U.PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

# AVALIAÇÃO DA ROBUSTEZ DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

**GIL RAFAEL RESENDE PINTO**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS**

---

Professora Doutora Sandra da Conceição Barbosa Nunes

JULHO DE 2011

**MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

A meus Pais

*Os nossos conhecimentos*
*são a reunião do raciocínio e experiência*
*de numerosas mentes*
*Ralph Emerson*

## Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu sincero e profundo agradecimento à Professora Sandra Nunes pelo imenso tempo despendido com a orientação do meu trabalho, pela sua paciência, disponibilidade e simpatia. Foi para mim um privilégio trabalhar com alguém de tão elevada nível, profissional, pessoal e humano.

Agradeço aos meus pais e irmãos todo o apoio, nos momentos menos bons da minha vida.

Agradeço, também, aos amigos, sempre presentes, por toda a ajuda, disponibilidade, e apoio que me deram, em especial, o Pedro Gil, Ricardo Teixeira, Bárbara Cruchinho, Cláudio Dias, José Sá, Telma Ramos, Luís Branco e Catarina Pina.

Todo o trabalho de investigação desenvolvido não teria sido possível sem a colaboração do pessoal técnico do Laboratório de Estruturas, em especial, a Paula Silva. A todos o meu obrigado.

A todos os que, de forma directa ou indirecta, contribuíram para a concretização deste trabalho os meus sinceros agradecimentos

Gostaria de terminar transmitindo como me sinto orgulhoso e privilegiado por ter sido aluno do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e ter podido usufruir dos elevados conhecimentos técnicos dos seus Docentes, da sua disponibilidade para nos apoiar e incentivar nos momentos mais exigentes do curso, sem abdicar dos elevados padrões de exigência tão necessários para a credibilidade da Instituição e para o sucesso das nossas carreiras futuras.

## Resumo

A investigação desenvolvida neste trabalho teve como objectivo analisar os métodos existentes de avaliação da robustez na produção de betão auto-compactável (BAC), e dar um contributo para a compreensão da influência dos efeitos conjuntos da temperatura e do tempo na perda de trabalhabilidade das misturas de BAC.

O desempenho do betão no estado fresco é influenciado por diversos factores, como a variação dos seus constituintes, as condições ambientais, o tempo de transporte até ao local da obra, entre outros. Para garantir a auto-compactabilidade o controlo do comportamento deste betão, no estado fresco, deve ser mais restritivo. Ou seja, variações do comportamento no estado fresco que não condicionariam a qualidade de um betão convencional podem levar à sua rejeição caso se trate de um BAC. A maior sensibilidade do BAC deve-se, em grande parte, à grande quantidade de adjuvantes que este incorpora. A dificuldade em produzir misturas de BAC resistentes a estas variações tem impedido que esta tecnologia seja largamente utilizada, principalmente em aplicações de construção *in situ*.

A ausência de vibração mecânica nesta tecnologia aumenta a qualidade das peças betonadas e reduz os custos de mão-de-obra, no entanto, devido à falta de reprodutibilidade do processo essa vantagem económica é posta em causa quando o número de amassaduras rejeitadas aumenta, sendo em muitos casos preterido em relação a betões tradicionais.

A produção do BAC a elevadas temperaturas é ainda mais complexa devido à rápida redução da trabalhabilidade provocada pela evaporação da água de mistura e pelo aumento de velocidade das reacções de hidratação. O conhecimento existente sobre o comportamento dos adjuvantes a elevadas temperaturas é ainda limitado, e a perda de trabalhabilidade é geralmente associada aos factores atrás enunciados. No entanto, não é de descartar a possibilidade das propriedades no estado fresco serem influenciadas também por alterações no funcionamento dos próprios adjuvantes, quando sujeitos a elevadas temperaturas.

Neste trabalho são sintetizadas as exigências normativas para o caso particular da produção do BAC e as metodologias de avaliação da robustez existentes. Desenvolveu-se um *script* em Matlab® para automatização da metodologia desenvolvido no LABEST/FEUP, procedeu-se à respectiva validação e, posteriormente, esta metodologia foi aplicada numa análise da variação da robustez em função da largura dos intervalos de aceitação para as propriedades relevantes em estudo. O Matlab® revelou-se uma plataforma versátil, que permitiu executar a avaliação da robustez de forma expedita, no entanto, ainda é possível desenvolver melhoramentos na interface com o utilizador.

Foi analisado o efeito da combinação do tempo e temperatura nos ensaios reométricos em pastas de BAC. Os ensaios foram executados em pastas a 10, 23, 33, 39ºC. Os parâmetros de Bingham (viscosidade plástica e tensão de cedência) mantiveram-se inalterados durante um certo período de tempo após o fim da amassadura. Este período de tempo diminuiu com o aumento da temperatura da pasta; e após este período observou-se um crescimento exponencial de ambos os parâmetros reológicos.


PALAVRAS-CHAVE: betão auto-compactável, robustez, Matlab®, temperatura, reologia

## Abstract

The scope of this research comprises the analysis of the existing methods to evaluate the robustness of self-compacting concrete (SCC) production, and intends to contribute for the understanding of the influence of temperature and time effects in the loss of workability of SCC mixtures.

The performance of SCC in the fresh state is influenced by many factors, for instance, the variation in constituent materials, environmental conditions, transport time, etc. In order to provide self-compactability the control of fresh properties must be more restrictive. Variations of concrete fresh performance which may be tolerable for conventional concrete may not be for SCC. The higher sensitivity of the SCC mixtures is mainly due to large contents of admixture. Difficulties in achieving mixtures of SCC resistant to these variations has impeded a larger spread of this technology, mainly for *in situ* construction applications.

The absence of vibration in this technology increases the quality of structures and reduces workmanship costs, however, due to lack of robustness this economic advantage is limited when the number of rejected batches increases. Thus, in cases like these conventional concrete is preferred to SCC .

In hot weather SCC production, concreting is more complex due to fast reduction of the workability by evaporation of mixture water and acceleration of the hydration reactions. The existing knowledge on admixtures behavior at high temperatures is limited, and workability loss is generally associated with the aforementioned factors. Nevertheless, it is not possible to discard the probable influence of functioning alterations of admixtures at high temperatures on fresh properties.

This work sums up the normative requirements for the particular case of SCC production and the existing methodologies of robustness evaluation. A Matlab® *script* was developed for automatization of LABEST/FEUP methodology, and its validation has been provided. This methodology was applied to assess the change in robustness value as a function of the width of response variables acceptance intervals. Matlab® has shown to be a versatile platform, allowing to perform a very straightforward robustness assessment. In spite of this, the interface with the user can be improved.

Coupled effects of time and temperature were checked through characterization of SCC pastes rheological behavior. Studied paste temperatures were 10, 23, 33, 39ºC. Bingham parameters (plastic viscosity and yield stress) remained constant during a certain period of time, after the end of mixing. This period of time diminished with the increase of temperature and, after this period, an exponential growth of both rheological parameters was observed.


KEYWORDS: self-compacting concrete, robustness, Matlab®, temperature, rheology.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS ..... i
RESUMO ..... iii
ABSTRACT ..... v

1. INTRODUÇÃO ..... 1
1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA ..... 1
1.2. OBJECTIVOS DA DISSERTAÇÃO ..... 2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO ..... 2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ..... 5
2.1. INTRODUÇÃO ..... 5
2.2. ROBUSTEZ DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL ..... 7
2.3. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA ROBUSTEZ DO BAC ..... 9
2.3.1 METODOLOGIA LABEST/FEUP ..... 9
2.3.1.1. Plano factorial ..... 10
2.3.1.2. Programação genética ..... 10
2.3.2. MÉTODO BASEADO NO SUPERPLASTIFICANTE ..... 13
2.3.3 METODOLOGIA DE PETER BILLBERG ..... 15
2.4. REOLOGIA DA PASTA DE CIMENTO E BETÃO ..... 17
2.4.1. FUNDAMENTOS BÁSICOS DE REOLOGIA DA PASTA DE CIMENTO ..... 17
2.4.2. TENSÃO DE CEDÊNCIA ..... 18
2.4.3. VISCOSIDADE ..... 19
2.4.4. TIXOTROPIA ..... 20
2.4.5. CLASSIFICAÇÃO DAS CURVAS DE ESCOAMENTO ..... 21
2.4.6. EFEITOS DO TEMPO E TEMPERATURA NA REOLOGIA DE BAC SEM AGITAÇÃO ..... 22
3. IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA ROBUSTEZ DO LABEST/FEUP ..... 25
3.1. INTRODUÇÃO ..... 25
3.2. DESCRIÇÃO DO SCRIPT ..... 25
3.2.1. VARIÁVEIS DE INPUT E PRÉ-TRATAMENTO ..... 27
3.2.2. REORGANIZAÇÃO DE VECTORES E MATRIZES ..... 28
3.2.3. SUB-AMOSTRA DE MISTURAS FICTÍCIAS ..... 30

