5	-	-	-	-	-	-
		14.25	32	40	1,87	34	9	-	-	-	-	-	-
		15.00	33	39	1,87	31	10	-	-	-	-	-	-
		15.39	33	40	1,87	47	10,5	-	-	-	-	-	-
		16.08	34	40	1,86	27	10	-	-	-	-	-	-
16.45	36	41	1,86	34	10,5	-	-	-	-	-	-		
17.12	35	40	1,86	33	10,5	-	270	312 (27d)	-	-	-		

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Combex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.40

Quadro B1.7.2 d - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 7.2

Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)	
								3 d	7 d	28 d			
Obra 16 - Tabuleiro entre os liares D2 e D3: Cabos 1 a 12	30/07/90	8.48	19	25	1,87	32	8	-	-	-	-	-	
		9.15	20	28	1,86	36	8	-	-	-	-	-	
		9.55	20	29	1,86	29	7	-	-	-	-	-	
		10.19	20	29	1,86	30	8	-	-	-	-	-	
		11.04	21	33	1,86	31	7	-	-	-	-	-	
		11.48	22	32	1,86	28	7	-	-	-	-	-	
		12.24	22	32	1,86	26	6	-	-	-	-	-	
		13.18	22	32	1,86	26	7,5	-	-	-	-	-	
		13.40	23	33	1,87	33	6,5	-	251	327	-	-	-
		10.03	22	25	1,78	46	7	-	-	-	-	-	-
		10.18	21	25	1,78	50	7,5	-	262	336	-	-	-
		10.34	20	25	1,78	48	7,5	-	-	-	-	-	-
Obra 4 - Estrutura VIII, Subfase A - Laje intermédia: Cabos T ₁ a T ₆ , L ₉ , L ₁₁ e L ₁₂	1/08/90	14.11	22	25	1,90	49	7,5	-	-	-	-	-	
		14.49	21	25	1,89	42	7	-	229	271	-	-	
		15.29	20	25	1,89	44	7,5	-	-	-	-	-	
Obra 6 - Laje da plataforma - 5.º Trecho: Cabos T ₁ a T ₂₄ e L ₁ a L ₈	2/08/90	15.15	21	32	1,97	43	7,5	-	-	-	-	-	
		15.45	21	32	1,97	40	7,5	-	-	-	-	-	
		16.08	22	33	1,97	42	7,5	-	248	347	-	-	
		16.47	20	32	1,98	45	7,5	-	-	-	-	-	
Obra 4 - Estrutura VIII - 2.ª fase, subfase B: Cabos T ₁ a T ₁₄ e L ₁₅ a L ₂₀	3/09/90	10.25	20,5	-	-	40	7	-	-	-	-	-	
		11.30	20,5	28	-	21,5	-	-	-	-	-	-	
		12.25	-	-	-	-	-	-	293	385	-	-	

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.40

Quadro B1.7.2 e - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição nº. 7.2
 Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d		
Obra 6 - Laje da plataforma: 6º Trecho: Cabos T ₁ a T ₂₄ e L ₁ a L ₈	17/09/90	15.24	26	30	-	45	7	-	-	-	-	-
		16.24	26	30	-	39	7	-	-	-	-	-
		17.30	-	-	-	-	-	7	258	359	-	-
Obra 4 - Estrutura II e III: Tabuleiro: Cabos L ₁ a L ₁₀ e T ₁ a T ₂₀	20/10/90	9.12	14	18	1,86	52	7	-	-	-	-	-
		9.43	14	19	1,86	54	6	-	-	-	-	-
		10.10	14	19	1,86	58	7,5	-	-	-	-	-
		10.41	14	19	1,86	52	7,5	-	-	-	-	-
		11.07	14	19	1,86	52	7,5	-	181 (6d)	346 (27d)	-	-
Obra 4 - Estrutura VIII - laje do tabuleiro: Cabos L ₁₅ a L ₂₀ e T ₁ a T ₁₂	17/11/90	12.45	18	23	1,87	55	7	-	-	-	-	-
		13.20	22	23	1,87	50	6	-	-	-	-	-
		13.43	22	24	1,88	60	6,5	-	300	343 (27d)	-	-
Obra 4 - Estrutura III, A e B: Cabos L ₉ a L ₂₂ e T ₁ a T ₃₀	13/12/90	10.28	4	14	1,95	57	7	-	-	-	-	-
		11.08	7	14	1,95	55	7	-	-	-	-	-
		11.39	9	15	1,95	60	7	-	-	-	-	-
		12.20	10	15	1,94	58	7	-	-	-	-	-
		15.03	14	16	1,89	50	6,5	-	-	-	-	-
		15.45	14	15	1,89	55	6,5	-	193	289	-	-
16.50	12	15	1,88	50	6,5	-	-	-	-	-	-	

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.40

Quadro B1.7.2 f - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 7.2

Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d		
Obra 4 - Estrutura IX - tabuleiro: Cabos 1 a 26	22/12/90	10.43	1	12	1,87	55	6	-	-	-	-	-
		11.17	6	12	1,88	60	6	-	-	-	-	-
		11.48	9	12	1,87	50	7	-	-	-	-	-
		12.13	11	12	1,87	53	7	-	-	-	-	-
		12.34	11	12	1,87	54	6,5	-	-	-	-	-
		12.57	13	12	1,88	55	8	-	216 (6d)	363 (27d)	-	-
		13.35	13	12	1,88	55	7	-	-	-	-	-
		14.00	13	12	1,89	60	6,5	-	-	-	-	-
		9.53	6	12	1,88	51	6,5	-	-	-	-	-
		10.58	13	14	1,88	55	6	-	-	-	-	-
Obra 4 - Estrutura IV e V - tabuleiro: Cabos T ₁ a T ₄₀ e L ₁₄ a L ₂₄	2/02/91	11.57	15	14	1,88	55	6	-	-	-	-	-
		12.52	15	14	1,90	60	6	-	-	-	-	-
		13.40	15	14	1,87	52	6,5	-	-	-	-	-
		14.02	13	14	1,88	57	7	-	199 (6d)	351 (27d)	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	198	354	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Obra 3 - Tabuleiro - Trecho 3: Cabos T ₁ a T ₂₆ e L ₁ a L ₈	6/03/91	14.38	8	11	1,88	52	10	-	-	-	-	-
		15.23	8	11	1,88	55	9	-	-	-	-	-
		15.55	7	11	1,97	60	9	-	232	379	-	-
Obra 4 - Estrutura X - 2ª fase	20/02/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Ajuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.40

Quadro B1.7.2 g - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição nº. 7.2

Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)	
								3 d	7 d	28 d 90 d			
Obra 4 - Estrutura XII - tabuleiro: Cabos L ₇ a L ₁₈ e T ₁ a T ₃₁	26/03/91	15.02	16	15	1,98	54	9	-	-	-	-	-	
		15.28	16	15	1,99	57	10	-	-	-	-	-	-
		15.53	15	15	1,99	59	10	-	-	-	-	-	-
		17.03	14	15	1,98	59	10	-	-	-	-	-	-
		17.33	12	15	1,96	55	10,5	-	-	-	-	-	-
		17.54	12	15	1,95	55	10	-	-	-	-	-	-
		18.30	12	15	1,97	58	10,5	-	260	405	-	-	-
		19.11	10	15	1,95	55	10	-	-	-	-	-	-
		10.43	18	20	1,96	60	9,5	-	-	-	-	-	-
		11.30	18	21	1,95	55	9,5	-	-	-	-	-	-
Obra 6 - Laje da plataforma: 7º trecho: Cabos L ₁ a L ₈ e T ₁ a T ₂₂	8/04/91	12.07	19	21	1,96	60	10	-	-	-	-	-	
		13.17	20	22	1,95	53	10	-	-	-	-	-	
		14.08	20	22	1,96	55	10	-	209	308	-	-	
Obra 6 - Laje da plataforma: 8º trecho: Cabos L ₁ a L ₉ e T ₁ a T ₁₁	27/04/91	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	
		-	-	-	-	-	-	244 (6d)	356 (27d)	-	-	-	
Obra 4 - Estrutura VI - Tabuleiro superior, 2ª fase: Cabos 1 a 22	3/05/91	14.04	14	16	1,88	55	8	-	-	-	-	-	
		14.50	16	16	1,88	55	8	-	170	236	-	-	

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.40

Quadro B1.7.2 h - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição nº. 7.2

Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 4 - Estrutura VII - laje intermedia: Cabos L ₉ a L ₁₂ e T ₁ a T ₁₃	8/05/91	10.30	14	16	1,97	57	7	-	-	-	-	-	-
		11.02	15	18	1,95	50	7	-	-	-	-	-	-
		11.45	15	19	1,96	56	7	-	212	250	-	-	-

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.42

Quadro B1.7.3 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 7.3

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)	
								3 d	7 d	28 d	90 d			
Obra 4 - Estrutura I - Laje da plataforma	11/09/90	15.40	25	30	-	45	7	-	-	-	-	-	-	
		15.45	25	30	-	37	7,5	-	-	-	-	-	-	
		16.20	28	30	-	46	7	-	-	-	-	-	-	
		16.44	-	-	-	64	7	-	-	-	-	-	-	-
		17.00	-	-	-	50	7,5	-	301	377	-	-	-	-

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.45

Quadro B1.7.4 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 7.4

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 4 - Estrutura VIII, Subfase A - Tramo central: Cabos T ₁ a T ₈ e L ₅ a L ₈	1/06/89	11.05	18	26	1,88	63	6,5	-	-	-	-	-	-
		11.47	25,5	31	1,80	24,9	-	-	-	-	-	-	-
Obra 15 - Aduelas 4 e 4' sobre pilar EI: Cabo 4.4	22/06/89	12.15	27	28	1,81	32,8	-	-	268	343	-	-	-
		14.58	24	28,5	1,86	43	5,5	-	-	-	-	-	-
		15.10	24	29	1,86	37	5,5	-	-	-	-	-	-
		15.39	25	31	1,85	37	6,5	-	302	348	-	-	-
Obra 4 - Estrutura VA: Cabos horizontais: H1 a H24	29/06/89	16.04	25	30	1,85	35	6,5	-	-	-	-	-	-
		11.10	29	30	1,88	43	6	-	-	-	-	-	-
		11.25	29	32	1,89	50	6	-	-	-	-	-	-
		11.44	29	33	1,80	40	6,5	-	-	-	-	-	-
		12.09	29	33	1,88	40	6,5	-	-	-	-	-	-
		12.32	29	35,5	1,88	33	7	-	241	321	-	-	-
		13.04	29	36	1,88	35	6	-	-	-	-	-	-
		13.22	29,5	36	1,88	33	6,5	-	-	-	-	-	-
Obra 4 - Estrutura VII: laje intermédia: Cabos T ₁ a T ₈ e L ₁ a L ₄		13.58	30	38	1,85	36	6,5	-	-	-	-	-	-
		15.16	33	34	1,83	48	6	-	-	-	-	-	-
		15.48	35	36	1,85	36	6	-	266	329	-	-	-

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.45

Quadro B1.7.4 b - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 7.4
 Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)	
								3 d	7 d	28 d			
Obra 15 - Aduelas 5 e 5' sobre o pilar E1: Cabos 5.1 a 5.6	7/07/89	15.05	21	25	1,83	32	5,5	-	-	-	-	-	
		15.35	20	25	1,86	34	5,5	-	-	-	-	-	
		16.13	20	26	1,85	32	7	-	-	-	-	-	
		16.52	22	27	1,85	36	7	-	309	365	-	-	-
		17.20	21	26	1,85	34	7	-	-	-	-	-	-
Obra 14 - 3º tramo do viaduto (pilares E6/E5): alma montante - Cabo 2	10/07/89	15.04	32,5	36	-	43,2	-	-	-	-	-	-	
		15.15	33	35	-	34,4	6	-	-	-	-	-	
Obra 10 - Tabuleiro entre os pórticos 50/53: Cabos 1 a 7	12/07/89	9.53	27	31	-	55	6	-	-	-	-	-	
		11.50	30	34	-	59	6,5	-	314	372	-	-	
Obra 4 - Estrutura VIII - Laje superior, 1ª fase (lateral): Cabos T ₁ a T ₁₃ e L ₁ a L ₆	13/07/89	15.10	34	32	1,80	55,0	6,5	-	-	-	-	-	
		16.05	33	33	1,82	56,8	6,5	-	284	351	-	-	
Obra 15 - Aduelas 4 e 4' sobre o pilar D1: Cabos 4.1, 4.2, 4.5 e 4.6	20/07/89	18.44	21	29	1,83	34	6	-	-	-	-	-	
		18.59	20	29	1,84	32	6	-	-	-	-	-	
		20.20	20	28	1,84	36	6	-	-	-	-	-	
		20.55	18	28,5	1,84	41	7	-	300	381	-	-	
Obra 15 - Aduelas 4 e 4' sobre o pilar D1: Cabos 4.3 e 4.4	24/07/89	14.40	26	31	1,82	30	7	-	-	-	-	-	
		15.00	26	31	1,82	37	7	-	307	379	-	-	
		17.05	-	32	1,82	37	3,5	-	-	-	-	-	

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.45

Quadro B1.7.4 c - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 7.4
 Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d		
Obra 4 - Estrutura VIII - laje superior, subfase B: Cabos T ₁₅ a T ₂₆ e L ₁ a L ₆	25/07/89	14.25	29	33	1,83	60	6,5	-	-	-	-	-
		15.03	29	31	1,84	62	6,5	-	-	-	-	-
		15.30	28	31	1,84	48	7	-	-	-	-	-
		15.52	28	32	1,85	50	6,5	-	378	465	-	-
Obra 4 - Estrutura VIII - laje intermédia, subfase B - tramo central: Cabos T ₉ a T ₁₃ e L ₅ a L ₈	2/08/89	10.34	21	26	1,92	38,4	6,5	-	-	-	-	-
		11.10	21	26	1,90	49,1	6,5	-	230	323	-	-
		11.57	23	26	1,90	40,7	6	-	-	-	-	-
Obra 14 - 3º tramo do viaduto - Alma central: Cabos 16 e 17	4/08/89	14.23	23	30	1,82	33	6	-	-	-	-	-
		14.35	23	30	1,80	35	6	-	-	-	-	-
		14.40	23	32	1,87	44	6	-	-	-	-	-
Obra 14 - 3º tramo do viaduto - Alma montante, cabo 4; Alma jusante, Cabos 6 e 7	7/08/89	9.29	18	24	1,82	35	8	-	-	-	-	-
		9.44	18	24	1,81	50	8	-	-	-	-	-
		9.59	18	27	1,82	43	8	-	-	-	-	-
		11.24	20	29	1,82	34	8	-	248	333	-	-
		16.18	24	31	1,82	40	5	-	-	-	-	-
16.29	24	31	1,82	47	5	-	-	-	-	-	-	
16.55	24	31	1,80	34	5	-	-	-	-	-	-	

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.45

Quadro B1.7.4 d - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 7.4
 Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d		
Obra 15 - Aduelas 6 e 6' sobre o pilar E1: Cabos 6.1 a 6.9	9/08/89	10.04	22	28	1,82	55	5	-	-	-	-	-
		10.15	22	28	1,82	45	5	-	-	-	-	-
		11.03	23	30	1,83	33	6,5	-	-	-	-	-
		11.30	23	30	1,84	37	6,5	-	-	-	-	-
		11.54	22	30	1,84	34	6,5	-	-	-	-	-
		12.28	22	30	1,84	32	6,5	-	-	-	-	-
		12.52	22	30	1,84	35	6,5	-	-	-	-	-
		13.47	24	31	1,84	38	6,5	-	-	-	-	-
		14.23	24	31	1,84	33	6,5	-	-	-	-	-
		15.10	25	32	1,84	32	6,5	317	366	-	-	-
Obra 10 - Tabuleiro entre os pórticos 47/50: Cabos 1 a 7	11/08/89	12.10	27	33	1,90	38	6,5	-	-	-	-	-
		13.03	28	35	1,90	39	6,5	-	-	-	-	-
		13.30	29	36	1,89	39	7	236	329	-	-	-
		10.25	23	30	1,86	34	6,5	-	-	-	-	-
Obra 15 - Aduelas 6 e 6' sobre o pilar E1: laje superior - Cabos 1, 3 a 5 e 8 a 12	12/08/89	10.50	24	31	1,86	32	6,5	-	-	-	-	-
		11.30	25	29	1,86	35	6	-	-	-	-	-
		12.02	25	34	1,86	41	6,5	-	-	-	-	-
		12.35	26	31	1,85	32	7	-	-	-	-	-
		13.57	26	32	1,86	36	6	296 (6d)	405 (27d)	-	-	-
		14.42	25	33	1,86	34	6,5	-	-	-	-	-
Obra 15 - Idem: Cabos 2, 6 e 7	14/08/89	15.55	25	33	1,85	33	6	-	-	-	-	-
		16.50	25	33	1,87	32	6	272	374	-	-	-

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.45

Quadro B1.7.4 e - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 7.4

Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d		
Obra 15 - Aduelas 5 e 5' sobre o pilar D1: Cabos 5.1 a 5.6	16/08/89	14.45	26	31	1,83	22	6	-	-	-	-	-
		15.05	26	31	1,84	18	6	-	-	-	-	-
		15.21	26	31	1,84	19	9	-	-	-	-	-
		15.40	26	31	1,82	18	8	-	-	-	-	-
		15.52	25,5	31	1,82	23	8	-	-	-	-	-
		16.10	25	31	1,85	24	9	-	277	370	-	-
		11.00	24	30	1,84	19	5	-	-	-	-	-
Obra 14 - 3º tramo do viaduto: alma jusante - Cabos 1 a 5; alma montante - Cabos 3, 6 e 7	17/08/89	11.40	25	30	1,81	25	6	-	-	-	-	-
		12.02	25	30	1,81	27	8	-	277	370	-	-
		14.50	28	31,5	1,87	23	5	-	-	-	-	-
		9.17	21,5	26	1,80	25	6,5	-	-	-	-	-
Obra 4 - estrutura II - Cabos 1 a 15	19/08/89	9.55	21,5	25	1,80	28	6,5	-	-	-	-	-
		10.25	22,5	25	1,80	30	6,6	-	-	-	-	-
		10.50	23	25	1,80	37	7	-	259 (6d)	348 (27d)	-	-
		14.16	22	27	1,79	22	6	-	-	-	-	-
Obra 15 - Aduelas 7 e 7' sobre o pilar E1: Cabos 7.1 a 7.6	30/08/89	14.35	22	27	1,79	24	6	-	-	-	-	-
		14.53	22	27,5	1,83	22	6,5	-	-	-	-	-
		15.21	21	27,5	1,83	23	6,5	-	-	-	-	-
		15.39	20,5	28	1,84	29	6	-	-	-	-	-
		16.05	20	27	1,83	25	7	-	-	-	-	-
		16.23	20	28	1,84	30	7	-	-	-	-	-
		16.50	20	28	1,85	25	8	-	-	-	-	-
17.10	20	26,5	1,86	25	7	-	260	334	-	-		