3.2.4. MEDIDA DE ROBUSTEZ ..... 30
3.2.5. OUTPUT ..... 31
**3.3. VALIDAÇÃO DO *SCRIPT* ..... 32**
3.3.1. ÂMBITO DO PROJECTO ..... 32
3.3.2. MODELOS NUMÉRICOS ..... 32
3.3.3. OPTIMIZAÇÃO DA ROBUSTEZ ..... 33
3.3.4. VALIDAÇÃO DO SCRIPT ..... 34
**3.4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA ROBUSTEZ DE UM BAC BRANCO ..... 36**
3.4.1. ÂMBITO DO ESTUDO ..... 36
3.4.2. MODELOS NUMÉRICOS ..... 39
3.4.3. DESVIOS DA PRODUÇÃO ..... 41
3.4.4. INTERVALOS DE ACEITAÇÃO E ESTIMATIVA DA ROBUSTEZ ..... 42
**4. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E TEMPO NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DA PASTA DE CIMENTO ..... 45**
**4.1. INTRODUÇÃO ..... 45**
**4.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL ..... 46**
4.2.1. MATERIAIS, COMPOSIÇÃO E PROCEDIMENTO DE AMASSADURA ..... 47
4.2.3. ENSAIO REOLÓGICO ..... 47
4.2.3.1. Metodologia de ensaio ..... 48
4.2.4. ENSAIO DE RESISTIVIDADE ..... 49
4.2.5. ENSAIO DE RESISTÊNCIAÀ TRACÇÃO E COMPRESSÃO ..... 51
4.2.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL ..... 52
**4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO ..... 55**
4.3.1. EFEITOS CONJUNTOS DO TEMPO E DA TEMPERATURA NA VISCOSIDADE APARENTE ..... 55
4.3.2. VISCOSIDADE PLÁSTICA (BINGHAM) EM FUNÇÃO DO TEMPO ..... 59
4.3.3. TENSÃO DE CEDÊNCIA ..... 63
4.3.6. REGIÃO DE PASTAS DE BAC COM QUALIDADE ..... 67
4.3.4. RESISTIVIDADE ..... 69
4.3.5. RESISTÊNCIA ..... 70
**5. CONCLUSÕES ..... 71**
**5.1. CONCLUSÕES ..... 71**
5.1.1. MODELOS DE ANÁLISE DE ROBUSTEZ DE BAC ..... 71
5.1.2. IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA LABEST/FEUP EM MATLAB® ..... 72

5.1.3. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO TEMPO E TEMPERATURA NA REOLOGIA DA PASTA DE CIMENTO 72
5.1.4. ANÁLISE DE INFLUÊNCIA DO TEMPO E TEMPERATURA NA RESISTIVIDADE DE PASTAS ..... 73
5.1.5. ANÁLISE DE INFLUÊNCIA DO TEMPO E TEMPERATURA NA RESISTÊNCIA DE PASTAS ..... 73
**5.2. ESTUDOS FUTUROS ..... 73**
**BIBLIOGRAFIA ..... 75**
**ANEXO A ..... 77**
**ANEXO B ..... 85**

## ÍNDICE DE FIGURAS

*Fig*. 2.1. – Requisitos em termos de classes de consistência para diferentes tipos de estruturas (Nunes 2008) ..... 6

Fig. 2.2.- Robustez de um processo industrial (Nunes 2008) ..... 8

Fig. 2.3. – Esquema de funcionamento de um programa genético ..... 11

Fig. 2.4. - Reprodução utilizando o método da roleta russa (Al-Martini 2009). ..... 12

Fig. 2.5. – Exemplo de um cruzamento (fase inicial), (Sette and Boullart 2001). ..... 12

Fig. 2.6. - Exemplo de um cruzamento (fase final), (Sette and Boullart 2001). ..... 12

Fig. 2.7. – Exemplo das expressões resultantes do programa genético, para o diâmetro de espalhamento, (Ozbay, E. [et al.], 2008) ..... 13

Fig. 2.8. - Metodologia baseada no superplastificante (Ramge, P. and Lohaus, L., 2010) ..... 14

Fig. 2.9. – Variação diâmetro de espalhamento da pasta com a relação Vf/Vp e diferentes tipos de superplastificante PCE (Ramge and Lohaus 2010) ..... 15

Fig. 2.10. – (a) O princípio base de cálculo de área de robustez; (b) exemplo de comparação da robustez de uma mistura com diferentes VMA's (Billberg 2009). ..... 16

Fig. 2.11. – Quantificação do comprimento de variação ..... 16

Fig. 2.12. - Deformação por corte (Al-Martini 2009) ..... 17

Fig. 2.13. - Gama das taxas de deformação associadas a diferentes processos (Saak 2000) ..... 18

Fig. 2.14. – Modelo do potencial eléctrico para uma partícula coloidal, (Saak 2000). ..... 18

Fig. 2.15. – Taxa de evolução do calor durante a hidratação de uma pasta de cimento típica, (Saak 2000). ..... 19

Fig. 2.16. – *Hysteresis loop* típico de um fluido tixotrópico (Al-Martini 2009) ..... 21

Fig. 2.17. – Identificação das curvas de escoamento em função da sua forma característica: (1) Newtoniano; (2) dilatante; (3) pseudoplástico; (4) pseudoplástico com tensão de cedência; (5) plástico de Bingham ideal; (6) plástico de Bingham não-ideal. ..... 22

Fig. 2.18. – Método da trabalhabilidade 2-pontos ..... 23

Fig. 3.1. – Fases do script ..... 25

Fig. 3.2. – Layout do *script* ..... 26

Fig. 3.3. - Determinação da taxa de sucesso de uma sub-amostra ..... 30

Fig. 3.4. - Determinação dos n elementos do vector taxa de sucesso, f. ..... 31

Fig. 3.5. – Estrutura a betonar: (a) parede de forma complexa; (b) densidade de armadura na parede ..... 37

Fig. 3.6. - (a) e (b) Aspecto final do Porto de Recreio onde foi aplicado o BAC branco (parede curva do elemento) ..... 38

Fig. 3.7. – Primeira amassadura: (a) escoamento do BAC; (b) Ensaio de espalhamento do BAC ..... 38

Fig. 3.8. – Segunda amassadura: (a) Colocação do betão com vibração; (b) ensaio de funil V. ..... 39

Fig. 3.9. – (a) e (b) pormenores do escoamento da segunda amassadura. ..... 39

Fig. 3.10. - Medidas de robustez para os desvios em relação à composição teórica da Unibetão, considerando os diferentes intervalos de aceitação ..... 43

Fig. 3.11. - Medidas de robustez para os desvios em relação à composição teórica da FEUP considerando os diferentes intervalos de aceitação ..... 43

Fig. 4.1. – Procedimento de amassadura..... 47

Fig. 4.2. – Reómetro rotacional CVO-100 ..... 48

Fig. 4.3. - Características do sistema cone/prato usado nos ensaios. ..... 48

Fig. 4.4. – Hysteresis loop, (Al-Martini and Nehdi 2009) ..... 49

Fig. 4.5. – Sequência de teste: pré-condicionamento, repouso, medições por patamares (Nunes 2008) ..... 49

Fig. 4.6. – Representação esquemática do método utilizado da resistividade, FCT/PTDC/ECM/70693/2006 ..... 50

Fig. 4.7. – Set up experimental do ensaio da resistividade [(a)-dispositivos de medição e registo;(b)-detalhe de conexão ao provete] ..... 50

Fig. 4.8. – Moldes dos provetes ..... 51

Fig. 4.9. – (a) Provete durante o ensaio de rotura à compressão; (b) Provete durante o ensaio de rotura à flexão; (c) Metade do provete inicial, resultante da rotura por flexão ..... 51

Fig. 4.10. – Análise da curva descendente do ensaio C aos 60 minutos ..... 53

Fig. 4.11. – Análise da curva descendente do ensaio E aos 38 minutos..... 54

Fig. 4.12. - Análise da curva descendente do ensaio F aos 23 minutos..... 55

Fig. 4.13. – Evolução da viscosidade aparente do ensaio A (pasta a 10ºC), em função da taxa de deformação para diferentes idades ..... 56

Fig. 4.14. - Evolução da viscosidade aparente do ensaio B (pasta a 23ºC), em função da taxa de deformação para diferentes idades ..... 56

Fig. 4.15. - Evolução da viscosidade aparente do ensaio D (pasta a 33ºC), em função da taxa de deformação para diferentes idades ..... 57

Fig. 4.16. - Evolução da viscosidade aparente do ensaio F (pasta a 39ºC), em função da taxa de deformação para diferentes idades ..... 58

Fig. 4.17. - Evolução da viscosidade plástica do ensaio A (pasta a 10ºC) em função da idade da pasta ..... 59

Fig. 4.18. - Evolução da viscosidade plástica do ensaio B, pasta a 23ºC em função da idade da pasta ..... 60

Fig. 4.19. - Evolução da viscosidade plástica do ensaio D, pasta a 33ºC, em função da idade da pasta ..... 60

Fig. 4.20. - Evolução da viscosidade plástica do ensaio F, da pasta a 39ºC, em função da idade da pasta ..... 61

Fig. 4.21. - Evolução da viscosidade plástica em função da idade da pasta a 10ºC, 23ºC, 33ºC e 39ºC. ..... 62