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.45

Quadro B1.7.4 f - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 7.4
 Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 4 - Estrutura VII - subfase A: Cabos T ₁ a T ₁₄ e L ₁ a L ₆	31/08/89	10.00	23	25	1,92	58	6,5	-	-	-	-	-	-
		10.15	23	25	1,88	44	7	-	-	-	-	-	-
		11.00	23	26,5	1,88	32	7	-	-	-	-	-	-
		11.32	23	27	1,90	38	6,5	-	-	-	-	-	-
		9.54	24	30	1,79	48	6,5	-	289	383	-	-	-
		10.55	26	30	1,80	35	7	-	-	-	-	-	-
Obra 15 - Aduelas 7 e 7' sobre o pilar E1: laje superior - Cabos 1 a 3 e 6 a 9	7/09/89	12.05	29	31	1,81	39	7	-	-	-	-	-	-
		14.17	30	34	1,83	22	6,5	-	-	-	-	-	-
		14.55	30	33	1,81	39	6,5	-	-	-	-	-	-
		15.15	30	32	1,84	38	6	-	232	339 (27d)	-	-	-
		10.50	22	29	1,84	40	7	-	-	-	-	-	-
		11.10	22	29	1,84	38	7	-	-	-	-	-	-
Obra 15 - Aduelas 6 e 6' sobre o pilar D1: Cabos 1 a 9	8/09/89	11.33	22,5	30	1,83	32	6,5	-	-	-	-	-	-
		12.12	23,5	32	1,82	42	7	-	-	-	-	-	-
		12.45	22,5	32	1,84	41	7	-	-	-	-	-	-
		13.52	23	32	1,84	37	6,5	-	-	-	-	-	-
		14.17	23,5	31,5	1,83	40	7,5	-	-	-	-	-	-
		14.35	25	33	1,84	41	7	-	256	317	-	-	-
Obra 15 - Aduelas 7 e 7' sobre o pilar E1: laje superior - cabos 4, 5 e 10	12/09/89	10.25	17	24	1,82	40	7	-	-	-	-	-	-
		11.40	19	26	1,77	26	6,5	-	288	375	-	-	-

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.45

Quadro B1.7.4 g - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição nº. 7.4

Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 15 - Aduelas 6 e 6' sobre o pilar D1: laje superior - Cabos 1 e 2	13/09/89	20.15	22	26	1,84	42	7	-	-	-	-	-	-
		20.50	20	26	1,83	35	7	58 (24h) 67 (36h) 78 (42h) 163 (3d)	-	322	-	-	-
Obra 15 - Aduelas 6 e 6' sobre o pilar D1: laje superior - Cabos 7 a 12	16/09/89	9.15	15	22	1,82	35	6,5	-	-	-	-	-	-
		9.38	15	23	1,84	34	6,5	-	-	-	-	-	-
		10.05	16	23	1,84	32	6	-	-	-	-	-	-
		10.25	16	23	1,83	37	7	-	261 (9d)	322 (27d)	-	-	-
Obra 15 - Aduelas 8 e 8' sobre o pilar E1: Cabos 1, 2, 3, 4 e 6 (almas)	23/09/89	11.16	22	25	1,87	28	7,5	-	-	-	-	-	-
		11.49	25	26	1,86	41	7	-	-	-	-	-	-
		12.30	28	28	1,86	33	7	-	-	-	-	-	-
		13.30	28	29	1,86	37	7	-	235 (6d)	332 (27d)	-	-	-
Obra 4 - Estrutura I - 1ª fase, Laje: Cabos 1 a 21	26/09/89	14.25	28	29	1,86	37	7	-	-	-	-	-	-
		15.20	21	26	1,87	40	7,5	-	-	-	-	-	-
		16.18	21	26	1,86	37	7	-	244	329	-	-	-
		17.35	21	26	1,87	34	6,5	-	-	-	-	-	-

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.45

Quadro B1.7.4 i - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 7.4

Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 15 - Aduelas 7 e 7' sobre o pilar DI: laje superior - Cabos 1 a 4 e 7 a 10; Aduelas 6 e 6' sobre o pilar DI: laje superior - Cabos 1 a 6	10/10/89	9.25	18	22	1,88	42	6,5	-	-	-	-	-	-
		9.55	19	23	1,87	39	6,5	-	-	-	-	-	-
		10.37	19	26	1,86	41	6,5	-	-	-	-	-	-
		11.10	20	25	1,86	28,3	7,5	-	-	-	-	-	-
		14.08	24	29	1,88	28	7,5	-	-	-	-	-	-
		14.45	24	29	1,88	30	7	-	-	-	-	-	-
		15.20	22	30	1,88	28	7	-	-	-	-	-	-
		16.15	23	30	1,88	27	7	-	-	-	-	-	-
		16.42	22	30	1,88	34	7	307	371	-	-	-	-
		10.04	19	26	1,86	42	7,5	-	-	-	-	-	-
Obra 14 - 4º tramo do viaduto (entre os pilares E5/E4): Cabos 1 a 3, 11 a 17 e 21 a 27	12/10/89	10.44	19	28	1,86	40	7	-	-	-	-	-	-
		11.21	19	27	1,88	34	6,5	-	-	-	-	-	-
		12.25	21	29	1,88	35	7	-	-	-	-	-	-
		14.18	21	28	1,88	33	7	-	-	-	-	-	-
		15.00	21	28	1,88	34	7,5	-	-	-	-	-	-
		15.23	21	27	1,88	32	6,5	-	-	-	-	-	-
		15.52	20	27	1,87	33	7	-	-	-	-	-	-
		16.55	20	28	1,88	41	6,5	-	-	345	437	-	-
		14.30	18	25	1,87	28	7	-	-	-	-	-	-
		15.00	16	24	1,88	32	7	-	-	-	-	-	-
Obra 4 - Estrutura VIII - Subfase A, laje central: Cabos T ₁ a T ₁₄ , L ₇ a L ₁₁ , L ₁₃ e L ₁₄	13/10/89	15.37	16	24	1,87	30	6,5	-	-	321	365	-	-
		16.08	16	24	1,87	31	7	-	-	-	-	-	-

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.45

Quadro B1.7.4 j - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 7.4
 Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 4 - Idem: Cabo L ₁₂	14/10/89	9.30	18	27	1,88	33	7	-	-	-	-	-	-
Obra 15 - Aduelas 9 e 9' sobre o pilar E1: Cabos 1 a 6 - almas; Cabos 1 a 8 - Laje	17/10/89	10.07	21	25	1,88	26	7	-	-	-	-	-	-
		10.54	22	25	1,86	30	7	-	-	-	-	-	-
		11.41	24	26	1,86	28	7	-	-	-	-	-	-
		12.12	25	27	1,86	27	7	-	-	-	-	-	-
		12.57	24	27	1,86	29	7	-	-	-	-	-	-
		13.22	24	28	1,86	27	6,5	-	-	-	-	-	-
		14.10	23	28	1,86	26	7	-	-	-	-	-	-
		15.01	23	27	1,87	25	7	-	-	-	-	-	-
		15.35	22	27	1,88	42	7	-	-	-	-	-	-
		16.21	21	26	1,87	28	7	-	-	-	-	-	-
		16.58	21	26	1,86	27	7	-	252	322	-	-	-
		Obra 4 - Estrutura VII - Subfase B, laje sul: Cabos T ₁₅ a T ₂₄ e L ₁ a L ₆	19/10/89	14.10	19	26	1,82	26	6,5	-	-	-	-
14.35	19			26	1,82	27	6,5	-	320	387	-	-	-
Obra 14 - 4º tramo do viaduto (entre pilares E5/E4): Cabos 4 a 7	23/10/89	10.15	15	26	1,83	28	6	-	-	-	-	-	-
		10.55	14	25	1,84	30	6	-	-	-	-	-	-
		11.27	14	25	1,85	33	5,5	-	285	345	-	-	-

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.45

Quadro B1.7.4 k - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 7.4

Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)	
								3 d	7 d	28 d			
Obra 15 - Aduelas 8 e 8' sobre o pilar D1: Cabos 1 a 6 - almas	26/10/89	9.40	22	26	1,86	28	6	-	-	-	-	-	
		10.01	22	26	1,85	25	6	-	-	-	-	-	
		10.35	23	28	1,85	28	6	-	-	-	-	-	
		11.10	22	28	1,86	26	6	-	-	-	-	-	
		11.41	23,5	28,5	1,86	29	6	-	287	369	-	-	-
		12.00	24	29	1,86	27	6	-	-	-	-	-	-
		12.50	24	29	1,87	30	6,5	-	-	-	-	-	-
Obra 4 - Estrutura VIII - Superior, tramo central (Subfase B): Cabos T15 a T ₂₆ e L ₇ a L ₁₄	27/10/89	9.38	17	25	1,84	30	6	-	-	-	-	-	
		10.07	18	25	1,84	32	6	-	-	-	-	-	
		10.38	17	25	1,84	32	6,5	-	274	368	-	-	
		11.05	17	25	1,84	31	6	-	-	-	-	-	
Obra 15 - Aduelas 8 e 8' sobre o pilar D1: Cabos 2 a 10 - Laje	28/10/89	9.05	13	26	1,87	31	6,5	-	-	-	-	-	
		9.30	13	23	1,86	34	6	-	-	-	-	-	
		10.00	16	24	1,86	34	7	-	-	-	-	-	
		10.35	17	28	1,86	28	6,5	-	-	-	-	-	
		11.07	18	28	1,88	38	6,5	-	-	-	-	-	
		11.35	19	26	1,88	40	6,5	-	283	356	-	-	
		10.45	16	21	1,88	38	-	-	-	329	-	-	-
Obra 4 - Estrutura IA, 1ª fase: Cabos 1 a 5 e 7 a 14	6/11/89	14.42	16	23	1,87	25	6,5	-	-	-	-	-	
		15.11	15	24	1,86	33	7,5	-	-	-	-	-	

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.45

Quadro B1.7.4 m - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 7.4

Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 11 - Tabuleiro do Viaduto sobre a Rua do Freixo: Cabos 1 a 32	27/11/89	11.30	17	24	1,88	35	6	-	-	-	-	-	-
		12.15	18	25	1,86	38	6	-	-	-	-	-	-
		12.54	17	24	1,87	39	6,5	-	-	-	-	-	-
		13.25	16	24	1,87	35	6,5	-	-	-	-	-	-
		14.00	17,5	23	1,86	30	6	-	-	-	-	-	-
		14.37	17	23	1,86	32	7	-	258	358	-	-	-
		15.14	17	23	1,86	33	6,5	-	-	-	-	-	-
		15.50	16	23	1,87	35	6	-	-	-	-	-	-
		15.30	16	23	1,86	32	6,5	-	-	-	-	-	-
		16.00	16	23	1,86	30	6,5	-	218	267	-	-	-
Obra 4 - Estrutura VII, subfase A - Laje interior, tramo central: Cabos L ₅ a L ₈ e T ₁ a T ₈	12/12/89	9.38	12	19	1,87	39	6,5	-	-	-	-	-	-
		10.25	12	20	1,86	32	6,5	-	276	361	-	-	-
Obra 4 - Estrutura III - A e B - lado esquerdo; Cabos L ₁ a L ₈ e T ₁ a T ₃₀	13/12/89	9.59	16	20	1,86	39	7	-	-	-	-	-	-
		10.30	16	20	1,86	42	7	-	-	-	-	-	-
Obra 15 - Aduelas 10 e 10' sobre o pilar D1: Cabos 1 a 6 - Almas e 1 e 2 - Laje	14/12/89	11.36	15	20	1,84	43	7	-	-	-	-	-	-
		12.10	15	20	1,82	33	6,5	-	-	-	-	-	-
		12.30	15	20	1,82	33	7	-	-	-	-	-	-
		12.53	15	20	1,83	37	7,5	-	-	-	-	-	-
		13.42	15	21	1,83	38	7	-	-	-	-	-	-
		14.08	17	20	1,86	30	7,5	-	206	291	-	-	-
14.40	17	21	1,84	38	7	-	-	-	-	-	-	-	

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.45

Quadro B1.7.4 n - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 7.4

Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)	
								3 d	7 d	28 d			
Obra 4 - Estrutura VA, 2ª fase: Cabos 1 a 24	28/12/89	10.20	13	18	1,87	26	6	-	-	-	-	-	
		10.54	14	18	1,87	33	6	-	-	-	-	-	
		11.20	13	18	1,86	29	6	-	-	-	-	-	
		11.48	13	19	1,86	27	6,5	-	-	-	-	-	
		12.25	15	19	1,87	30	6,5	-	254	322	-	-	-
		9.35	8	14	1,84	34	6,5	-	-	-	-	-	-
Obra 15 - Aduelas 11 e 11' sobre o pilar EI: Cabos 1 a 4 e 6 - Almas	3/01/90	10.25	8	16	1,86	44	6	-	-	-	-	-	
		11.25	9	18	1,86	46	6	-	-	-	-	-	
		12.05	9	19	1,84	52	6	-	-	-	-	-	
		12.36	9	21	1,84	37	6,5	-	-	-	-	-	
		13.35	11	21	1,84	38	7	-	-	-	-	-	
		14.30	11	20	1,85	41	-	-	-	-	-	-	
		15.50	11	18	1,85	43	-	298	392	-	-	-	
		14.33	11	14	1,84	36	6	-	-	-	-	-	
		15.49	10,5	16	1,84	40	5,5	-	293	413	-	-	
		9.55	10	15	1,88	28	6	-	-	-	-	-	
Obra 4 - Estrutura VII - Central, Subfase A - superior: Cabos T ₁ a T ₁₄ e L ₇ a L ₁₄	9/01/90	10.23	11	15	1,87	26	6,5	-	-	-	-	-	
		10.56	11	16	1,88	31	6,5	-	244	337	-	-	
		11.50	12	17	1,87	27	6	-	-	-	-	-	
		11.35	9	16	1,84	39	6,5	-	-	-	-	-	
Obra 15 - Aduelas 11 e 11' sobre o pilar DI: Cabos 1 a 6 - Almas	11/01/90	13.02	13	21	1,84	37	7,5	-	-	-	-	-	
		13.37	13	21	1,84	45	6,5	-	-	-	-	-	
		14.02	13	21	1,86	42	7	-	-	-	-	-	
		14.35	13	21	1,84	33	6,5	-	214	306	-	-	
		15.15	13	21	1,84	36	7	-	-	-	-	-	

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.45

Quadro B1.7.4 o - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 7.4

Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)	
								3 d	7 d	28 d			
Obra 15 - Aduelas 12 e 12' sobre o pilar E1. Cabos 2 a 6 - Almas; Aduelas 11 e 11'. Cabo 5 - Alma	12/01/90	15.01	11	18	1,85	43	6,5	-	-	-	-	-	
		16.25	12	17	-	49	6,5	-	-	-	-	-	-
		16.55	11	16	1,84	40	6,5	-	-	-	-	-	-
		18.00	9	16	1,85	40	6	-	-	-	-	-	-
		18.50	7	17	1,84	38	6	-	-	-	-	-	-
		19.10	7	17	-	36	6	-	-	-	-	-	-
		19.35	7	16	1,85	38	6	-	193	270	-	-	-
		20.40	6	16	1,84	38	6	-	-	-	-	-	-
		9.15	5	15	1,86	35	7,5	-	-	-	-	-	-
		9.38	5	16	1,86	32	8,5	-	-	-	-	-	-
Obra 14 - 5º Tramo do Viaduto (entre pilares E4/E3): Cabos 1 a 7 e 15 a 21 (almas laterais)	13/01/90	10.06	5	16	1,87	37	6	-	-	-	-	-	
		10.53	7	18	1,86	36	7	-	-	-	-	-	
		11.28	7	19	1,86	31	8	-	-	-	-	-	
		11.58	8	19	1,87	32	8	-	-	-	-	-	
		12.33	9	20	1,86	35	8	-	-	-	-	-	
		13.21	10	21	1,86	33	7,5	-	216 (6d)	329 (27d)	-	-	-
		10.37	7	17	1,87	32	7	-	-	-	-	-	-
		11.05	8	18	1,88	38	8	-	-	-	-	-	-
		11.35	8	18	1,88	44	7,5	-	182	284	-	-	-
		Obra 16 - 1º tramo do viaduto (Encontro/Pilar D4): Cabos 5, 7, 11 e 14	20/01/90	9.26	4	13	1,87	32	6	-	-	-	-
10.08	5			13	1,88	35	7,5	-	222 (6d)	312 (27d)	-	-	

Quadro B1.7.4 p - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição nº. 7.4