Fig. 4.22. – Aspecto da amostra após o último ensaio (36 min) da pasta acondicionada a 45ºC [(a)-parte superior; (b)-parte inferior] ..... 63

Fig. 4.23. - Aspecto da amostra no fim do ensaio aos 13 minutos, da pasta acondicionada a 33ºC... 63

Fig. 4.24. - Evolução da tensão de cedência do ensaio A, pasta a 10ºC, em função da idade da pasta ..... 64

Fig. 4.25. - Evolução da tensão de cedência ensaio B, pasta a 23ºC, em função da idade da pasta . 64

Fig. 4.26. - Evolução da tensão de cedência ensaio D, pasta a 33ºC, em função da idade da pasta . 65

Fig. 4.27. - Evolução da tensão de cedência do ensaio F, pasta a 39ºC,em função da idade da pasta ..... 66

Fig. 4.28. - Evolução da tensão de cedência em função da idade da pasta a 10ºC, 23ºC, 33ºC e 39ºC. ..... 67

Fig. 4.29. – Região de pastas adequadas para o BAC, em função dos parâmetros de Bingham, (Nunes 2008)..... 68

Fig. 4.30. – Região de pastas de BAC com qualidade ..... 68

Fig. 4.31. - Evolução da resistividade dos provetes de pasta de cimento ao longo do tempo..... 69

## ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)

Quadro 2.1. – Relação entre as propriedades do betão fresco e os parâmetros regulamentares de controlo ..... 7

Quadro 2.2. – Variáveis utilizadas na construção do modelo genético, (Ozbay, Gesoglu et al. 2008) 13

Quadro 3.1. – Modelo numérico antes de ser adaptado para Matlab® ..... 27

Quadro 3.2. - Modelo numérico depois de ser adaptado para Matlab® ..... 28

Quadro 3.3. – Exemplo de Input dos intervalos de aceitação para as variáveis de resposta ..... 29

Quadro 3.4. – Exemplo do *output* do *script* ..... 31

Quadro 3.5. – Modelos ajustados (para valores $X_i$ descodificados) ..... 33

Quadro 3.6. – Critérios de optimização, adaptado de (Nunes 2008) ..... 34

Quadro 3.7. – Intervalos de aceitação das variáveis de resposta ..... 34

Quadro 3.8. – Verificação do script para a composição F, com w/c=0,5 ..... 34

Quadro 3.9. - Verificação do script para a composição F, com w/c=0,45 ..... 35

Quadro 3.10. - Verificação do script para a composição F, com w/c=0,4 ..... 35

Quadro 3.11. - Caracterização da composição optimizada de BAC branco em laboratório ..... 36

Quadro 3.12. – Modelos ajustados ..... 40

Quadro 3.13. – Modelos ajustados ..... 41

Quadro 3.14. – Desvios totais (relativamente à composição teórica da FEUP) ..... 42

Quadro 3.15. – Desvios de produção (relativamente à composição teóricada Unibetão) ..... 42

Quadro 3.16. – Intervalos de aceitação considerados para as variáveis de resposta $R_{sup}$ e $R_{inf}$. ..... 42

Quadro 3.17. – Medidas de robustez para limites iguais a 3 desvios padrão dos desvios de produção, em relação à composição alvo da Unibetão ..... 44

Quadro 3.18. – Medidas de robustez para limites iguais a 3 desvio padrão dos desvios totais, em relação à composição alvo da FEUP ..... 44

Quadro 3.19. – Aumento da robustez com a largura do intervalo de aceitação, em relação à composição alvo da Unibetão ..... 44

Quadro 3.20. – Aumento da robustez com a largura do intervalo de aceitação, em relação à composição alvo da FEUP ..... 44

Quadro 4.1. – Temperatura dos constituintes a diferentes fases do ensaio ..... 52

Quadro 4.2. – Evolução da temperatura durante o ensaio F ..... 52

Quadro 4.3. – Evolução da resistividade dos provetes de pasta de cimento ao longo do tempo ..... 69

Quadro 4.4. – Resultados dos ensaios de resistência flexão e à compressão ..... 70

## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

BAC – Betão Auto-Compactável

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

LABEST – Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural

PCE – Éter de policarboxilato

c – Cimento

$D_{esp}$ – Diâmetro de Espalhamento [mm]

$f_c$ – Resistência a compressão [MPa]

H2/H1 – Rácio das alturas de betão na parte frontal e parte traseira no ensaio da caixa em L

mtk – Metacaulino

mtk/c – Razão entre a massa de metacaulino e cimento

p – Finos

s – Areia

$s_1$/s - Razão entre a massa de areia 1 e a massa total de areia [%]

Shr – Retraccao [$x10^{-6}$]

Sp – Superplastificante

Sp/p – Razão entre a massa de superplastificante (líquido) e de finos [%]

$T_{500}$ – Tempo necessário para o betão atingir 500 mm de diâmetro no ensaio de espalhamento [s]

Tfunil – Tempo que a argamassa/betão demora a escoar num funil em V [s]

VMA – Agente modificador de viscosidade

$V_{ap}$ – Volume aparente [$m^3$]

$V_g$ – Volume de brita [$m^3$]

$V_{g,lim}$ – Vg correspondente a $V_{ap}$=1$m^3$, [$m^3$]

$V_p$ – Volume de finos [$m^3$]

$V_s$ – Volume de areia seca [$m^3$]

Vw/Vp – Razão entre o volume de água e o volume dos finos (massa)

w – água

w/c – Razão entre a massa de água e cimento (massa)

$\dot{\gamma}$ – Taxa de deformação [$s^{-1}$]

$\eta_{pl}$ – Viscosidade plástica [Pa.s]

$\eta$ – Viscosidade [Pa.s]

$\sigma_0$ –Tensão de cedência [Pa]

# 1
# INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento do Tema

O betão foi descoberto no século XIX e começou a ser utilizado na construção no início do século XX, potenciando novos movimentos arquitectónicos e maior qualidade das estruturas. Hoje o betão é um material de construção de excelência amplamente utilizado em estruturas correntes e também nas de elevada complexidade. Nas últimas décadas, os trabalhos de investigação procuraram melhorar as características físicas e mecânicas do betão, bem como os aspectos relacionados com a durabilidade das estruturas (Nunes 2001).

Durante várias décadas foi comum produzir-se betão com um abaixamento de cerca de 75mm (NP EN 12350-2, (IPQ 2002)) para a maioria das aplicações em estruturas de edifícios, estruturas de construção civil, ou em pré-fabricação (Ivan 2008); o que obrigava à existência de compactação mecânica (comummente executada com agulha vibratória). Em estruturas de elevada densidade de armadura ou complexidade de forma era frequente ocorrer o preenchimento incompleto dos moldes, diminuindo a resistência e durabilidade das estruturas. As primeiras evoluções do betão estrutural surgem com os betões de elevado desempenho caracterizados, inicialmente, por uma resistência melhorada. Nos últimos anos, cada vez mais características estão associadas a betões de elevado desempenho, como a trabalhabilidade, durabilidade, estabilidade dimensional, etc, (Ivan 2008). Essas características são atingidas através da incorporação de adjuvantes e uma selecção e combinação adequada dos materiais constituintes.

Após a invenção dos superplastificantes, no início dos anos 70 (à base de naftaleno sulfonado e melamina sulfonada), a investigação das propriedades no estado fresco e endurecido contendo superplastificante tornou-se activa. Nos anos 80, foram construídas as primeiras estruturas com recurso a esses superplastificantes, apesar de se manter a necessidade de vibração mecânica. Até que no final dos anos 80, foi desenvolvido pelo Prof. Okamura, no Japão, um protótipo de betão auto-compactável, baseado no uso de novos constituintes (fíler, superlastificante, agente modificador de viscosidade (VMA) e adições) e em proporções pouco convencionais, que consistiam em elevado volume de pasta e baixo teor de agregado grosso. Tratava-se de um betão capaz de se mover, libertar o ar e preencher completamente o interior dos moldes sem a necessidade de energia adicional de compactação, estando sujeito apenas à acção da gravidade. Estas características permitiram aumentar significativamente a eficiência da tecnologia do betão, daí a rápida disseminação deste conceito pelo mundo. Mais recentemente têm sido desenvolvidos novos superplastificantes baseados em éter de policarboxilato, denominados de superplastificantes de segunda geração que apresentam para além do efeito de repulsão electroestática um efeito de repulsão estérica, aumentando significativamente a sua eficácia.

O baixo rácio água/finos inerente ao betão auto-compactável, permite atingir maiores valores de resistência à compressão e à flexão, maior aderência e ainda maior módulo de elasticidade (Ivan 2008), sem comprometer a trabalhabilidade. Esta tecnologia permite a redução de mão-de-obra relativa à eliminação de vibração mecânica e a velocidade de colocação do betão é aumentada, levando à redução do período de construção em obras com grande quantidade de betão. A eliminação da vibração mecânica elimina a poluição sonora e possibilita a colocação do betão durante a noite em centros urbanos. A qualidade da compactação é superior, como tal, imprime melhor aparência em estruturas de betão à vista, devido à elevada capacidade de preenchimento, eliminando a possibilidade de ocorrência de 'ninhos' de betonagem.

A utilização de betão auto-compactável na construção *in situ* tem sido bastante limitada, devido ao maior custo da composição para baixas resistências, mas essencialmente devido à diminuída robustez das misturas que apresentam propriedades no estado fresco sensíveis a factores, muitas vezes incontroláveis, como o tempo de transporte, condições ambientais, etc. A falta de homogeneidade do betão colocado *in situ* pode levar à demolição da estrutura e, por isso, os riscos nessas aplicações são mais elevados do que em pré-fabricação, onde os elementos não conformes podem ser, simplesmente, rejeitados (Nunes 2008).

A baixa robustez do betão auto-compactável resulta de variações nos constituintes, nas pesagens dos constituintes, no teor de humidade, energia de mistura, etc. Para analisar a robustez destas misturas, foram desenvolvidos nos últimos anos algumas metodologias, como a metodologia LABEST/FEUP, e a metodologia de Peter Billberg, entre outras, que serão discutidas neste trabalho.

## 1.2. Objectivos da Dissertação

Em síntese, os principais objectivos deste trabalho foram:

- A elaboração de uma pesquisa bibliográfica sobre os métodos de avaliação da robustez do betão auto-compactável, e sobre métodos para a obtenção de modelos numéricos de previsão das propriedades relevantes do betão (tanto no estado fresco como no estado endurecido);
- O desenvolvimento de um *script* em Matlab® para automatizar a aplicação da metodologia de avaliação da robustez do LABEST/FEUP, a respectiva validação, e posterior aplicação a um caso real;
- A avaliação da sensibilidade da medida da robustez em função da variação da largura dos intervalos de aceitação de cada uma das propriedades relevantes consideradas para caracterizar o desempenho do BAC;
- Análise dos efeitos conjuntos da temperatura e do tempo nas propriedades reométricas de pastas de cimento, incluindo superplastificante baseado em éter de policarboxilato.

## 1.3. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação organiza-se da forma abaixo discriminada.

O presente capítulo (CAPÍTULO 1) engloba o enquadramento da investigação, os seus objectivos e a organização da dissertação.

No CAPÍTULO 2 apresenta-se uma revisão sobre o estado da arte, incidindo sobre a robustez do betão auto-compactável e os métodos de avaliação da robustez. Discute-se ainda neste capítulo a influência dos efeitos conjuntos do tempo e da temperatura na reologia de pastas de cimento.

No CAPÍTULO 3 descreve-se a implementação da metodologia LABEST/FEUP num *script* em Matlab®; procede-se à respectiva validação comparando com casos analisados anteriormente no LABEST; aplica-se esta metodologia ao caso de um estudo de um BAC branco aplicado em obra; e avalia-se a sensibilidade da medida de robustez considerando diferentes intervalos de aceitação para as propriedades consideradas críticas.

No CAPÍTULO 4 procedeu-se a um estudo experimental com o objectivo de analisar os efeitos conjuntos do tempo e temperatura nas propriedades reométricas de uma pasta de cimento branco. A pasta utilizada foi a mesma em todos os ensaios, e o procedimento de mistura mantido constante. Os ensaios decorreram com pastas à temperatura média de 10, 23, 33 e 39ºC. Analisou-se a evolução da viscosidade aparente, e dos parâmetros de Bingham (viscosidade plástica e tensão de cedência) com o tempo.

No CAPÍTULO 5 teceram-se as conclusões sobre os métodos analisados e os resultados obtidos, na análise de robustez das argamassas de betão branco e nos ensaios de caracterização reológica de pastas de cimento branco. Neste capítulo, apontam-se também algumas linhas de investigação para trabalhos futuros.

# 2
# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 2.1. Introdução

O betão auto-compactável é tido como uma das inovações mais significativas das últimas décadas (Georgiadis, Sideris et al. 2010). Originalmente desenvolvido no Japão, o BAC tem a capacidade de fluir e preencher completamente o interior dos moldes por acção da gravidade, enquanto atravessa zonas de elevada densidade de armadura sem qualquer bloqueio. A ausência de energia induzida (compactação) reduz a necessidade de mão-de-obra e o tempo de construção, e aumenta a qualidade de execução, garantindo maior durabilidade das estruturas. No entanto, os custos mais elevados associados à necessidade do uso de adjuvantes e maior quantidade de materiais finos, juntamente com a menor robustez das misturas faz com que esta solução seja frequentemente rejeitada pelos projectistas (Billberg 2009), principalmente para a construção *in situ* onde as condições de betonagem e o tempo de transporte até à obra são difíceis de controlar. No entanto, o desenvolvimento desta tecnologia apresenta ainda elevadas potencialidades pouco exploradas, encontrando-se em decurso vários estudos na expectativa de melhorar o seu desempenho através da inclusão de diversos materiais, principalmente subprodutos ou resíduos, com baixo valor comercial.

Segundo (BIBM 2005; Ivan 2008), o desempenho do BAC depende significativamente da sua trabalhabilidade, em particular, a capacidade de preenchimento, a capacidade de passagem entre espaços estreitos e a resistência à segregação. A capacidade de preenchimento do BAC refere-se à capacidade do BAC fluir e preencher todos os espaços no interior das cofragens sob acção apenas do peso próprio. Esta é de elevada importância quando se define a técnica de betonagem e se determina a distância entre pontos de betonagem, depende da coesão da pasta e do teor de agregado grosso na mistura de betão. A capacidade de passagem refere-se à facilidade com que o betão consegue passar através de vários obstáculos e espaços exíguos sem bloqueio. Logo a capacidade de passagem requerida deve ser definida de acordo com as condições físicas do molde a betonar como a concentração de armadura, a forma de cofragens complexas, e a existência de secções com pequenos espaços entre obstáculos. Devido à elevada trabalhabilidade, o BAC é vulnerável a segregação na forma de perda de homogeneidade durante a colocação, exsudação e sedimentação do agregado grosso, mesmo depois de o betão estar colocado. É então da maior importância para um BAC estar dotado de elevada resistência à segregação. Este fenómeno pode ocorrer se o betão apresenta uma pasta com baixa coesão, capaz de suster as partículas de agregado grosso sem separação quando o betão é colocado. Por outro lado, a segregação estática refere-se à subida de àgua (exsudação) e a sedimentação das partículas de agregado grosso depois da betonagem enquanto o betão se encontra ainda no estado plástico. A auto-compactabilidade é essencial para o betão fluir e espalhar-se

correctamente, e pode ser descrita em termos de fluidez e de viscosidade. O termo fluidez refere-se à distância e velocidade que o betão é capaz de alcançar sob acção do peso próprio, essencial para um correcto preenchimento dos locais de longo alcance e para atravessar as secções mais reduzidas. O termo viscosidade refere-se à capacidade do betão se deformar e mudar a sua forma sob acção do peso próprio, permitindo a libertação do ar interior evitando a criação de bolhas de ar que reduzem a resistência, durabilidade e prejudicam a estética dos elementos estruturais de betão. Maior viscosidade implica maior resistência ao escoamento do BAC.

Em termos de normalização, existem já documentos produzidos referentes à especificação e produção do BAC. A norma NP EN 206-9 (IPQ 2007) estabelece requisitos adicionais à norma NP EN 206-1 (IPQ 2007) para a produção de BAC, a nível dos materiais constituintes, propriedades no estado fresco e endurecido. A norma impõe limitações à composição, define especificações, procedimentos de controlo de produção em fábrica e estabelece critérios de conformidade. Os requisitos definidos pela norma NP EN 206-9 (IPQ 2007) dependem do tipo de estrutura, das condições de confinamento, do equipamento de colocação, dos métodos de colocação, do método de acabamento, sendo a distinção feita por classes de estruturas como ilustra a Fig. 2.1.

| Viscosidade ⇩ | PL1/PJ1: fgap=80 a 100 mm (estrutura de habitação)<br>PL2/PJ2: fgap=60 a 80 mm (estrutura de engenharia civil) | | | Capacidade de passagem ⇦ |
|---|---|---|---|---|
| VS3/VF3 | Rampas | | | |
| VS2/VF2 | | Paredes e estacas | Elementos altos e esbeltos | SR2<br>fdist>5m e fgap> 80mm ou fdist<5m e fgap< 80mm<br>SR1<br>fdist≤5m e fgap≥80mm |
| VS1/VF1 | Pavimentos e lajes | | | SR1<br>fdist≤5m e fgap≥80mm |
| Espalhamento ⇨ | SF1 | SF2 | SF3 | ⇧<br>Estabilidade |
| fgap - menor espaçamento entre armaduras; fdist - maior distância de escoamento | | | | |

*Fig*. 2.1. – Requisitos em termos de classes de consistência para diferentes tipos de estruturas (Nunes 2008)

A norma NP EN 206-9 (IPQ 2007) distingue as misturas em classes de consistência, de forma a quantificar as propriedades do BAC no estado fresco, acima descritas. As classes de consistência consideradas são as classes de: espalhamento (SF), viscosidade no ensaio de espalhamento (VS), viscosidade no ensaio do funil V (VF), capacidade de passagem na caixa L (PL), capacidade de passagem no anel J (PJ), resistência à segregação no peneiro (SR) estando a relação entre as propriedades e os parâmetros regulamentares disposta no Quadro 2.1.