Continuação

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.45

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 9 - Tabuleiro entre os Pórticos 29 e 31 - 2ª fase: Cabos 0 a 5	24/01/90	15.10	15	18	1,87	30	6,5	-	252	358	-	-	-
		10.00	13	21	1,84	29	7,5	-	-	-	-	-	-
		10.45	12	21	1,84	30	6	-	-	-	-	-	-
		11.18	14	22	1,83	27	7	-	-	-	-	-	-
		11.52	14	22	1,83	26	6	-	-	-	-	-	-
Obra 16 - 1º tramo do viaduto (Encontro/Pilar D4): Cabos 1 a 4, 6 e 15 a 21	25/01/90	12.37	14	22	1,84	26	6	-	304	408	-	-	-
		13.48	14	25	1,83	24	7	-	-	-	-	-	-
		10.49	12	23	1,85	27	6,5	-	-	-	-	-	-
		12.00	11	21	1,85	26	6,5	-	-	-	-	-	-
		13.12	12	21	1,86	28	6,5	-	292 (6d)	424 (27d)	-	-	-
Obra 4 - Estruturas IV e V - Laje da plataforma, 1ª fase: Cabos L ₁ a L ₁₃ e T ₁ a T ₁₀	27/01/90	15.15	13	21	1,84	42	6,5	-	-	-	-	-	-
		16.05	9	21	1,85	28	6	-	274	367	-	-	-
		9.55	12	19	1,87	23	6,5	-	-	-	-	-	-
		10.20	13	19	1,87	26	6	-	237	335	-	-	-
		10.45	14	20	1,86	24	6	-	-	-	-	-	-
Obra 4 - Estruturas I - Cabos 1 a 15	8/02/90	14.05	16	20	1,86	27	6	-	-	-	-	-	-
		14.35	16	20	1,86	30	6,5	-	270	369	-	-	-
Obra 16 - 1º tramo do viaduto (Encontro/Pilar D4): Cabos 8 a 10, 12 e 13	14/02/90	10.45	14	20	1,86	24	6	-	-	-	-	-	-
		10.45	14	20	1,86	24	6	-	-	-	-	-	-
Obra 4 - Estrutura VI - 1ª fase: Cabos 1 a 22	15/02/90	14.05	16	20	1,86	27	6	-	-	-	-	-	-
		14.35	16	20	1,86	30	6,5	-	270	369	-	-	-

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.45

Quadro B1.7.4 q - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 7.4
 Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 4 - Estrutura VII, Subfase B - Laje intermédia, tramo central: Cabos L ₅ a L ₈ e T ₉ a T ₁₁	3/03/90	9.10	12	14	1,86	41	6,5	-	-	-	-	-	-
		9.30	13	15	1,84	37	6,5	-	203 (6d)	308 (27d)	-	-	-
		9.50	13	15	1,84	36	6,5	-	-	-	-	-	-
Obra 4 - Estrutura VII, Subfase B - laje superior, tramo central: Cabos L ₇ a L ₁₄ e T ₁₅ a T ₂₅	9/03/90	9.15	10	15	1,84	37	6,5	-	-	-	-	-	-
		9.42	11	16	1,84	44	6	-	249	358	-	-	-
		10.25	13	18	1,84	46	6,5	-	-	-	-	-	-
Obra 9 - Tabuleiro entre os Pórticos 31 e 33 - 2ª fase: Cabos 0 a 5	6/04/90	10.00	10	15	1,84	24	6	-	-	-	-	-	-
		10.25	11	17	1,84	32	7	-	-	-	-	-	-
		10.44	11	16	1,84	33	8	-	230 (6d)	315	-	-	-
Obra 4 - Estrutura I, 2ª fase - laje (ao nível da Av. da República): Cabos T ₁ a T ₂₁	12/04/90	10.36	15	19	1,88	25	6,5	-	-	-	-	-	-
		10.58	16	20	1,88	28	6,5	-	-	-	-	-	-
		11.28	17	21	1,88	26	7	-	-	-	-	-	-
		11.46	18	22	1,88	39	6,5	-	235	295	-	-	-
Obra 4 - Estruturas VA e VI - laje da plataforma, 1ª fase: Cabos T ₁₃ a T ₄₅	17/04/90	14.45	17	21	1,84	21	6,5	-	-	-	-	-	-
		15.30	17	22	1,84	23	6,5	-	-	-	-	-	-
		16.02	19	22	1,84	22	6	-	197	293	-	-	-
Obra 4 - Idem: Cabos T ₁ a T ₁₂ e L ₁ a L ₁₆	18/04/90	9.20	10	17	1,86	26	6	-	-	-	-	-	-
		9.52	11	18	1,86	38	6,5	-	-	-	-	-	-
		11.38	13	19	1,86	24	6,5	-	-	-	-	-	-
		13.08	15	19	1,86	26	6	-	163	245	-	-	-

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.45

Quadro B1.7.4 r - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 7.4

Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 16 - 2º tramo do tabuleiro (entre os pilares D4 e D3): Cabos 1 a 21	26/04/90	10.42	16	24	1,88	26	7	-	-	-	-	-	-
		10.53	16	24	1,88	24	6	-	-	-	-	-	-
		11.08	16	24	1,88	35	7	-	-	-	-	-	-
		11.30	17	25	1,86	25	6	-	-	-	-	-	-
		12.17	18	26	1,86	25	10	-	-	-	-	-	-
		13.38	18	29	1,86	32	9	-	-	-	-	-	-
		14.00	20	29	1,88	35	9	-	-	-	-	-	-
		14.25	20	28	1,87	28	6,5	-	-	-	-	-	-
		14.57	21	28	1,88	35	7	-	-	-	-	-	-
		15.20	21	29	1,87	31	7	-	-	-	-	-	-
		15.41	22	29	1,86	30	6	-	-	-	-	-	-
		16.06	22	28	1,86	32	7	-	-	-	-	-	-
		16.40	22	29	1,86	38	6,5	-	-	-	-	-	-
17.11	21	29	1,88	35	6	-	182	293	-	-	-		

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)

Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30

Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento

Água: A/C = 0.46

Quadro B1.7.5 a - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição nº. 7.5

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injeção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 14 - 3º Tramo do viaduto - Alma central: Cabos 14 e 15	4/08/89	15.34	22	32	1,84	45	6	-	275	359	-	-	-
		15.50	22	32	1,87	45	6	-	-	-	-	-	-
Obra 15 - Aduelas 14 e 14' sobre o pilar EI: Cabos 1, 2, 3, 5 e 6	3/02/90	8.50	10	15	1,84	61	7	-	-	-	-	-	-
		10.09	11	19	1,84	68	8	-	301 (6d)	405 (27d)	-	-	-
		11.12	12	21	1,83	30	8	-	-	-	-	-	-
		12.05	13	21	1,83	29	8	-	-	-	-	-	-
Obra 15 - Aduelas 14 e 14' sobre o pilar EI: Cabo 4	7/02/90	13.18	13	19	1,85	38	9	-	-	-	-	-	-
		9.05	13	16	1,71	44	6	-	-	-	-	-	-
		9.33	13	17	1,71	41	-	-	187	316	-	-	-
		10.55	16	18	1,84	23	6	-	-	-	-	-	-
Obra 15 - Aduelas 13 e 13' sobre o pilar DI: Cabos 1 a 4 e 6	9/02/90	11.25	15	19	1,84	24	7	-	-	-	-	-	-
		11.48	14	18	1,84	24	7,5	-	-	-	-	-	-
		12.14	14	18	1,84	26	6,5	-	-	-	-	-	-
		12.52	15	18	1,84	28	7	-	221	302	-	-	-
Obra 15 - Idem: Cabo 5	12/02/90	13.50	16	19	1,85	36	-	-	-	-	-	-	-
		15.00	-	-	-	-	-	-	249	325	-	-	-
		9.10	15	18	1,84	23	8,5	-	-	-	-	-	-
		9.55	16	20	1,85	43	6,5	-	-	-	-	-	-
Obra 15 - sobre o pilar EI: Cabos 1 e 3 a 6	21/02/90	10.36	16	20	1,85	38	7	-	-	-	-	-	-
		11.33	16	20	1,86	55	7	-	258	344	-	-	-
		12.35	19	23	1,86	56	7,5	-	-	-	-	-	-
Obra 15 - Idem: Cabo 2	24/02/90	9.02	13	16	1,84	55	7,5	-	181 (6d)	275 (27d)	-	-	-

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.46

Quadro B1.7.5 b - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 7.5

Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 15 - Aduelas 14 e 14' sobre o pilar D1: Cabos 1 a 6	1/03/90	9.33	13	18	1,84	66	9	-	-	-	-	-	-
		11.34	16	21	1,85	87	9	-	-	-	-	-	-
		13.17	18	22	1,84	61	8	-	-	-	-	-	-
		14.13	13	21	1,83	37	9	-	-	-	-	-	-
		14.45	13	22	1,83	29	9	-	215	310	-	-	-
		15.17	13	22	1,83	29	8	-	-	-	-	-	-
Obra 15 - Aduelas 16 e 16' sobre o pilar E1: Cabos 1 a 6	14/03/90	9.08	11	15	1,84	32	6,5	-	-	-	-	-	-
		9.43	13	18	1,84	33	6,5	-	-	-	-	-	-
		10.05	13	19	1,84	39	6	-	-	-	-	-	-
		10.39	14	21	1,84	44	7	-	-	-	-	-	-
		11.27	16	21	1,84	38	7	-	207	284	-	-	-
		12.14	16	22	1,84	40	6,5	-	-	-	-	-	-
Obra 15 - Aduelas 15 e 15' sobre o pilar D1: Cabos 1, 2, 4 e 5	20/03/90	14.08	23	25	1,84	43	6,5	-	-	-	-	-	-
		14.45	24	24	1,84	34	6	-	-	-	-	-	-
		15.18	24	24	1,84	33	-	-	-	-	-	-	-
		16.02	22	23	1,84	40	7	-	-	-	-	-	-
		17.12	21	23	1,85	49	7	-	247	313	-	-	-
		12.00	22	24	1,84	29	7	-	213	288	-	-	-
Obra 15 - Idem: Cabo 6 Obra 15 - Idem: Cabo 3 Obra 15 - Aduelas 17 e 17' sobre o pilar E1: Cabos 1 a 6	21/03/90 22/03/90 30/03/90	9.31	16	18	1,84	42	10	-	213	282	-	-	-
		8.57	10	15	1,86	31	7,5	-	-	-	-	-	-
		9.27	10	16	1,86	29	7	-	-	-	-	-	-
		9.54	11	16	1,86	34	7	-	-	-	-	-	-
		10.24	11	16	1,86	25	7	-	-	-	-	-	-
		10.54	12	18	1,86	29	6,5	-	156	216	-	-	-
11.21	12	18	1,86	27	9	-	-	-	-	-	-		

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.46

Quadro B1.7.5 c - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 7.5
 Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)				Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)
								3 d	7 d	28 d	90 d		
Obra 15 - Aduelas 16 e 16' sobre o pilar D1: Cabos 1 a 6	5/04/90	8.51	12	15	1,84	30	6	-	-	-	-	-	-
		9.54	11	17	1,84	41	8	-	-	-	-	-	-
		10.01	11	17	1,84	31	9	-	-	-	-	-	-
		10.43	11	17	1,84	30	8	-	-	-	-	-	-
		11.13	11	17	1,84	25	7,5	-	210	299	-	-	-
		11.48	10	17	1,84	28	6	-	-	-	-	-	-
		9.22	17	23	1,84	26	8	-	-	-	-	-	-
		10.04	17	24	1,84	30	6	-	-	-	-	-	-
Obra 15 - Aduelas 17 e 17' sobre o pilar D1: Cabos 1 a 6	15/05/90	10.55	18	26	1,84	27	6,5	-	-	-	-	-	-
		11.33	19	25	1,84	27	6,5	-	-	-	-	-	-
		12.15	19	26	1,84	25	8	-	234	279	-	-	-
		13.11	19	22	1,84	24	8	-	-	-	-	-	-
		9.05	19	21	1,83	24	6	-	-	-	-	-	-
		10.03	20	27	1,83	27	6	-	-	-	-	-	-
		10.45	22	27	1,83	27	6	-	-	-	-	-	-
Obra 15 - Aduelas 18 e 18' (Cabos 1 a 5) e 12 e 12' (Cabo 1) sobre o pilar E1	29/05/90	11.20	22	26	1,84	25	6,5	-	-	-	-	-	-
		11.29	24	29	1,83	25	8	-	-	-	-	-	-
		12.00	23	27	1,83	25	7,5	-	271	294	-	-	-
		9.45	20	24	1,85	17	8,5	-	-	-	-	-	-
		10.47	21	27	1,86	36	6	-	-	-	-	-	-
		12.16	21	27	1,86	41	7	-	-	-	-	-	-
Obra 15 - Aduelas 18 e 18' (Cabos 1 a 4) e 12 e 12' (Cabo 1) sobre o pilar D1	12/06/90	13.03	20	27	1,84	23	6,5	-	-	-	-	-	-
		14.27	20	26	1,84	30	6	-	346	383	-	-	-
		9.32	20	25	1,86	54	6	-	284	344	-	-	-
Obra 15 - Aduelas 18 e 18' sobre o pilar D1: Cabo 5	13/06/90												

Misturadora: Rolos (Elev. Veloc. Rot.)
 Cimento: fabrico corrente - Classe de resistência 30
 Adjuvante: Conbex 208 - 1,000 kg/100 kg cimento
 Água: A/C = 0.47

Quadro B1.7.6 b - Boletim de recepção e ensaio das caldas - Composição n.º 7.6

Continuação

Local de aplicação	Data	Hora	Temp. amb. (°C)	Temp. calda. (°C)	Densidade (kg/l)	Fluidez - Cone Marsh (seg.)	Pressão Injecção (kgf/cm ²)	Resist. à compressão (kgf/cm ²)			Exsudação - 3 horas (%)	Var. Vol. - 24 horas (%)	
								3 d	7 d	28 d			
Obra 15 - Aduelas 4 e 4' sobre o pilar E1: Cabo 4.4	22/06/89	11.35	25,5	28	1,79	22,4	-	-	-	-	-	-	
Obra 14 - 3º tramo do viaduto (pilares E6 e E5): Alma montante - Cabos 1 e 2: Alma central - Cabos 2 e 3: Alma jusante - Cabo 1	10/07/89	16.00	33	34,5	1,83	33,7	6	-	-	-	-	-	
		16.40	32	34	1,83	30,6	6	-	-	-	-	-	
		17.00	31,5	32	1,82	52,9	8,5	-	258	335	-	-	-
Obra 15 - Aduelas 7, 7' e 11, 11' sobre pilar D1 - Laje: Cabos 11.1, 11.2, 7.1 e 7.2	17/01/90	14.15	10	15	1,88	37	7	-	-	-	-	-	
		16.32	10	17	1,89	43	8	-	-	-	-	-	
		17.27	9	19	1,84	34	7,5	-	243	294	-	-	-
		17.48	9	19	1,84	36	7,5	-	-	-	-	-	-
		10.45	8	14	1,84	24	7	-	-	-	-	-	-
		11.23	8	16	1,84	24	7,5	-	-	-	-	-	-
		11.57	9	18	1,83	23	7,5	-	-	-	-	-	-
Obra 15 - Aduelas 13 e 13' sobre pilar E1: Cabos 1 a 6	18/01/90	12.45	11	19	1,84	26	7,5	-	-	-	-	-	
		13.53	12	20	1,84	22	7	-	183	269	-	-	
		14.35	12	19	1,84	25	7	-	-	-	-	-	
		10.22	10	13	1,84	35	-	-	-	-	-	-	-
		10.50	10	17	1,80	29	9	-	-	-	-	-	-
		11.33	11	17	1,83	37	8	-	-	-	-	-	-
Obra 15 - Aduelas 12 e 12' sobre pilar D1: Cabos 1 a 6	26/01/90	12.06	13	17	1,84	40	8	-	-	-	-	-	
		12.51	13	17	1,84	39	8,5	-	225	362	-	-	
		14.00	13	17	1,84	43	8	-	-	-	-	-	

B2 - RESUMO DAS CARACTERISTICAS DAS CALDAS

(QUADROS B2.1 A B2.7)

Quadro B2.1 - Quadro resumo das características das caldas - Composições 1

Composição	Características		Número de ensaios	Valor médio	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Valor característico
			n	V _m	Δ	δ (%)	V _k
1.1 (A/C = 0.40)	Fluidez (seg.)		20	13,3	2,6	19,6	-
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	3 dias	3	238	-	-	-
		7 dias	3	348	-	-	-
		28 dias	3	445	-	-	-
Exsudação (%)		-	-	-	-	-	
1.2 (A/C = 0.41)	Fluidez (seg.)		2	12,1	-	-	-
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	3 dias	1	315	-	-	-
		7 dias	1	330	-	-	-
		28 dias	1	490	-	-	-
Exsudação (%)		-	-	-	-	-	
1.3 (A/C = 0.42)	Fluidez (seg.)		9	9,7	1,1	11,6	-
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	3 dias	1	265	-	-	-
		7 dias	2	315	-	-	-
		28 dias	2	491	-	-	-
Exsudação (%)		1	3,4	-	-	-	
1.4 (A/C = 0.43)	Fluidez (seg.)		10	9,0	0,7	7,6	-
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	3 dias	2	220	-	-	-
		7 dias	3	273	-	-	-
		28 dias	3	355	-	-	-
Exsudação (%)		2	2,2	-	-	-	

Valores médios

Fluidez:	11,4 segundos	(A/C _{méd.} = 0.412)
R _{compr.} 28 dias:	430 kgf/cm ²	(A/C _{méd.} = 0.416)
R _{compr.} 7 dias:	314 kgf/cm ²	(A/C _{méd.} = 0.416)
Exsudação:	2,6%	(A/C _{méd.} = 0.427)

Quadro B2.2 - Quadro resumo das características das caldas - Composições 2

Composição	Características	Número de ensaios	Valor médio	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Valor característico	
		n	V _m	Δ	δ (%)	V _k	
2.1 (A/C = 0.36)	Fluidez (seg)	1	13,0	-	-	-	
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	7 dias	1	374	-	-	
		28 dias	1	540	-	-	
	Exsudação (%)	1	2,4	-	-	-	
2.2 (A/C = 0.37)	Fluidez (seg)	69	13,4	1,9	14,2	-	
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	7 dias	9	373	40,7	10,9	307
		28 dias	9	501	60,3	12,0	402
	Exsudação (%)	28	1,9	0,63	32,9	-	
	Varição de volume (%)	1	+ 6,1	-	-	-	
2.3 (A/C = 0.38)	Fluidez (seg)	60	12,5	1,8	14,8	-	
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	3 dias	2	235	-	-	-
		7 dias	10	370	57,1	15,5	276
		28 dias	11	470	55,6	11,8	379
	Exsudação (%)	29	2,0	0,78	38,7	-	
Varição de volume	6	5,3	0,55	10,4	-		
2.4 (A/C = 0.39)	Fluidez (seg)	46	11,8	1,2	9,8	-	
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	7 dias	7	320	19,0	6,0	289
		28 dias	7	418	46,0	11,0	343
	Exsudação (%)	18	1,7	0,86	50,9	-	
2.5 (A/C = 0.40)	Fluidez (seg)	8	10,6	0,37	3,5	-	
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	7 dias	1	315	-	-	-
		28 dias	1	417	-	-	-
	Exsudação (%)	4	1,7	-	-	-	

Valores médios	Fluidez:	12,6 segundos	(A/C _{méd.} = 0.380)
	R _{compr.} 28 dias:	468 kgf/cm ²	(A/C _{méd.} = 0.379)
	R _{compr.} 7 dias:	357 kgf/cm ²	(A/C _{méd.} = 0.379)
	Exsudação:	1,89%	(A/C _{méd.} = 0.380)

Quadro B2.3 - Quadro resumo das características das caldas - Composições 3

Composição	Características		Número de ensaios	Valor médio	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Valor característico
			n	V _m	Δ	δ (%)	V _k
3.1 (A/C = 0.38)	Fluidez (seg)		17	10,4	0,35	3,4	-
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	7 dias	3	375	-	-	-
		28 dias	3	483	-	-	-
Exsudação (%)		10	1,7	1,1	64,8	-	
3.2 (A/C = 0.39)	Fluidez (seg)		39	10,8	0,79	7,4	-
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	7 dias	9	344	58,5	17,0	248
		28 dias	9	463	81,7	17,6	329
	Exsudação (%)		21	1,6	0,38	23,8	-
	Variação de volume (%)		2	1,9	-	-	-
3.3 (A/C = 0.40)	Fluidez (seg)		26	10,2	0,89	8,7	-
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	7 dias	9	329	24,7	7,5	289
		28 dias	9	439	44,4	10,1	366
	Exsudação (%)		18	2,1	0,82	38,6	-
3.4 (A/C = 0.42)	Fluidez (seg)		20	8,8	0,37	4,2	-
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	7 dias	5	294	23,4	8,0	256
		28 dias	5	401	29,7	7,4	352
	Exsudação (%)		13	1,8	0,41	22,9	-

Valores médios	Fluidez:	10,2 segundos	(A/C _{méd.} = 0.397)
	R _{compr.} 28 dias:	445 kgf/cm ²	(A/C _{méd.} = 0.398)
	R _{compr.} 7 dias:	333 kgf/cm ²	(A/C _{méd.} = 0.398)
	Exsudação:	1,80%	(A/C _{méd.} = 0.398)

Quadro B2.4 - Quadro resumo das características das caldas - Composições 4

Composição	Características	Número de ensaios	Valor médio	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Valor característico	
		n	V _m	Δ	δ (%)	V _k	
4.1 (A/C = 0.40)	Fluidez (seg)	1	>2 min.	-	-	-	
4.2 (A/C = 0.45)	Fluidez (seg)	1	42,7	-	-	-	
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	7 dias	1	240	-	-	-
		28 dias	1	320	-	-	-
	Exsudação (%)	1	0	-	-	-	
4.3 (A/C = 0.48)	Densidade (kg/l)	14	1,96	0,004	0,2	-	
	Fluidez (seg)	15	47,9	2,71	5,7	-	
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	7 dias	2	177	-	-	-
		28 dias	2	239	-	-	-
	Exsudação (%)	-	-	-	-	-	
4.4 (A/C = 0.50)	Densidade (kg/l)	78	1,77	0,05	2,9	-	
	Fluidez (seg)	101	41,5	11,3	27,2	-	
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	7 dias	27	211	27,5	13,1	166
		28 dias	27	271	32,0	11,8	219
	Exsudação (%)	18	0,0	0	-	-	
4.5 (A/C = 0.51)	Fluidez (seg)	4	35,0	-	-	-	
4.6 (A/C = 0.52)	Densidade (kg/l)	11	1,78	0,05	2,9	-	
	Fluidez (seg)	26	35,1	8,1	23,0	-	
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	7 dias	7	198	19,4	9,8	166
		28 dias	7	266	20,2	7,6	233
	Exsudação (%)	7	0,0	-	-	-	
4.7 (A/C = 0.53)	Densidade (kg/l)	2	1,77	-	-	-	
	Fluidez (seg)	2	33,0	-	-	-	
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	7 dias	1	194	-	-	-
		28 dias	1	281	-	-	-
	Exsudação (%)	1	0,0	-	-	-	
4.8 (A/C = 0.55)	Densidade (kg/l)	7	1,72	0,03	2,0	-	
	Fluidez (seg)	11	21,1	5,0	23,6	-	
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	7 dias	5	206	17,1	8,2	178
		28 dias	5	248	23,3	9,4	210
	Exsudação (%)	5	0,0	0	-	-	
4.9 (A/C = 0.60)	Densidade (kg/l)	1	1,68	-	-	-	
	Fluidez (seg)	1	16	-	-	-	
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	7 dias	1	162	-	-	-
		28 dias	1	196	-	-	-
	Exsudação (%)	1	Vestígios água	-	-	-	

Valores médios

Fluidez:	40,3 segundos	(A/C _{méd.} = 0.506)
R _{compr.} 28 dias:	266 kgf/cm ²	(A/C _{méd.} = 0.510)
R _{compr.} 7 dias:	206 kgf/cm ²	(A/C _{méd.} = 0.510)
Exsudação:	0%	

Quadro B2.5 - Quadro resumo das características das caldas - Composições 5

Composição	Características	Número de ensaios	Valor médio	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Valor característico	
		n	V _m	Δ	δ (%)	V _k	
5.1 (A/C = 0.45)	Densidade (kg/l)	1	1,89	-	-	-	
	Fluidez (seg)	1	25	-	-	-	
5.2 (A/C = 0.50)	Densidade (kg/l)	5	1,82	0,03	1,7	-	
	Fluidez (seg)	5	17,7	1,1	6,2	-	
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	7 dias	1	347	-	-	-
		28 dias	1	413	-	-	-
	Exsudação (%)	1	0,0	-	-	-	
5.3 (A/C = 0.55)	Densidade (kg/l)	1	1,68	-	-	-	
	Fluidez (seg)	1	12,0	-	-	-	
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	7 dias	1	209	-	-	-
		28 dias	1	273	-	-	-
	Exsudação (%)	1	0,0	-	-	-	

Valores médios	Fluidez :	17,9 segundos	(A/C _{méd.} = 0.50)
	R _{compr.} 28 dias:	343 kgf/cm ²	(A/C _{méd.} = 0.525)
	R _{compr.} 7 dias:	278 kgf/cm ²	(A/C _{méd.} = 0.525)
	Exsudação:	0%	

Quadro B2.6 - Quadro resumo das características das caldas - Composições 6

Composição	Características		Número de ensaios	Valor médio	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Valor característico
			n	V _m	Δ	δ (%)	V _k
6.1 (A/C = 0.45)	Densidade (kg/l)		1	2,12	-	-	-
	Fluidez (seg)		1	32	-	-	-
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	7 dias	1	256	-	-	-
		28 dias	1	303	-	-	-

Quadro B2.7 - Quadro resumo das características das caldas - Composições 7

Composição	Características	Número de ensaios	Valor médio	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Valor característico	
		n	V _m	Δ	δ (%)	V _k	
7.1 (A/C = 0.39)	Densidade (kg/l)	3	1,86	-	-	-	
	Fluidez (seg)	3	48,7	-	-	-	
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	7 dias	1	246	-	-	-
		28 dias	1	325	-	-	-
7.2 (A/C = 0.40)	Densidade (kg/l)	116	1,88	0,04	2,2	-	
	Fluidez (seg)	124	44,9	11,9	26,5	-	
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	7 dias	27	232	38,6	16,6	168
		28 dias	27	324	45,5	14,0	250
7.3 (A/C = 0.42)	Fluidez (seg)	5	48,4	9,9	20,5	-	
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	7 dias	1	301	-	-	-
		28 dias	1	377	-	-	-
7.4 (A/C = 0.45)	Densidade (kg/l)	342	1,85	0,02	1,2	-	
	Fluidez (seg)	348	34,2	7,5	21,8	-	
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	3 dias	1	163	-	-	-
		7 dias	66	262	39,3	15,0	197
		28 dias	71	346	38,3	11,1	283
		90 dias	3	396	-	-	-
1 ano		1	447	-	-	-	
7.5 (A/C = 0.46)	Densidade (kg/l)	70	1,84	0,02	1,3	-	
	Fluidez (seg)	70	35,9	12,9	35,9	-	
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	7 dias	18	237	46,8	19,7	160
		28 dias	18	312	43,8	14,0	240
7.6 (A/C = 0.47)	Densidade (kg/l)	42	1,80	0,05	2,6	-	
	Fluidez (seg)	42	31,1	7,3	23,3	-	
	R _{compr.} (kgf/cm ²)	7 dias	7	222	28,3	12,7	176
		28 dias	7	315	32,8	10,4	261

Valores médios	Fluidez:	36,6 segundos	(A/C _{méd.} = 0.442)
	R _{compr.} 28 dias:	335 kgf/cm ²	(A/C _{méd.} = 0.441)
	R _{compr.} 7 dias:	249 kgf/cm ²	(A/C _{méd.} = 0.441)
	Exsudação:	0%	

ANEXO C

**RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS REALIZADOS COM O
VISCOSÍMETRO BROOKFIELD**

DVGATHER+ V1.1

BROOKFIELD ENGINEERING LABS

Item #	Speed RPM	Torque %	Viscosity cP	Sh Stress D/cm ²	Sh Rate 1/s	Temperature °C	Time MM:SS
001	0.5	5.6	35840	0.00	0.00	22.4	01:00
002	1.0	6.6	21120	0.00	0.00	22.8	01:00
003	2.0	8.0	12800	0.00	0.00	23.1	01:00
004	2.5	9.5	12160	0.00	0.00	23.3	00:59
005	4.0	9.4	7520	0.00	0.00	23.5	00:59
006	5.0	9.9	6336	0.00	0.00	23.6	01:00
007	10.0	10.5	3360	0.00	0.00	23.7	01:04
008	20.0	11.2	1792	0.00	0.00	23.8	00:59
009	50.0	17.9	1146	0.00	0.00	23.9	01:01
010	100.0	24.6	787.2	0.00	0.00	24.0	01:01

Page 1 of 1

Quadro C.1 - Viscosímetro Brookfield - Quadro de resultados: Composição 1A

C.3

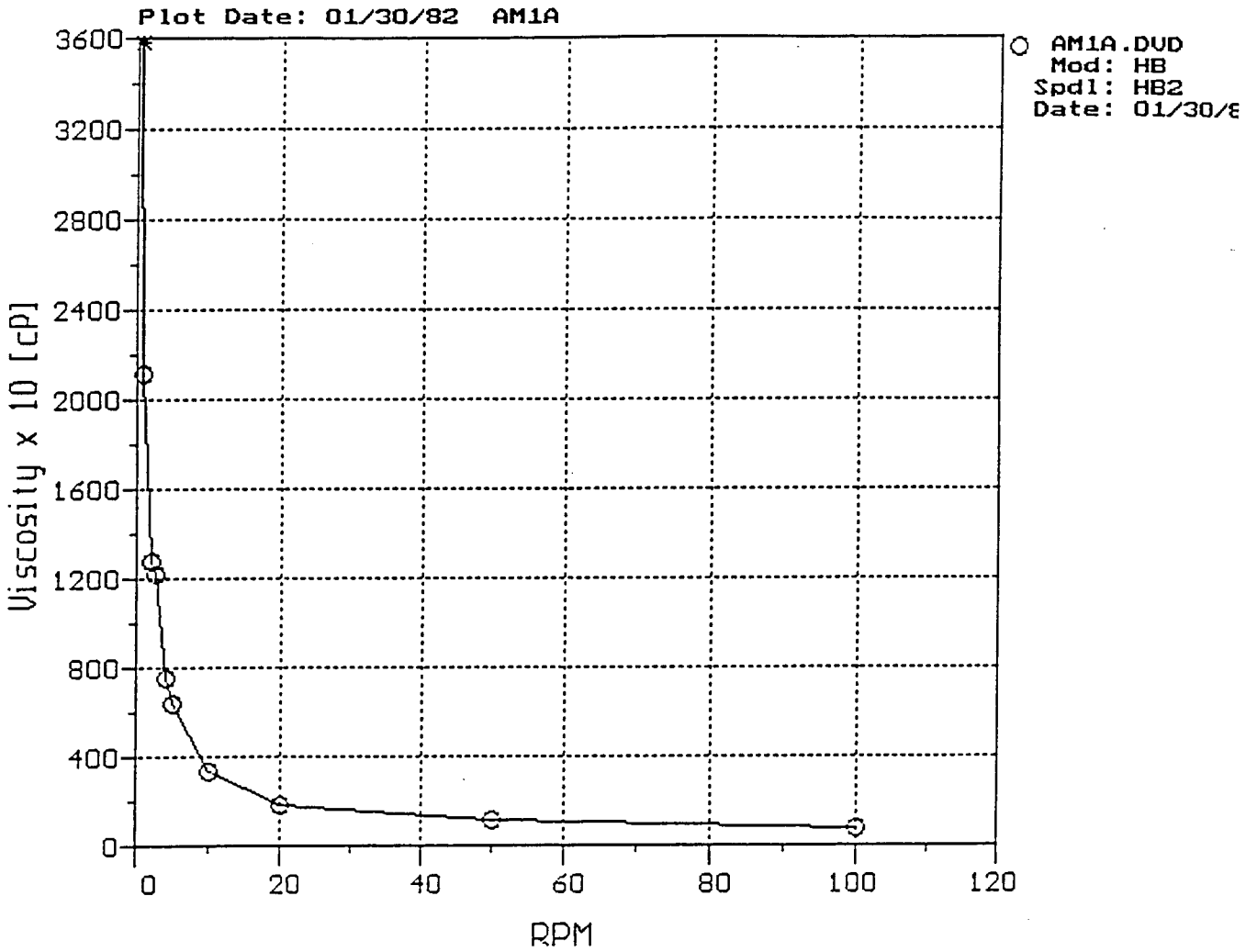


Gráfico C.1.1 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala linear) - Composição 1A

Plot Date: 01/30/82 AM1A

Paste Analysis

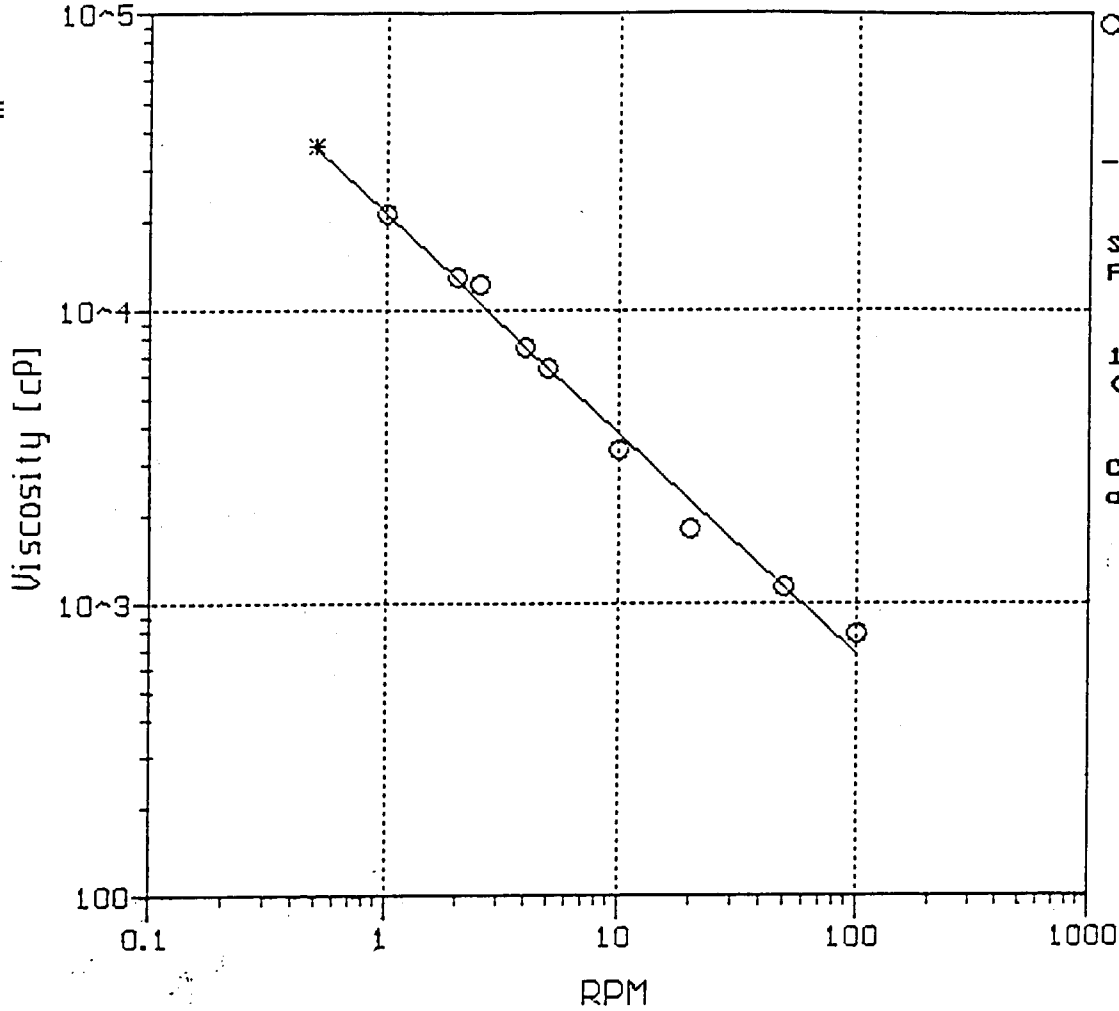


Gráfico C.1.2 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala logarítmica) - Composição 1A