Quadro 2.1. – Relação entre as propriedades do betão fresco e os parâmetros regulamentares de controlo

| Teste | Resultado do teste | Propriedade a fresco | Classe de consistência | |
|---|---|---|---|---|
| Espalhamento[a] | SF (mm) | Principalmente a capacidade de preenchimento | SF1 | 550 a 650 |
| | | | SF2 | 660 a 750 |
| | | | SF3 | 760 a 850 |
| | t500(s) | Principalmente a viscosidade | VS1 | ≤2 |
| | | | VS2 | 3 a 6 |
| | | | VS3 | >6 |
| Funil-V[a] | Tv(s) | Parcialmente a capacidade de preenchimento e bloqueio | VF1 | <9 |
| | | | VF2 | 9 a 25 |
| Caixa-L[b] | PA | Principalmente a capacidade de passagem | PL1 | ≥0,8 com 2 varões |
| | | | PL2 | ≥0,8 com 3 varões |
| Anel-J[a] | BJ (mm) SFJ(mm) T500J | Principalmente a capacidade de passagem | PJ1 | ≤10 com 12 varões |
| | | | PJ2 | ≤10 com 16 varões |
| Estabilidade no peneiro[a] | SR(%) | Resistência à segregação | SR1 | ≤20 |
| | | | SR2 | ≤15 |

[a] possibilidade de utilização em laboratório e obra; [b] uitlização apenas em laboratório;

Estes parâmetros são definidos por valores obtidos através de ensaios normalizados e comummente utilizados. Os parâmetros SF e VS representam o diâmetro médio e o tempo necessário para o betão atingir um diâmetro de 500mm, respectivamente, e são obtidos no ensaio de espalhamento; VF representa o tempo de escoamento no funil V; PL é um rácio que indica a capacidade de passagem do betão através de um obstáculo na caixa L; PJ é obtido através da capacidade de passagem do betão por entre os obstáculos no anel J; e SR representa a parcela de betão segregado através de um peneiro no ensaio da resistência à segregação. Os valores necessários à determinação das classes SF e VS, VF, PL, PJ, e SR na norma NP EN 206-9 (IPQ 2007), são obtidos através dos ensaios normalizados NP EN 12350-8 (IPQ 2010), NP EN 12350-9 (IPQ 2010), NP EN 12350-10 (IPQ 2010), NP EN 12350-12 (IPQ 2010) e NP EN 12350-11 (IPQ 2010), respectivamente.

Para que a qualidade do betão produzido corresponda aos requisitos do cliente de uma forma consistente deve-se ser mais exigente e adoptar um sistema de gestão da qualidade eficaz. O sistema de gestão deve resultar de uma decisão estratégica da empresa (por exemplo ISO9001, (IPQ 2008)) e regular todas as actividades da organização.

## 2.2. Robustez do Betão Auto-Compactável

Os requisitos regulamentares colocados a um BAC (2.1) são bastante exigentes e a elevada complexidade da mistura, juntamente com a elevada sensibilidade das misturas decorrente do uso de

adjuvantes tornam, na prática, o incumprimento de alguns requisitos frequente, o que implica custos acrescidos. Por este motivo, o BAC é frequentemente tido como um betão que é apenas eficaz para composições perfeitamente ajustadas e em condições ambientais controladas, sendo muito frequentemente limitado a aplicações de prefabricação (Schmidt, Brouwers et al. 2010). A robustez de um processo industrial é tanto maior quanto mais insensível for perante as variações inerentes ao processo, ou seja, um processo industrial é robusto se permite uma larga variação das variáveis ΔV enquanto mantém as suas propriedades P dentro dos intervalos de aceitação (Nunes 2008). Da Fig. 2.2, pode ser dito que o processo A é mais robusto do que o processo B, sendo ΔP o intervalo de aceitação para uma propriedade genérica P.

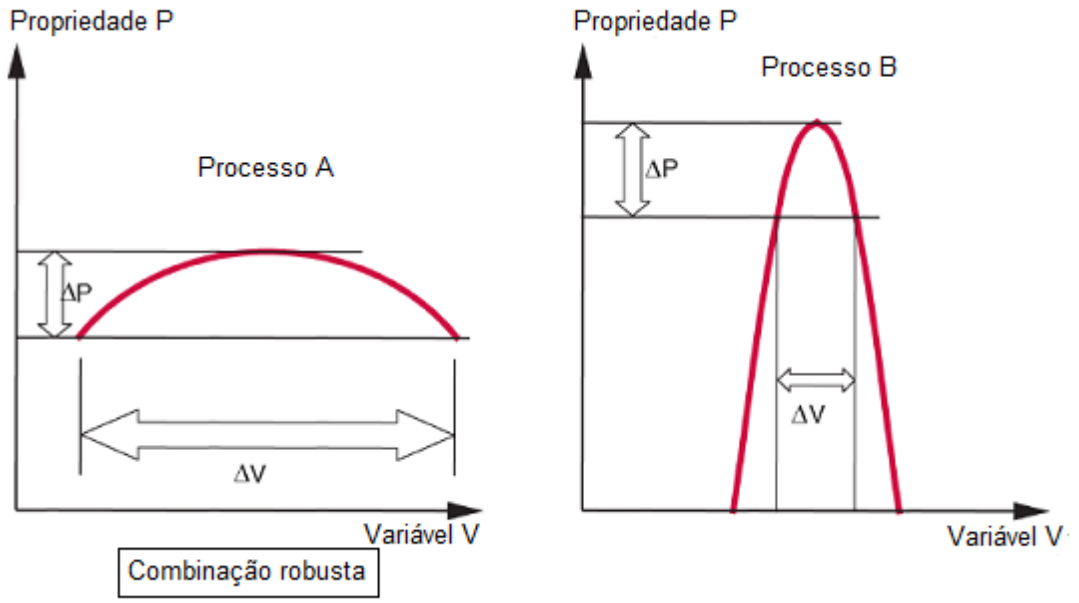


Fig. 2.2.- Robustez de um processo industrial (Nunes 2008)

A definição de robustez do BAC não é consensual, sendo muitas vezes considerada apenas uma ou várias das seguintes fases: o final da amassadura, o transporte e colocação, o estado endurecido. Segundo a NP EN 206-9 (IPQ 2007) a robustez refere-se à capacidade do betão de manter as suas propriedades no estado fresco quando ocorrem variações da quantidade de água. Como tal, a norma prevê que seja feito um estudo de robustez onde seja definido o intervalo admissível da dosagem de água, dentro do qual são satisfeitas as especificações do betão fresco, referidas em 2.1. No presente trabalho a robustez é tida como a capacidade do betão manter as suas propriedades, relevantes para determinada aplicação, quando ocorrem variações nos materiais constituintes ou nas suas quantidades.

Existem diversos factores de difícil controlo que influenciam o desempenho no estado fresco do betão e devem ser analisados com particular atenção, são eles, a variação dos materiais constituintes de diferentes lotes de produção/entregas, falta de precisão na pesagem dos materiais, alterações nas condições ambientais como temperatura e humidade, e ainda a variação do tempo de espera até à colocação. As características dos materiais constituintes devem ser verificadas sempre que existe alteração de lote de produção ou uma nova entrega. A precisão na pesagem dos materiais a colocar na misturadora é pouco rigorosa, após a colocação de um constituinte é medido o desvio em relação ao peso pretendido e os constituintes a colocar posteriormente são redimensionados em função dos desvios dos constituintes já medidos. Os desvios nos componentes líquidos e nos materiais mais finos (cimento e fíler) têm, em geral, maior influência no desempenho do betão fresco, (Rigueira, Taengua

et al. 2009). As condições ambientais são de grande importância. A elevadas temperaturas dá-se um aumento da velocidade das reacções de hidratação e a interacção entre o superplastificante e os componentes minerais é altamente afectada (Schmidt, Brouwers et al. 2010), levando a uma rápida perda das características de auto-compactabilidade. Uma variação na humidade dos agregados apresenta o mesmo efeito que a variação na pesagem da água da mistura que, como foi referido, é dos parâmetros que mais influencia as propriedades no estado fresco do BAC. O tempo de espera entre a betonagem e a aplicação é frequentemente incontornável e imprevisível, podendo conduzir a uma perda significativa da fluidez da mistura.

A optimização da robustez do BAC pode significar estratégias contraditórias (Georgiadis, Sideris et al. 2010), logo torna-se impossível optimizar certas propriedades sem comprometer outras. A utilização de agregados grossos de menores dimensões e maiores quantidades de constituintes finos, como por exemplo, cimento ou fíler, apesar de aumentar, em geral, a necessidade de superplastificante devido ao aumento de superfície específica, acrescendo custos, é a forma geralmente encontrada para aumentar robustez da mistura (Bonen 2007).