DVGATHER+ V1.1

BROOKFIELD ENGINEERING LABS

Item #	Speed RPM	Torque %	Viscosity cP	Sh Stress D/cm ²	Sh Rate 1/s	Temperature °C	Time MM:SS
001	0.5	7.1	45440	0.00	0.00	24.6	01:00
002	1.0	7.0	22400	0.00	0.00	22.8	01:03
003	2.0	8.8	14080	0.00	0.00	23.2	01:01
004	2.5	10.0	12800	0.00	0.00	23.4	00:59
005	4.0	12.7	10160	0.00	0.00	23.6	01:00
006	5.0	13.3	8512	0.00	0.00	23.8	01:21
007	10.0	16.6	5312	0.00	0.00	23.9	01:00
008	20.0	21.3	3408	0.00	0.00	24.0	01:00
009	50.0	31.6	2022	0.00	0.00	24.1	01:00
010	100.0	37.9	1213	0.00	0.00	24.1	01:02

Page 1 of 1

Quadro C.2 - Viscosímetro Brookfield - Quadro de resultados: Composição 1B

Plot Date: 01/30/82 AM1B

○ AM1B.DUD
Mod: HB
Spd1: HB2
Date: 01/30/82

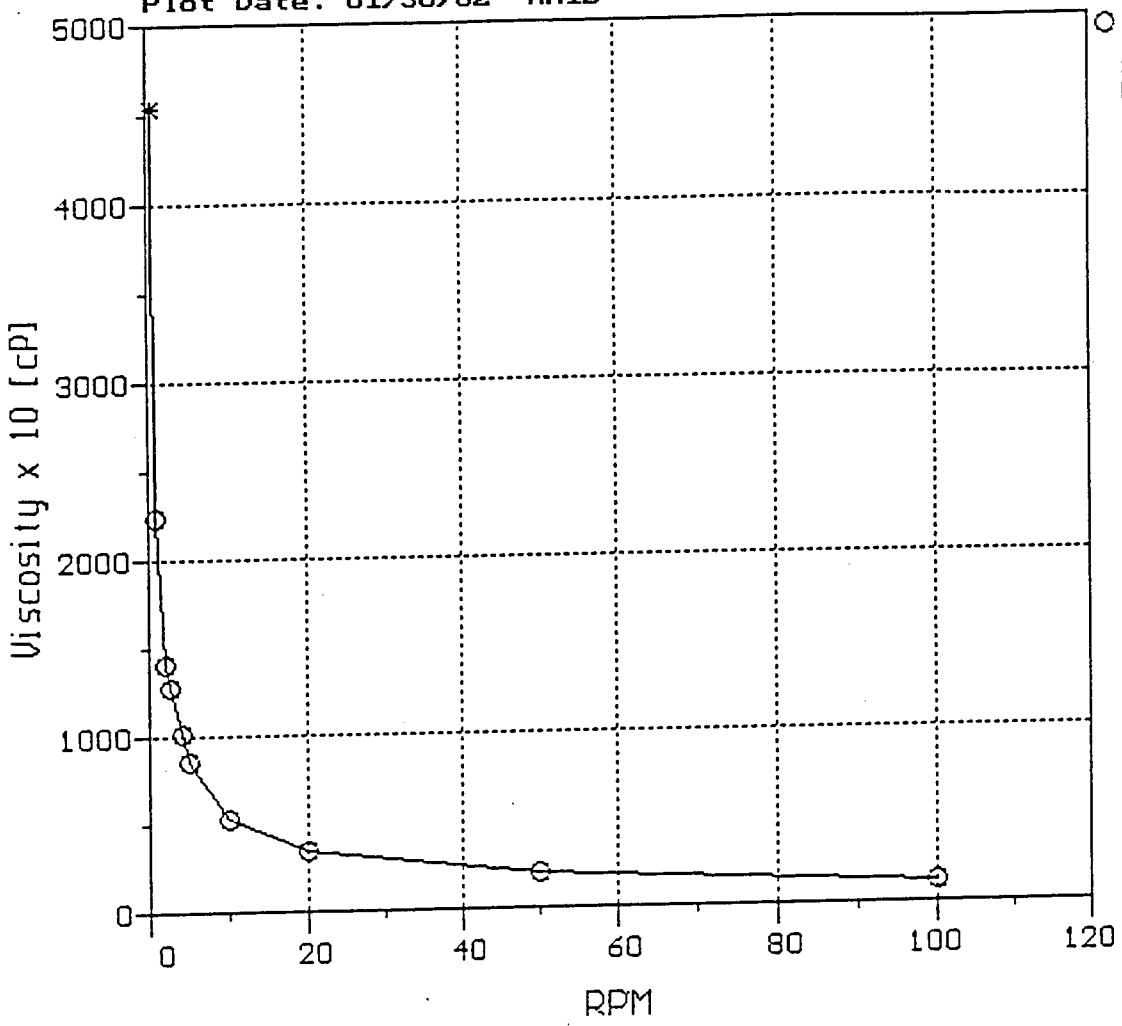


Gráfico C.2.1 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala linear) - Composição 1B

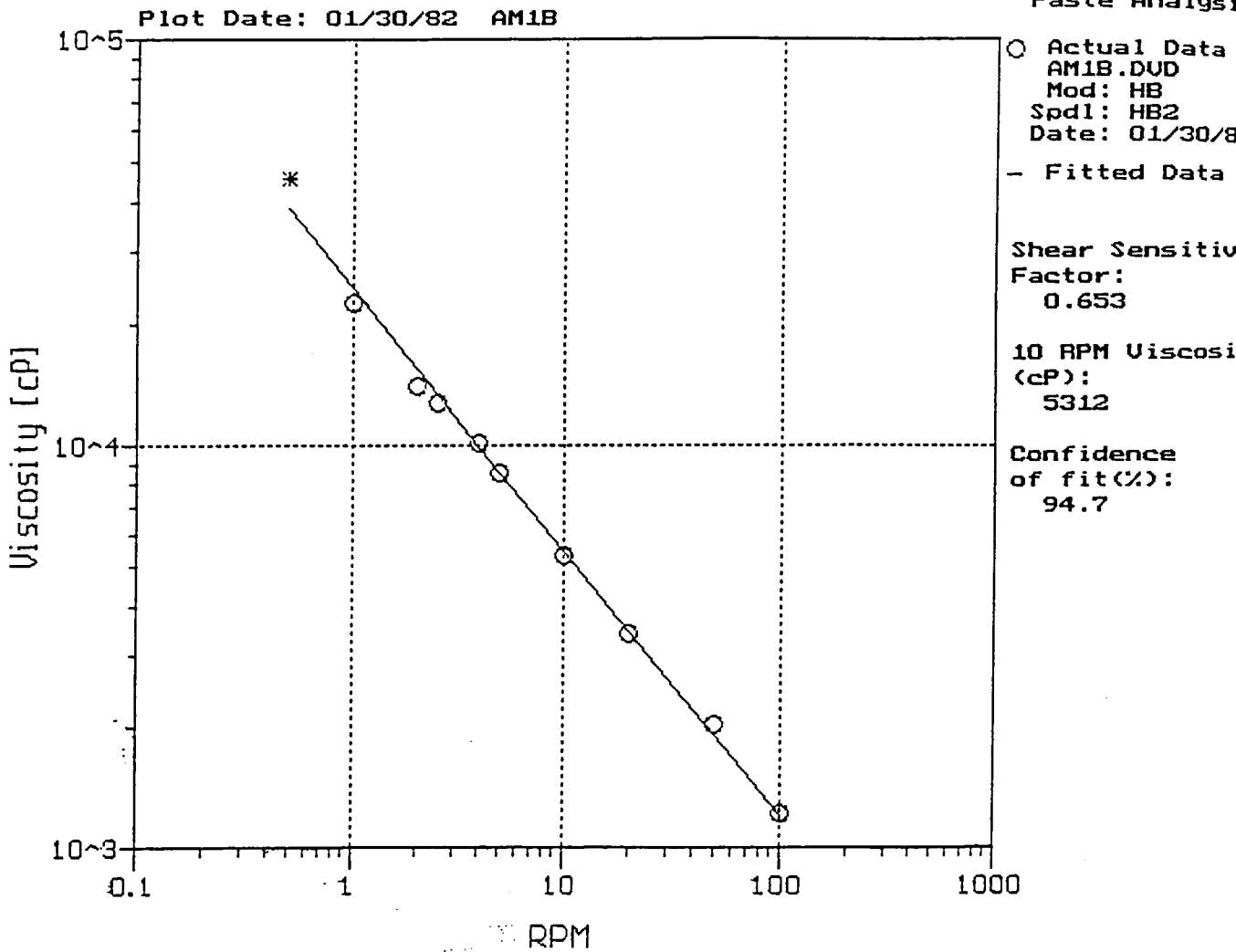


Gráfico C.2.2 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala logarítmica) - Composição 1B

DVGATHER+ V1.1

BROOKFIELD ENGINEERING LABS

Item #	Speed RPM	Torque %	Viscosity cP	Sh Stress D/cm ²	Sh Rate 1/s	Temperature °C	Time MM:SS
Model: HB		Spindle: HB2		Date: 01/30/82		Time: 04:58	
Sample: AM1C		File: AM1C.DVD					
001	0.5	7.7	49280	0.00	0.00	22.3	01:06
002	1.0	5.9	18880	0.00	0.00	22.7	01:01
003	2.0	7.4	11840	0.00	0.00	23.0	01:04
004	2.5	9.1	11648	0.00	0.00	23.2	01:01
005	4.0	11.6	9280	0.00	0.00	23.4	01:01
006	5.0	13.6	8704	0.00	0.00	23.5	01:00
007	10.0	21.9	7008	0.00	0.00	23.7	01:01
008	20.0	27.8	4448	0.00	0.00	23.8	01:01
009	50.0	35.9	2298	0.00	0.00	23.9	01:00
010	100.0	46.4	1485	0.00	0.00	24.0	01:01

Page 1 of 1

Quadro C.3 - Viscosímetro Brookfield - Quadro de resultados: Composição 1C

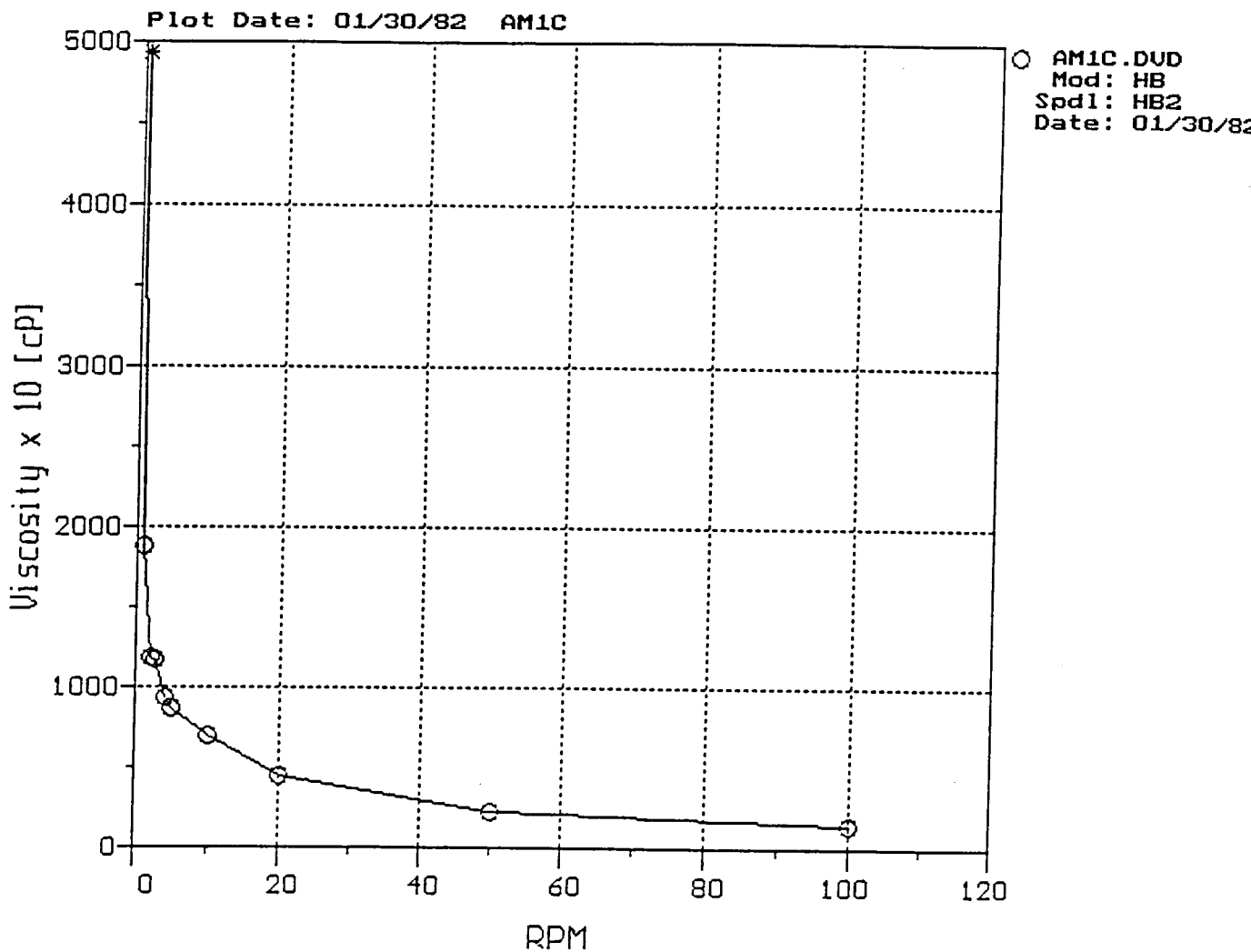


Gráfico C.3.1 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala linear) - Composição 1C

Plot Date: 01/30/82 AM1C

Paste Analysis

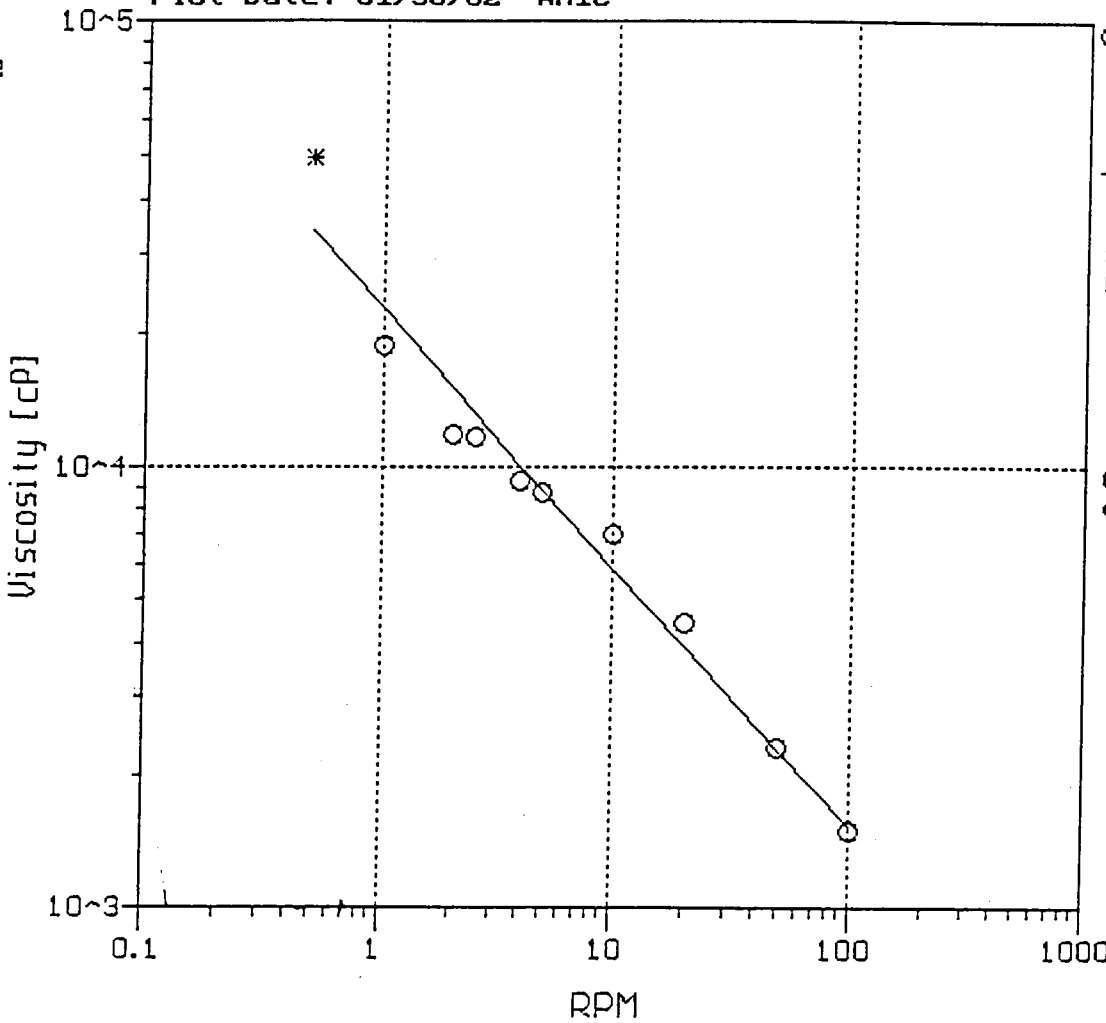


Gráfico C.3.2 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala logarítmica) - Composição 1C

DVGATHER+ V1.1

BROOKFIELD ENGINEERING LABS

Item #	Speed RPM	Torque %	Viscosity cP	Sh Stress D/cm ²	Sh Rate 1/s	Temperature °C	Time MM:SS
001	0.5	8.6	55040	0.00	0.00	25.2	01:00
002	1.0	7.6	24320	0.00	0.00	25.2	00:59
003	2.0	8.7	13920	0.00	0.00	25.2	01:00
004	2.5	10.0	12800	0.00	0.00	25.2	01:00
005	4.0	12.8	10240	0.00	0.00	25.2	01:00
006	5.0	14.8	9472	0.00	0.00	25.2	01:00
007	10.0	22.5	7200	0.00	0.00	25.2	01:06
008	20.0	31.4	5024	0.00	0.00	25.2	01:00
009	50.0	42.2	2700	0.00	0.00	25.2	01:03
010	100.0	52.2	1670	0.00	0.00	25.1	01:02

Page 1 of 1

Quadro C.4 - Viscosímetro Brookfield - Quadro de resultados: Composição 1D

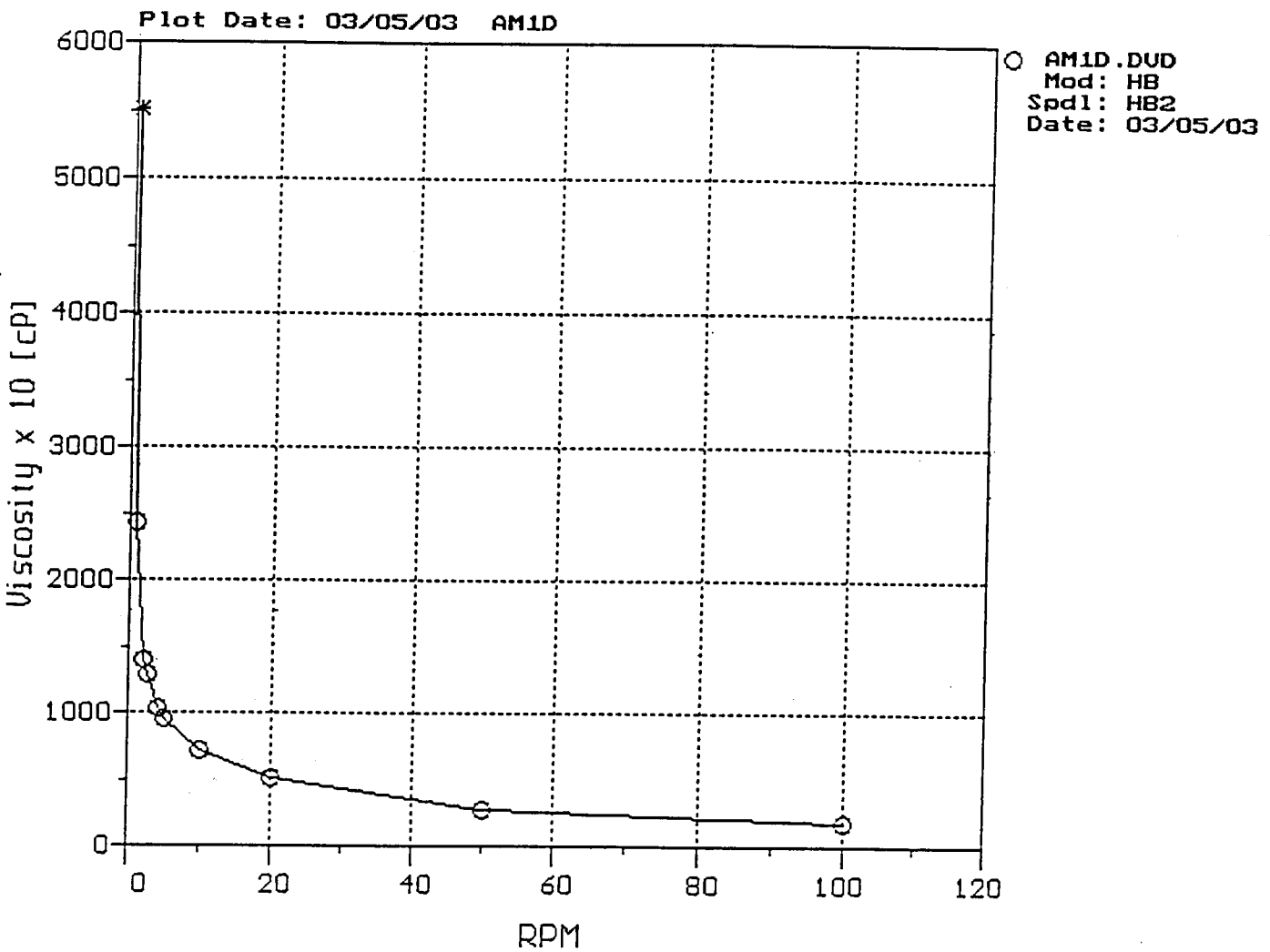


Gráfico C.4.1 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala linear) - Composição 1D

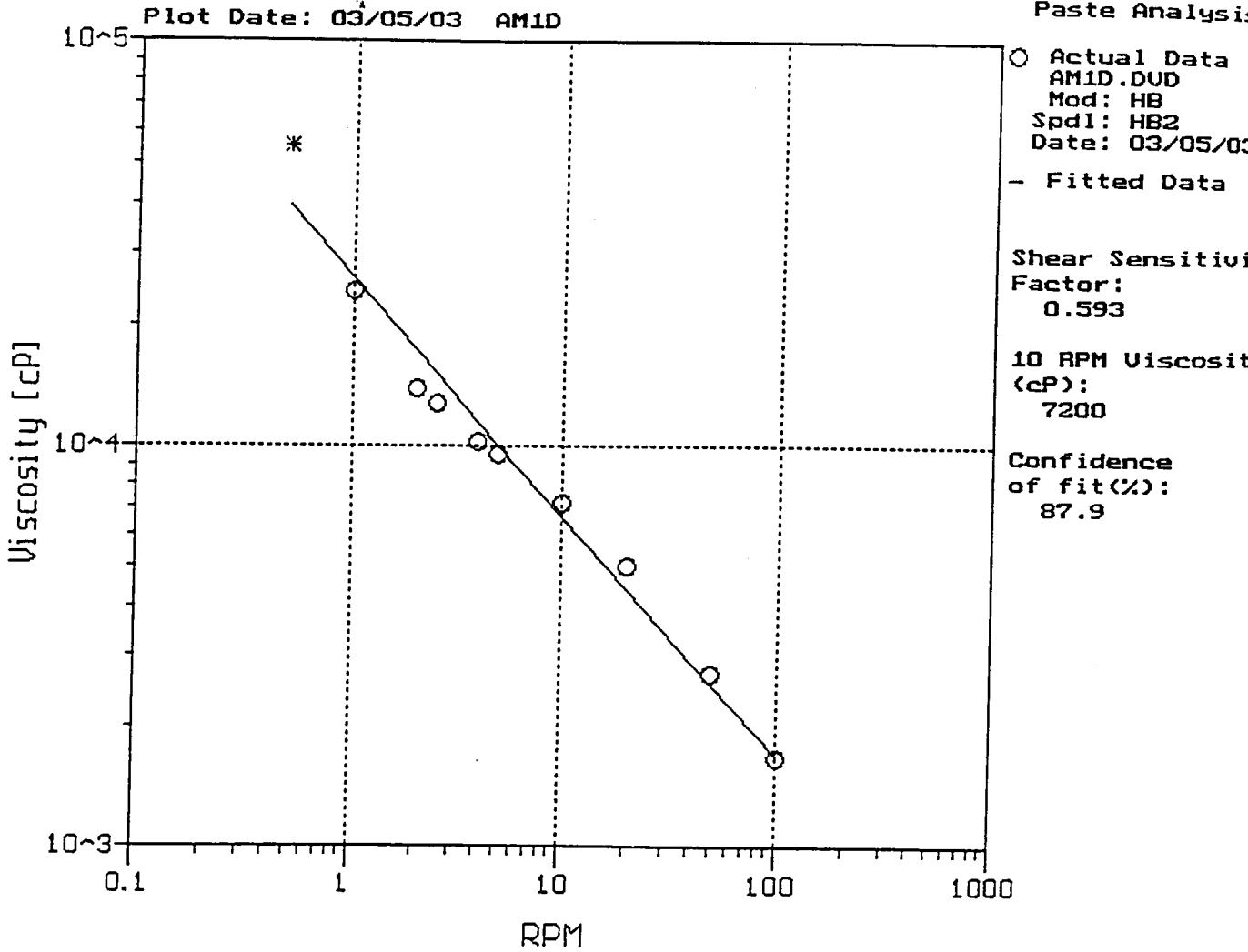


Gráfico C.4.2 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala logarítmica) - Composição 1D

DVGATHER+ V1.1

BROOKFIELD ENGINEERING LABS

Item #	Speed RPM	Torque %	Viscosity cP	Sh Stress D/cm ²	Sh Rate 1/s	Temperature °C	Time MM:SS
001	0.5	2.0	12800	0.00	0.00	25.0	01:01
002	1.0	2.1	6720	0.00	0.00	25.0	01:00
003	2.0	2.3	3680	0.00	0.00	25.0	00:59
004	2.5	2.5	3200	0.00	0.00	25.0	01:00
005	4.0	2.9	2320	0.00	0.00	25.0	01:00
006	5.0	3.1	1984	0.00	0.00	24.9	01:01
007	10.0	4.0	1280	0.00	0.00	24.9	01:01
008	20.0	5.0	800.0	0.00	0.00	24.8	01:01
009	50.0	7.1	454.4	0.00	0.00	24.8	01:00
010	100.0	9.9	316.8	0.00	0.00	24.8	01:02

Page 1 of 1

Quadro C.5 - Viscosímetro Brookfield - Quadro de resultados: Composição 2A

C.15

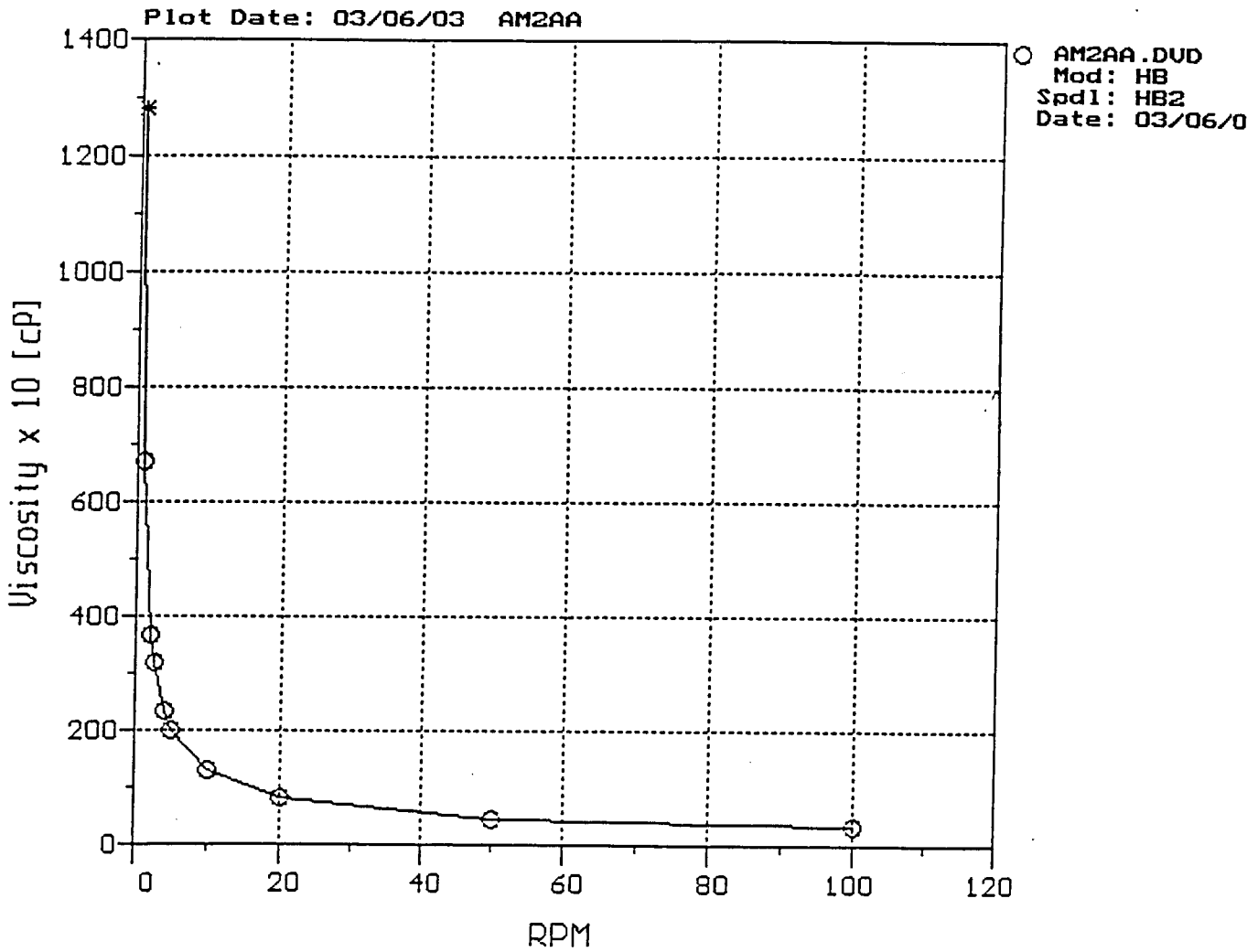
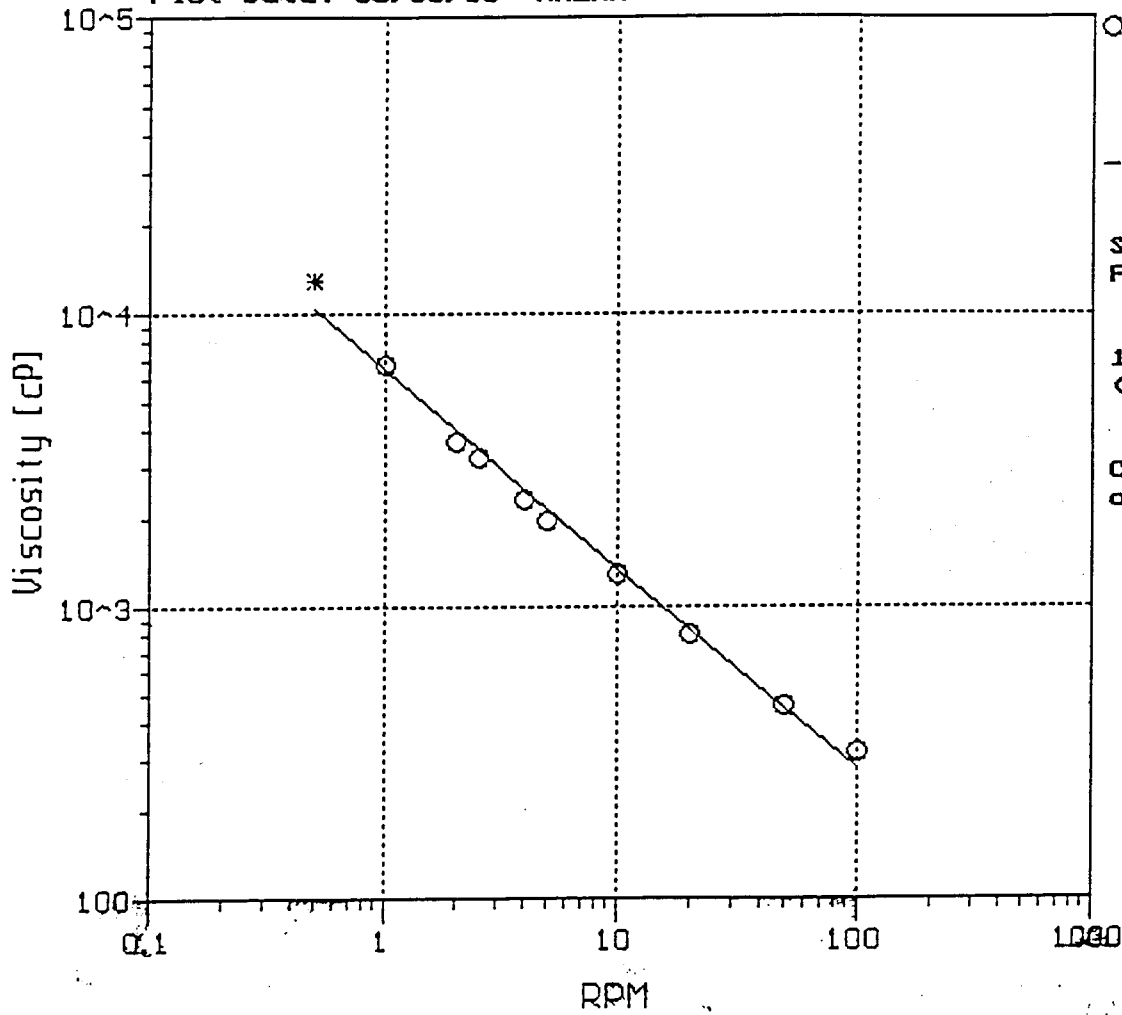


Gráfico C.5.1 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala linear) - Composição 2A

Plot Date: 03/06/03 AM2AA

Paste Analysis



○ Actual Data
 AM2AA.DVD
 Mod: HB
 Spd1: HB2
 Date: 03/06/03

- Fitted Data

Shear Sensitivity
 Factor:
 0.685

10 RPM Viscosity
 (cP):
 1280

Confidence
 of fit(%):
 92.0

Gráfico C.5.2 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala logarítmica) - Composição 2A

DVGATHER+ V1.1

BROOKFIELD ENGINEERING LABS

Item #	Speed RPM	Torque %	Viscosity cP	Sh Stress D/cm ²	Sh Rate 1/s	Temperature °C	Time MM:SS
001	0.5	4.2	26880	0.00	0.00	24.9	01:00
002	1.0	4.6	14720	0.00	0.00	24.9	01:03
003	2.0	5.1	8160	0.00	0.00	24.9	01:00
004	2.5	5.4	6912	0.00	0.00	24.9	01:01
005	4.0	6.5	5200	0.00	0.00	24.9	01:01
006	5.0	7.0	4480	0.00	0.00	24.9	01:01
007	10.0	9.8	3136	0.00	0.00	24.9	01:03
008	20.0	14.4	2304	0.00	0.00	24.9	01:00
009	50.0	23.5	1504	0.00	0.00	24.9	01:01
010	100.0	32.3	1033	0.00	0.00	24.9	01:01