## 2.3. Métodos de Avaliação da Robustez do BAC

A robustez do BAC é altamente influenciada pela variação de água na mistura (2.2), percebe-se portanto que a avaliação da robustez seja frequentemente referida por investigadores como a capacidade de uma mistura manter as suas propriedades, quando ocorre a variação da quantidade de água. Por exemplo, em (BIBM 2005) um BAC robusto é um betão que aceita variações de 5 a 10 $l/m^3$ sem alterar a sua classe de consistência no estado fresco. No presente trabalho serão apresentadas 4 metodologias de avaliação da robustez, nomeadamente, o método LABEST/FEUP, o método baseado no superplastificante, a análise de sensibilidade à quantidade de água e a metodologia porposta por Peter Billberg. É comum, entre os investigadores, analisar-se o efeito de variações na composição de pastas, argamassas e betões de forma a perceber o efeito dessas variações, no desempenho do betão, sendo possível. Assim, através da comparação do desempenho de diversas misturas é possível escolher a que apresenta menores variações nas propriedades relevantes.

### 2.3.1 Metodologia LABEST/FEUP

A metodologia proposta em (Nunes 2008) avalia a robustez em termos da frequência de satisfação dos requisitos de desempenho, considerando os desvios diários de produção. Neste método é necessário um planeamento estatístico das experiências para estabelecer relações empíricas entre os parâmetros da mistura e as propriedades relevantes, ajustando modelos numéricos aos resultados experimentais. A técnica de replicação Bootstrap (Montgomery 2001) é empregue para gerar um vasto número de réplicas fictícias das misturas de betão, e através das relações empíricas são estimadas as variáveis de resposta. A probabilidade de todas as variáveis de resposta estarem dentro dos intervalos de aceitação pode ser tomada como uma medida da robustez do BAC. Esta medida de robustez pode variar entre 0 e 1, quanto mais próxima de 1 se encontrar mais elevada é a robustez do BAC. Este método tem a vantagem de englobar os desvios de pesagens (batching). O facto de a robustez ser expressa em termos de probabilidade torna possível comparar directamente diferentes misturas de BAC, no entanto, o método exige que a relação entre os parâmetros da mistura e as variáveis de resposta seja conhecida, o que requer um número significativo de ensaios.

#### 2.3.1.1. Plano factorial

O plano factorial pode ser utilizado para obter modelos empíricos que relacionam os parâmetros da mistura (variáveis independentes) as propriedades relevantes (variáveis de resposta). Este método considera a influência individual e conjunta, na forma de factores das variáveis com influência conjunta, a Eq 2.1. é um exemplo da equação genérica de um modelo de segunda ordem.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i<j} \sum \beta_{ij} X_i Y_j + \varepsilon \tag{2.1}$$

Onde, y é a variável de resposta; $x_i$ é uma variável independente; $\beta_0$ é o termo independente; $\beta_i$, $\beta_{ii}$ e $\beta_{ij}$ são os coeficientes das variáveis independentes e interacções, representando a sua contribuição para a resposta; $\varepsilon$ é o erro aleatório residual representando o efeito das variáveis ou termos de ordem superior, não considerados no modelo. Através de um planeamento das experiências segundo um plano factorial é possível obter os valores de $\beta$, introduzindo variações simultâneas nos parâmetros da mistura, e variações em apenas um parâmetro (pontos axiais do plano). Estes conceitos estatísticos são bem conhecidos e comummente utilizados em diversas áreas. No plano experimental a área estudada deve abranger valores próximos dos expectáveis, pois os modelos propostos são válidos apenas para a área estudada e para os materiais constituintes utilizados.

#### 2.3.1.2. Programação genética

O Algoritmo Genético (GA) é uma técnica iterativa de optimização global para problemas de elevada ordem e não lineares, sendo a sua principal vantagem a habilidade para encontrar soluções óptimas dos problemas parcialmente formulados. O método iterativo tem início num conjunto de soluções originais denominadas de população, cada solução (cromossoma) representa a solução potencial para o problema em cada iteração. O GA avalia cada cromossoma e selecciona os indivíduos que melhor se adaptam da população inicial e subsequentemente ocorrem operações genéticas incluindo cruzamento, e mutação para produzir a nova geração. Este processo é repetido para cada população, após um número de gerações o melhor cromossoma que representa a solução óptima é obtido e nenhum melhoramento significativo pode ser alcançado. Um esquema simplificado é representado na Fig. 2.3. A selecção apropriada dos parâmetros chave (método de reprodução e pressão, taxa de recombinação, taxa de mutação e número de indivíduos) é crítica para obter um desempenho satisfatório no GA (Al-Martini 2009).

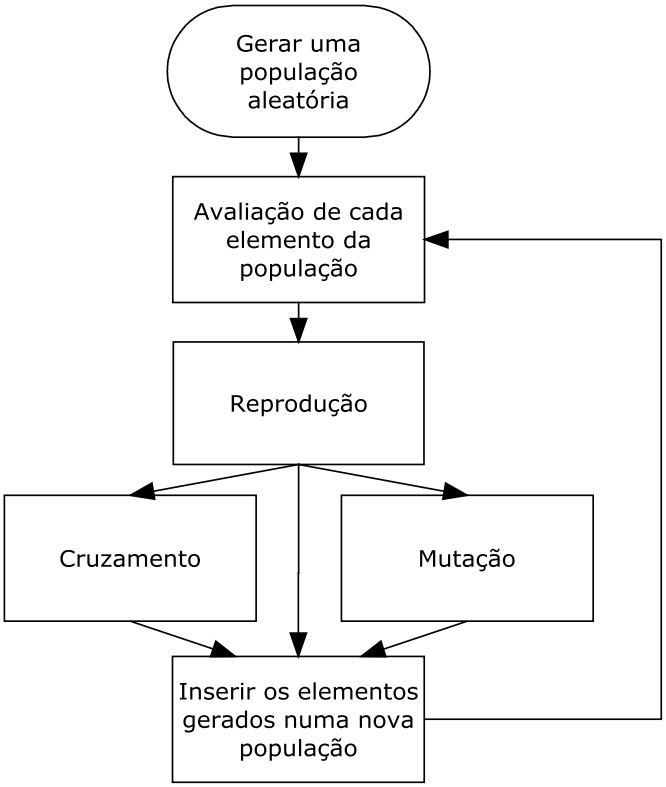


Fig. 2.3. – Esquema de funcionamento de um programa genético

A reprodução especifica a forma como o GA escolhe os progenitores da próxima geração. Este processo simula a selecção natural dos indivíduos mais capazes que se podem adaptar em ambientes de mudança e sobreviver nas reproduções das gerações procedentes. Está disponível uma grande variedade de métodos de selecção para melhor escolher os cromossomas, os mais comuns estão descritos sumariamente de seguida.

- Reprodução por Roleta Russa – este método consiste numa roleta cuja área é dividida em função da expectativa do indivíduo, por exemplo coeficiente de correlação, representa o cromossoma. A probabilidade de ser seleccionado um cromossoma é a sua expectativa dividida pelo somatório da expectativa de toda a população. Define-se uma linha de selecção (roleta) e são gerados números aleatórios entre 0 e 1, num total igual ao tamanho da geração desejado. De seguida as áreas são definidas numa linha de selecção como ilustra a Fig. 2.4. Os números aleatórios dispostos ordenadamente permitem escolher os cromossomas, na Fig. 2.4 os cromossomas reproduzidos são 1, 2, 2, 4, 6, 6 (Al-Martini 2009).
- Reprodução por torneio - A selecção por torneio escolhe aleatoriamente um grupo de indivíduos de uma população inicial. O número de indivíduos em cada grupo é definido como tamanho do torneio. Os melhores indivíduos de cada grupo são escolhidos para se combinar com o escolhido de outro grupo, produzindo uma nova geração. Este processo repete-se até ser seleccionado o número desejado de indivíduos.

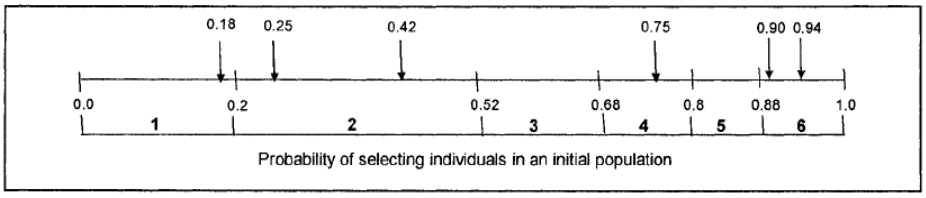


Fig. 2.4. - Reprodução utilizando o método da roleta russa (Al-Martini 2009).

O cruzamento é uma operação básica que especifica a forma como os cromossomas se combinam, isto é aplicado a uma percentagem dos cromossomas seleccionados na reprodução. A taxa de cruzamento define a quantidade de genes dos cromossomas que são cruzados. Escolher valores elevados de taxa de cruzamento reduz a probabilidade de ocorrerem falsos máximos mas torna o processo mais extenso e demorado.