Page 1 of 1

Quadro C.6 - Viscosímetro Brookfield - Quadro de resultados: Composição 2B

Plot Date: 03/06/03 AM2AA

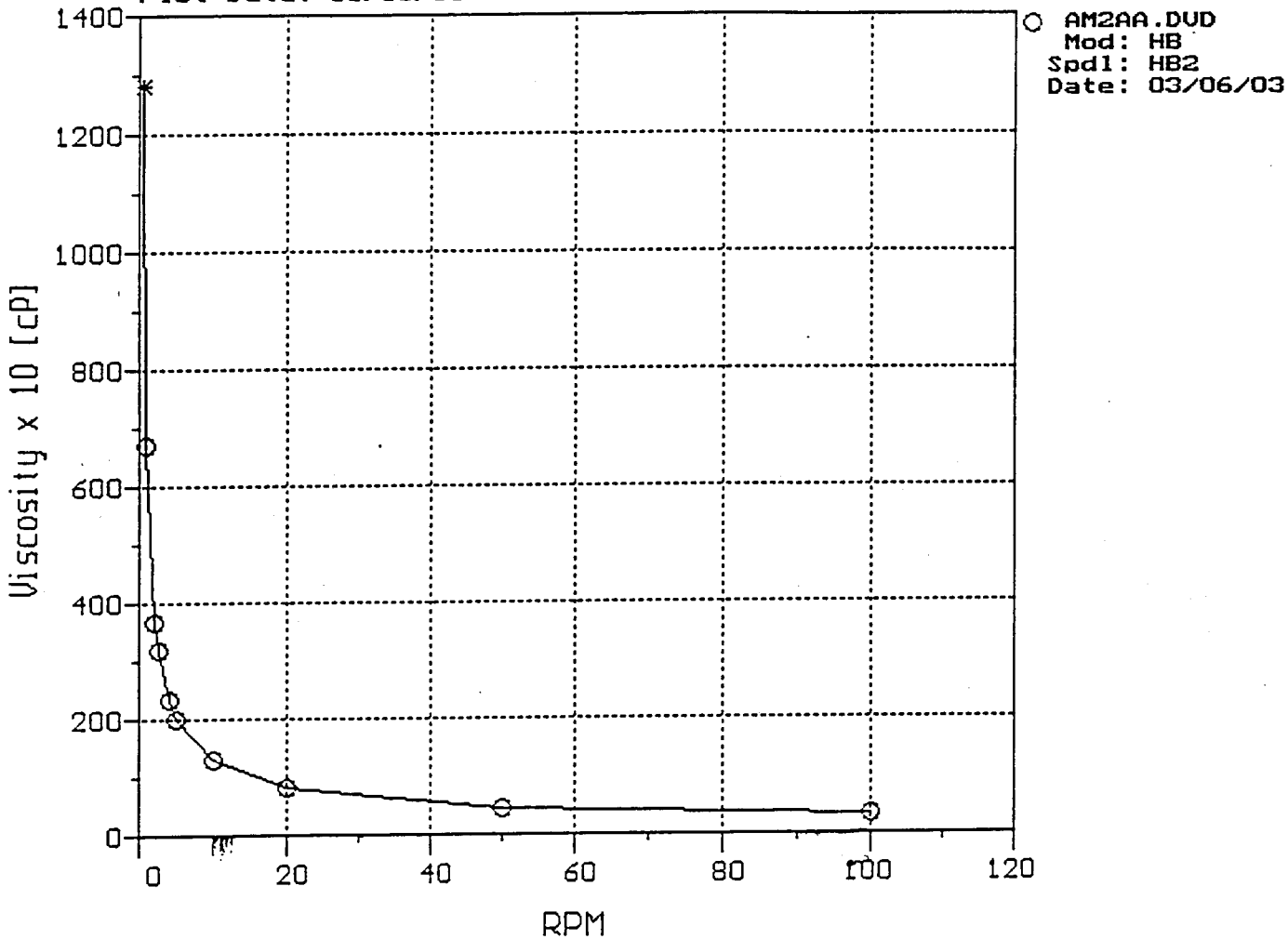


Gráfico C.6.1 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala linear) - Composição 2B

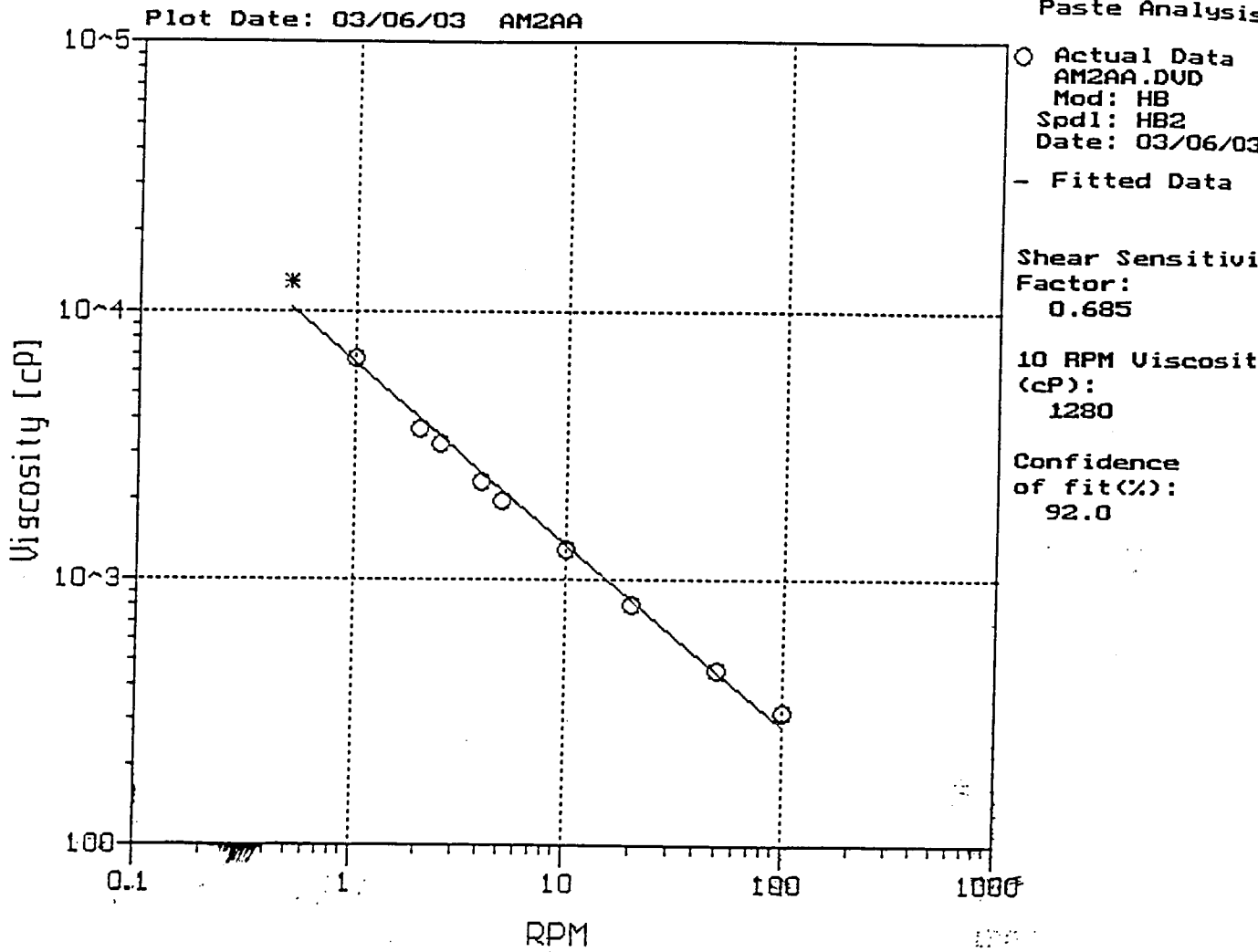


Gráfico C.6.2 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala logarítmica) - Composição 2B

DVGATHER+ V1.1

BROOKFIELD ENGINEERING LABS

Item #	Speed RPM	Torque %	Viscosity cP	Sh Stress D/cm ²	Sh Rate 1/s	Temperature °C	Time MM:SS
001	0.5	6.9	44160	0.00	0.00	25.1	01:04
002	1.0	8.6	27520	0.00	0.00	25.1	01:03
003	2.0	11.6	18560	0.00	0.00	25.1	01:00
004	2.5	13.5	17280	0.00	0.00	25.1	01:00
005	4.0	16.5	13200	0.00	0.00	25.2	01:03
006	5.0	17.7	11320	0.00	0.00	25.2	01:01
007	10.0	24.3	7776	0.00	0.00	25.2	01:04
008	20.0	30.7	4912	0.00	0.00	25.1	01:08
009	50.0	39.5	2528	0.00	0.00	25.2	01:00
010	100.0	51.0	1632	0.00	0.00	25.1	01:03

Page 1 of 1

Quadro C.7 - Viscosímetro Brookfield - Quadro de resultados: Composição 2C

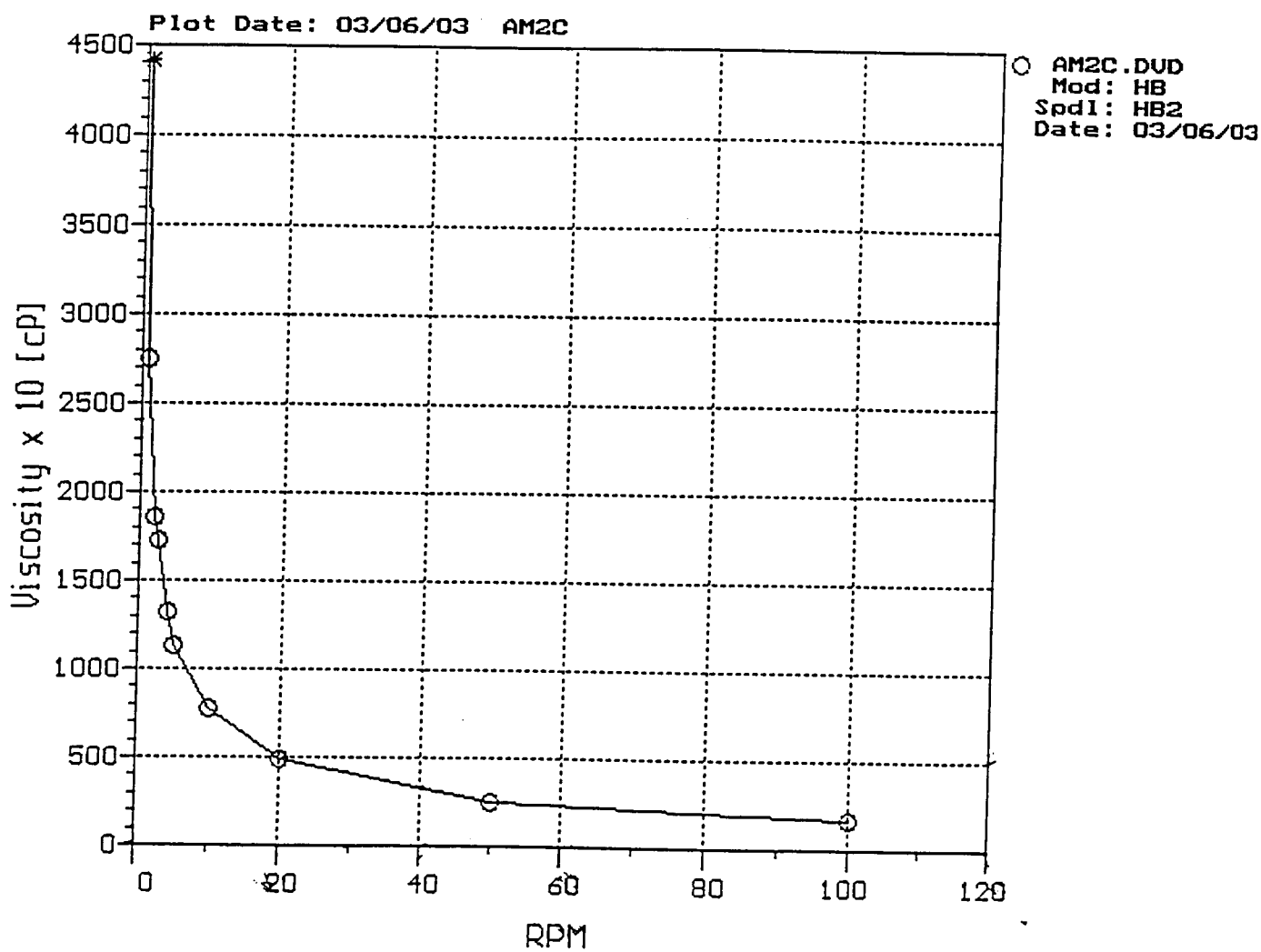
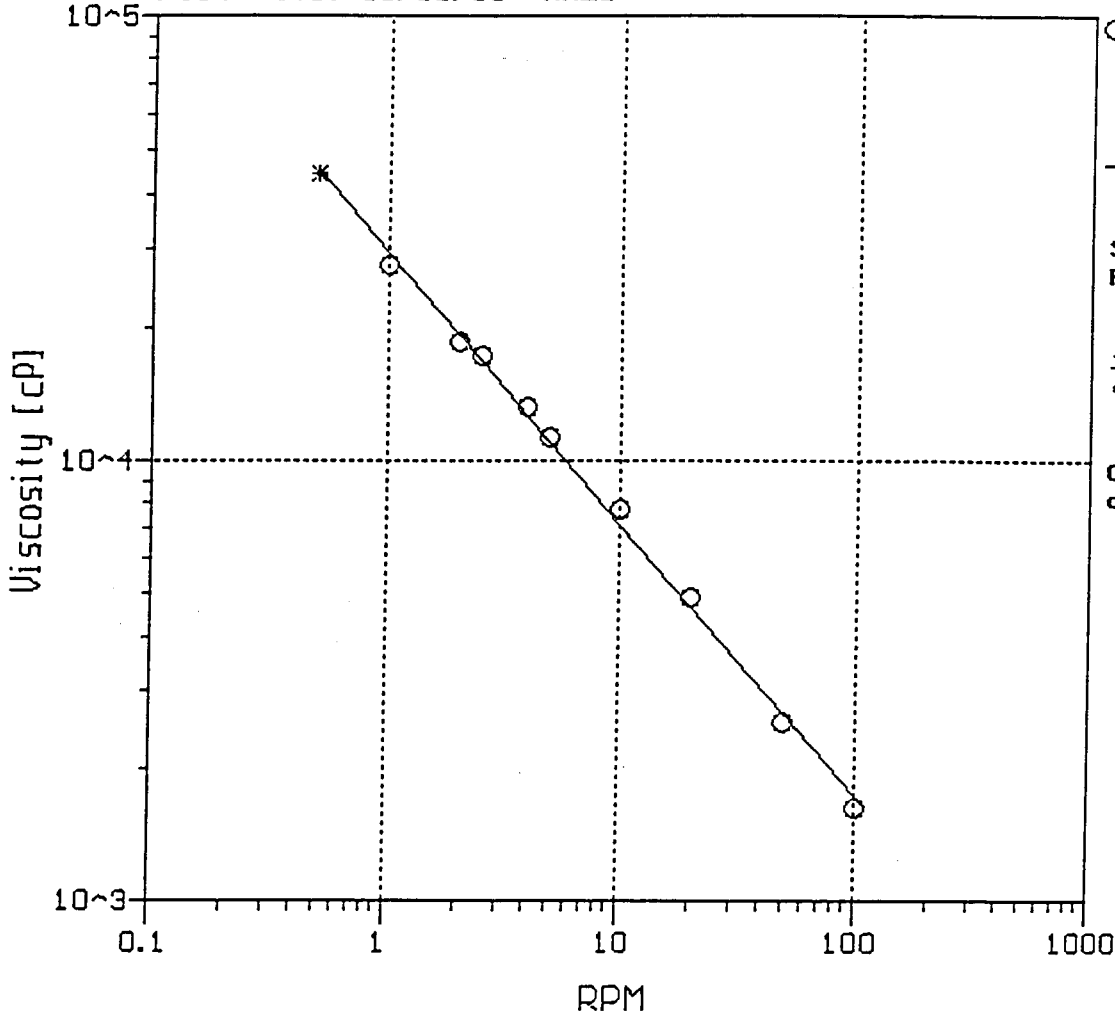


Gráfico C.7.1 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala linear) - Composição 2C

Plot Date: 03/06/03 AM2C

Paste Analysis



○ Actual Data
 AM2C.DVD
 Mod: HB
 Spd1: HB2
 Date: 03/06/03

- Fitted Data

Shear Sensitivity
 Factor:
 0.615

10 RPM Viscosity
 (cP):
 7776

Confidence
 of fit(%):
 95.2

Gráfico C.7.2 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala logarítmica) - Composição 2C

DVGATHER+ V1.1

BROOKFIELD ENGINEERING LABS

Item #	Speed RPM	Torque %	Viscosity cP	Sh Stress D/cm ²	Sh Rate 1/s	Temperature °C	Time MM:SS
001	0.5	8.4	53760	0.00	0.00	25.0	01:00
002	1.0	9.6	30720	0.00	0.00	25.1	01:04
003	2.0	12.9	20640	0.00	0.00	25.1	01:01
004	2.5	13.9	17792	0.00	0.00	25.0	01:01
005	4.0	18.6	14880	0.00	0.00	25.0	01:13
006	5.0	21.1	13504	0.00	0.00	24.9	01:06
007	10.0	30.5	9760	0.00	0.00	24.9	01:00
008	20.0	42.6	6816	0.00	0.00	24.9	01:00
009	50.0	56.2	3597	0.00	0.00	24.9	01:01
010	100.0	71.8	2298	0.00	0.00	24.9	01:15

Page 1 of 1

Quadro C.8 - Viscosímetro Brookfield - Quadro de resultados: Composição 2D

Plot Date: 03/06/03 AM2D

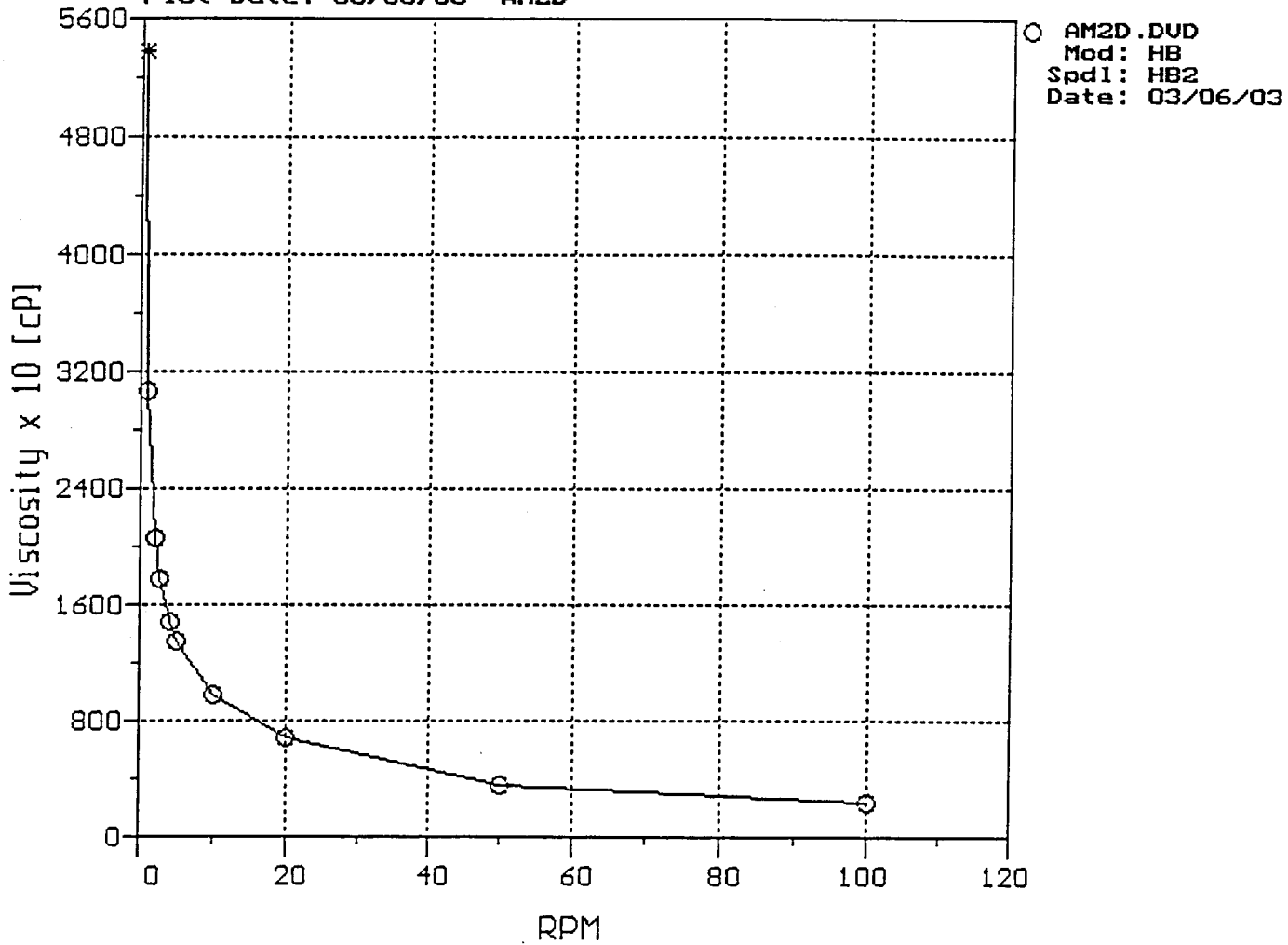
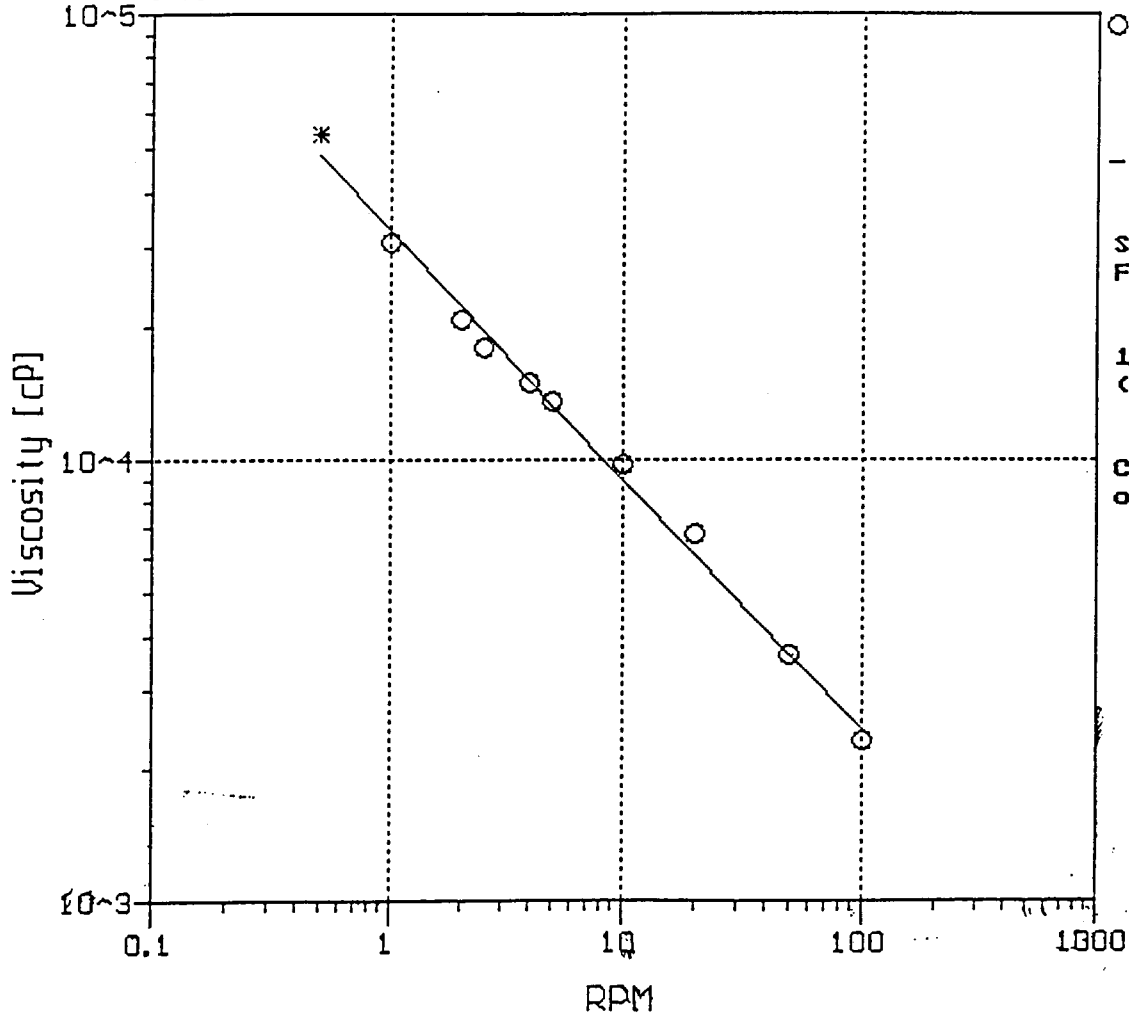


Gráfico C.8.1 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala linear) - Composição 2D

Plot Date: 03/06/03 AM2D

Paste Analysis



○ Actual Data
AM2D.DUD
Mod: HB
Spd1: HB2
Date: 03/06/03
- Fitted Data

Shear Sensitivity
Factor:
0.563

10 RPM Viscosity
(cP):
9760

Confidence
of fit(%):
93.6

Gráfico C.8.2 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala logarítmica) - Composição 2D

DVGATHER+ V1.1

BROOKFIELD ENGINEERING LABS

Item #	Speed RPM	Torque %	Viscosity cP	Sh Stress D/cm ²	Sh Rate 1/s	Temperature °C	Time MM:SS
001	0.5	3.8	24320	0.00	0.00	24.9	01:02
002	1.0	3.8	12160	0.00	0.00	24.9	01:04
003	2.0	4.6	7360	0.00	0.00	24.9	01:00
004	2.5	5.0	6400	0.00	0.00	24.9	01:01
005	4.0	5.9	4720	0.00	0.00	24.9	01:04
006	5.0	6.2	3968	0.00	0.00	24.9	01:01
007	10.0	8.6	2752	0.00	0.00	25.0	01:00
008	20.0	11.9	1904	0.00	0.00	24.9	01:01
009	50.0	19.1	1222	0.00	0.00	24.9	01:00
010	100.0	27.7	886.4	0.00	0.00	24.9	01:02

Page 1 of 1

Quadro C.9 - Viscosímetro Brookfield - Quadro de resultados: Composição 2E

C.27

Plot Date: 03/06/03 AM2E

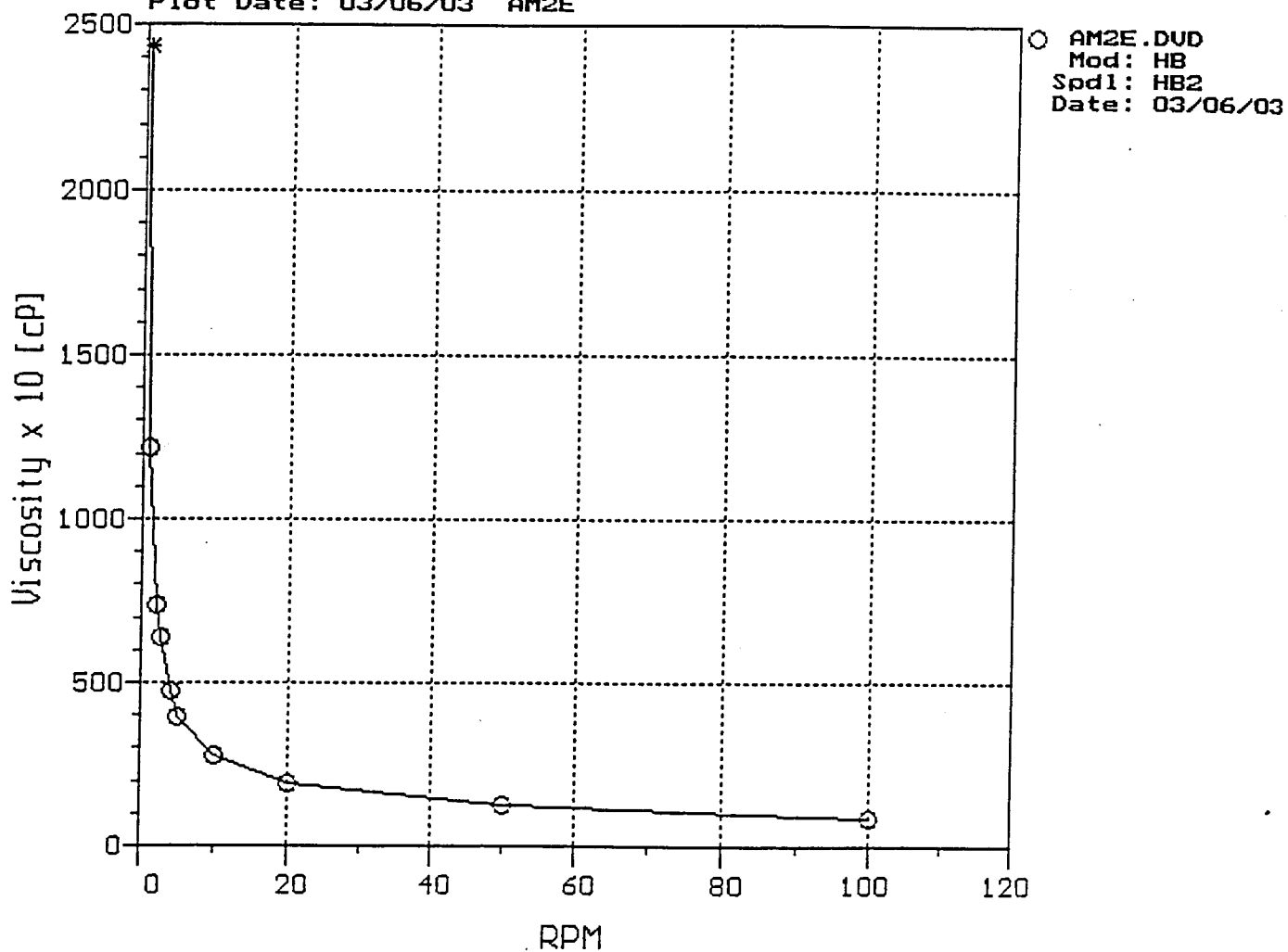
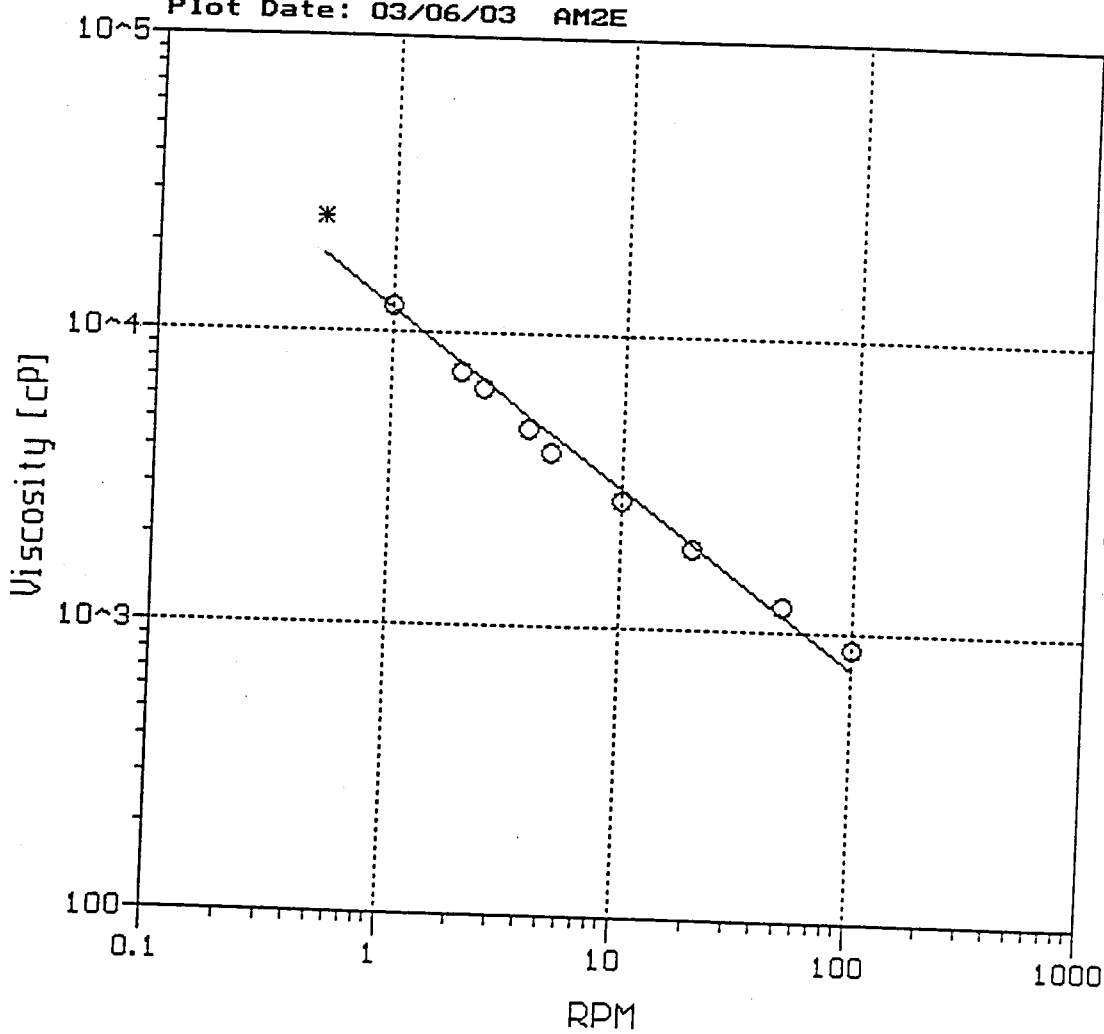


Gráfico C.9.1 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala linear) - Composição 2E

Plot Date: 03/06/03 AM2E

Paste Analysis



○ Actual Data
AM2E.DUD
Mod: HB
Spd1: HB2
Date: 03/06/03
- Fitted Data

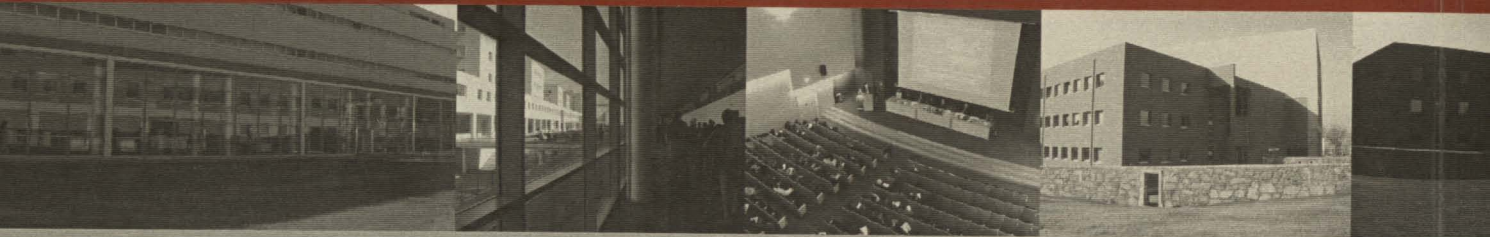
Shear Sensitivity
Factor:
0.602

10 RPM Viscosity
(cP):
2752

Confidence
of fit(%):
89.7

Gráfico C.9.2 - Viscosímetro Brookfield: relação entre a velocidade de rotação e a viscosidade aparente (escala logarítmica) - Composição 2E





FACULDADE DE ENGENHARIA

UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000079562