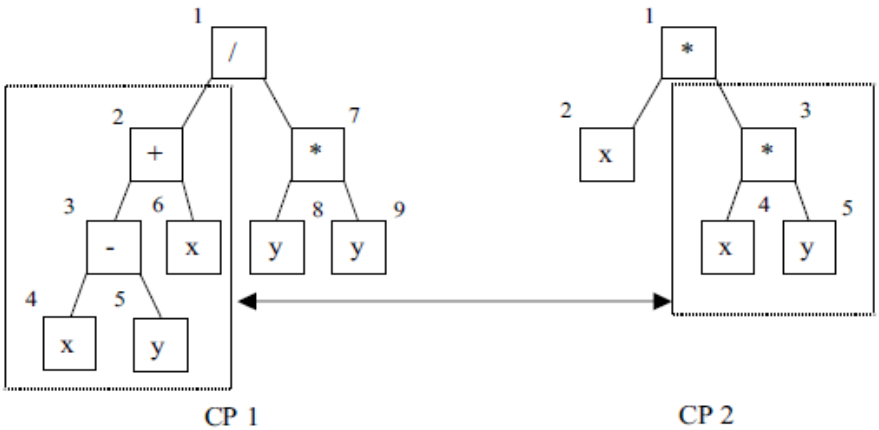


Fig. 2.5. – Exemplo de um cruzamento (fase inicial), (Sette and Boullart 2001).

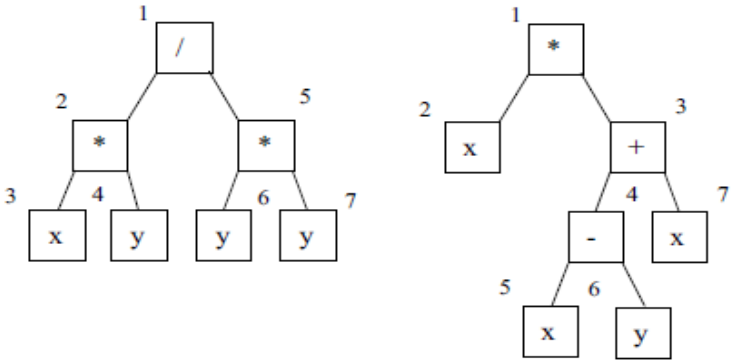

Fig. 2.6. - Exemplo de um cruzamento (fase final), (Sette and Boullart 2001).

A mutação é uma outra operação básica que actua numa percentagem de cromossomas obtidos na reprodução, que altera aleatoriamente a posição de um ou mais genes num cromossoma produzindo novos genes que não estavam presentes na população inicial. Caso a taxa de mutação seja muito lenta, muitos cromossomas úteis podem não ser testados, caso seja muito elevada muita perturbação aleatória será induzida e, consequentemente, as gerações não serão convergentes porque o algoritmo não é capaz de aprender a partir da história da procura (Al-Martini 2009).

O objectivo principal do GA é resolver um problema procurando soluções com elevados coeficientes de correlação, no espaço de todas as soluções possíveis. Este aspecto é a chave para encontrar soluções próximas do óptimo global, mantendo várias soluções que poderão estar próximas de mínimos (locais ou globais).

Em (Ozbay, Gesoglu et al. 2008) foi aplicado um GA para estabelecer as ligações entre as variáveis de mistura ($X_1$,$X_2$,$X_3$, . . . ,$X_9$) e as propriedades do BAC ($Y_1$, $Y_2$, $Y_3$, $Y_4$ e $Y_5$), dispostas no Quadro 2.2. O diâmetro de espalhamento escrito na forma $Y_i$=f($X_1$,$X_2$,$X_3$, . . . ,$X_9$), encontra-se na Fig. 2.7

Quadro 2.2. – Variáveis utilizadas na construção do modelo genético, (Ozbay, Gesoglu et al. 2008)

| Código | Variável de Input | Output |
|---|---|---|
| $X_1$ | Água | $Y_1$ Espalhamento (cm) |
| $X_2$ | Cimento | $Y_2$ Tempo de escoamento em funil V(s) |
| $X_3$ | Cinzas volantes | $Y_3$ Resistência à compressão (MPa) |
| $X_4$ | Escórias de alto forno | $Y_4$ Velocidade de ultra-sons (m/s) |
| $X_5$ | Microsílica | $Y_5$ Resistividade eléctrica (Kohm.cm) |
| $X_6$ | Areia natural | |
| $X_7$ | Areia britada | |
| $X_8$ | Agregado grosso | |
| $X_9$ | Sp | |

$$Desp = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5$$

$$F_1 = [7,409 * \left[\left[\left(\left(X_5 \times 1,433\right)/7,409\right)/\left(\left(X_5 - X_9\right) - X_3\right)\right] + 7,409\right]$$

$$F_2 = \left[Sin\left[\left[e^{\left[Ln\left(X_1 - 2,703\right) + \left(X_7 + 3,694\right)\right]}\right] + X_7\right] + 3,694\right]$$

$$F_3 = Ln\left[\left[X_9 \times \left[X_3 - \left(\left(X_3 + X_1\right) \times \left(-0,00338\right)\right)\right]\right] + X_4\right]$$

$$F_4 = Cos\left[\left[X_4 \times \left[\left(X_1 + 0,998\right) + \left(\left(-3,222 \times X_6\right) - X_4\right)\right]\right]^3\right]$$

$$F_{5=} Ln\left[\left[X_3 + \left[\left(Ln\left(X_1\right) \times \left(X_7 / X_2\right)\right) + X_3\right]\right] + X_4\right]$$

Fig. 2.7. – Exemplo das expressões resultantes do programa genético, para o diâmetro de espalhamento, (Ozbay, E. [et al.], 2008)

A programação genética é uma alternativa ao planeamento factorial, largamente utilizado e testado, aplicado ao BAC por (Ozbay, Gesoglu et al. 2008; Al-Martini 2009). Os modelos obtidos apresentam valores de coeficiente de correlação elevados, nunca substituindo, a verificação experimental. É importante referir que, os modelos criados com este método apresentam equações de tal complexidade que torna difícil a sua interpretação.

### 2.3.2. Método Baseado no Superplastificante

De acordo com (Ramge and Lohaus 2010), foi desenvolvido um método para a definição da composição da pasta de BAC, baseada em ensaios efectuados em pastas, argamassas e betões. A ideia base deste método consiste em considerar o efeito do superplastificante na consistência das misturas,

identificando a zona dos BACs eficientes. O modelo descreve as dependências, por exemplo: da fluidez, ou da estabilidade à segregação em função da concentração de superplastificante (Fig. 2.8). Nesta figura $V_f/V_p$ refere-se ao rácio volumétrico do fluido $V_f$ (água+adjuvantes) sobre o volume dos sólidos na pasta (finos)$V_p$.

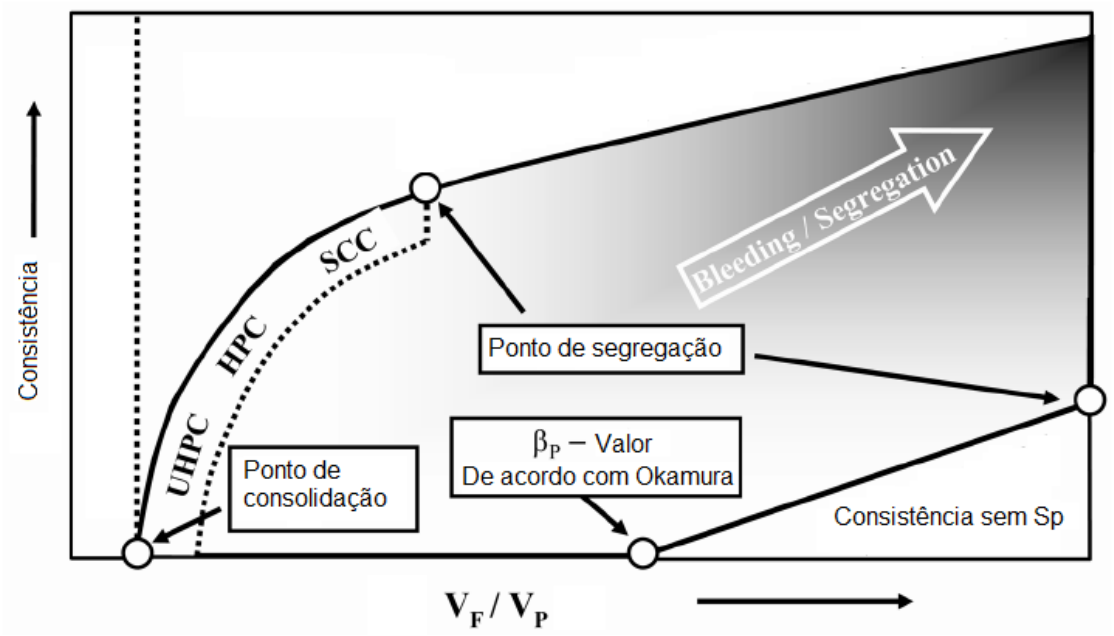


Fig. 2.8. - Metodologia baseada no superplastificante (Ramge, P. and Lohaus, L., 2010)

A linha na base do modelo da Fig. 2.8 refere-se à fluidez sem Sp. Diminuindo $V_f/V_p$ a fluidez decresce linearmente até que não é observada fluidez, este ponto para misturas sem superplastificante corresponde a $\beta_p$, de acordo com Okamura (Ramge and Lohaus 2010). Aumentando $V_f/V_p$ o ponto de segregação é atingido, acima deste ponto a pasta deixa de ser estável, segrega, os sólidos tendem a separar-se. Quando se aumenta a concentração de Sp a fluidez pode ser aumentada até um valor máximo específico para cada $V_f/V_p$, definindo a linha onde o ponto de saturação é atingido (ver Fig. 2.8). Nesta linha não existe praticamente tensão de cedência, logo a maior concentração de Sp não baixa mais a tensão de cedência, ou seja, para determinado $V_f/V_p$ não se pode atingir um valor maior do diâmetro de espalhamento do que o alcançado no ponto de saturação. A fluidez máxima decresce com a redução de $V_f/V_p$, tal como a necessidade de aumentar a concentração de Sp aumenta fortemente. Para rácios de $V_f/V_p$ superiores ao ponto de saturação a mistura revela-se instável (zona identificada a cinza representada na Fig. 2.8). Diminuindo o rácio $V_f/V_p$ abaixo do ponto de saturação pode obter-se BAC com elevadas concentrações de Sp sem ocorrência de segregação. Continuando a diminuir esse rácio, o diâmetro de espalhamento diminui, deixando este betão de ser auto-compactável. É nesta região que se localizam os betões de elevado e de muito elevado desempenho.

O ponto de consolidação designado de 'superplasticizer-based water demand' é significativamente inferior ao $\beta_p$-value de Okamura e inferior ao 'water demand' de Puntke, (Ramge and Lohaus 2010). O BAC necessita de viscosidade mínima, para ser estável à segregação, essa viscosidade pode ser diminuída se for aumentada a quantidade de finos de granulometria rica/extensa.

Um exemplo da aplicação do modelo baseado no superplastificante foi levado a cabo em (Ramge and Lohaus 2010), o ponto de consolidação foi encontrado a $V_f/V_p$=0.35 e o ponto de segregação $V_f/V_p$=0.8, Fig. 2.9. Para valores intermédios de $V_f/V_p$, foram testados diferentes Sp's com uma

dosagem fixa. Uma vez determinado o ponto de consolidação e o ponto de segregação, pode ser estudado o desempenho do betão para rácios de $V_f/V_p$ entre esses limites.

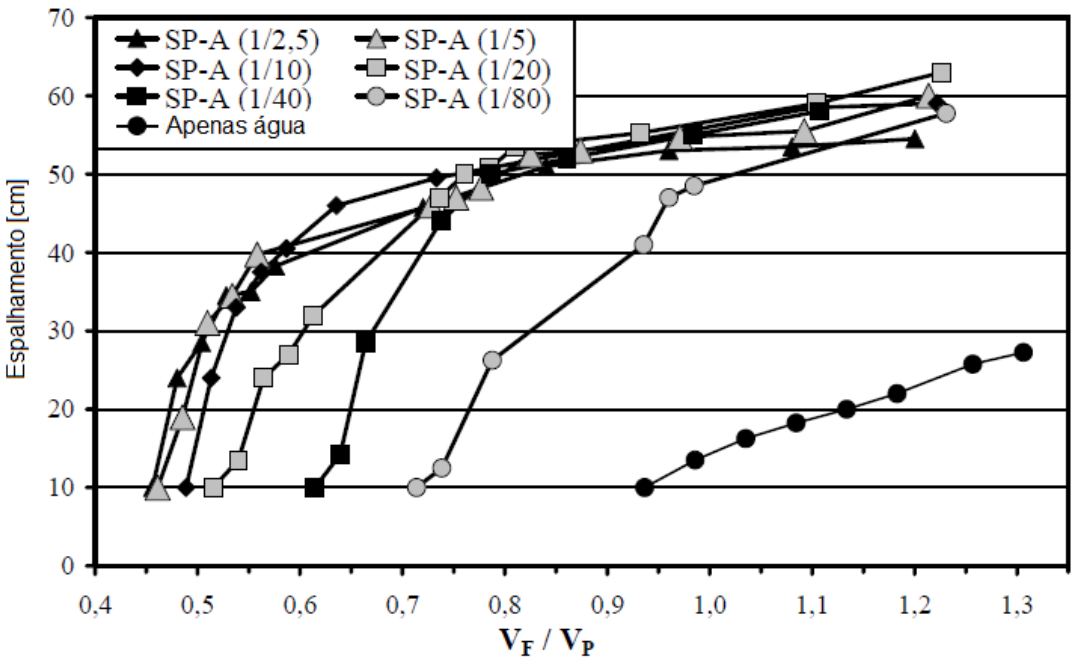


Fig. 2.9. – Variação diâmetro de espalhamento da pasta com a relação Vf/Vp e diferentes tipos de superplastificante PCE (Ramge and Lohaus 2010)

Com base na 'superplasticizer-based water demand' a fluidez e a viscosidade podem ser ajustadas e controladas pelos rácios $V_f/V_p$ e Sp/w, respectivamente (Ramge and Lohaus 2010). No entanto esta metodologia requer um elevado número de amassaduras, sendo que para cada concentração de superplastificante são necessárias várias amassaduras, uma para cada rácio $V_f/V_p$ que se queira analisar.

Este método permite perceber a tendência das propriedades do betão perante variações na fase líquida permitindo determinar os valores extremos da sua estabilidade. A análise de robustez é bastante limitada, sendo útil para um pré-dimensionamento.

### 2.3.3 Metodologia de Peter Billberg

A metodologia de avaliação da robustez de Peter Billberg, surge integrada num processo de 3 fases:

- Na primeira fase são analisados os parâmetros de mistura críticos, são induzidas diversas variações nos parâmetros de mistura para determinar os mais influentes na tensão de cedência de micro argamassas (pasta + agregados de dimensão inferior a 125 $\mu$m).
- Na segunda fase são analisados os gráficos da tensão de cedência vs viscosidade plástica, Fig. 2.10(a), de argamassas equivalentes de betão (CEM, ou seja, argamassas derivadas da mistura correspondente de betão onde o agregado grosso é substituído por agregado fino com a mesma superfície específica), para várias misturas contendo diferentes tipos de agentes modificadores de viscosidade (VMA). Realizaram-se ensaios reométricos para cada mistura, sujeitas a variações dos factores críticos determinados na primeira fase. Para cada mistura determinou-se

o menor rectângulo que contém todos os pontos da curva tensão de cedência vs viscosidade plástica, denominadas de 'área de relativas'.

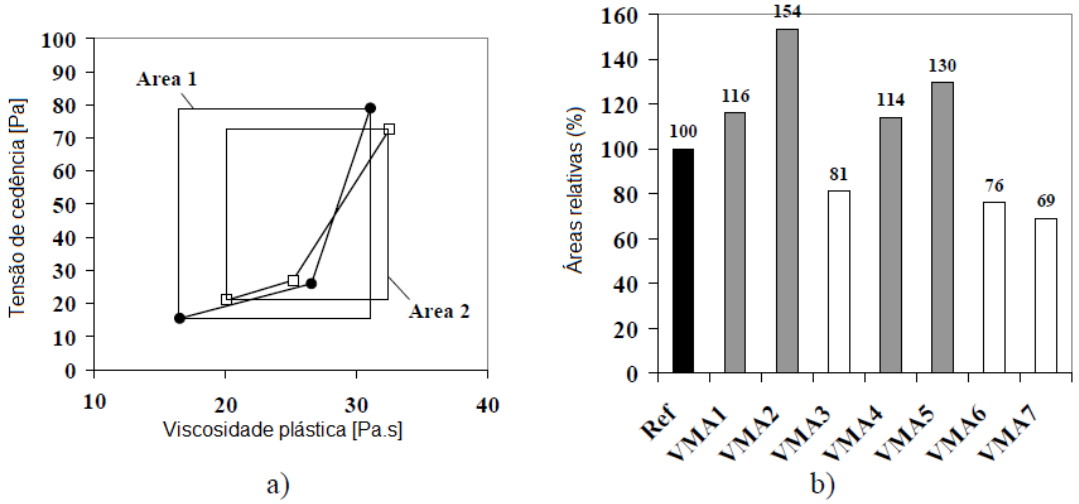


Fig. 2.10. – (a) O princípio base de cálculo de área de robustez; (b) exemplo de comparação da robustez de uma mistura com diferentes VMA's (Billberg 2009).

- Na terceira fase são escolhidas as misturas de menor área relativa, e são analisados os BACs correspondentes às CEM, com rácios de w/c variáveis e com concentrações de VMA variáveis. Para cada uma dessas composições foi elaborada uma análise de sensibilidade da consistência à variação da quantidade de água (humidade de areia). Essa variação, foi quantificada através de um método que, considera o comprimento de variação relativo $SV_{rel}$(%), que representa o comprimento em que a consistência do betão cumpre o intervalo pretendido, a Fig. 2.11. mostra, como se determina o comprimento de variação relativo $SV_{rel}$(%). Sendo que, os betões que apresentam um comprimento de variação mais elevado, são menos sensíveis à variação de água.

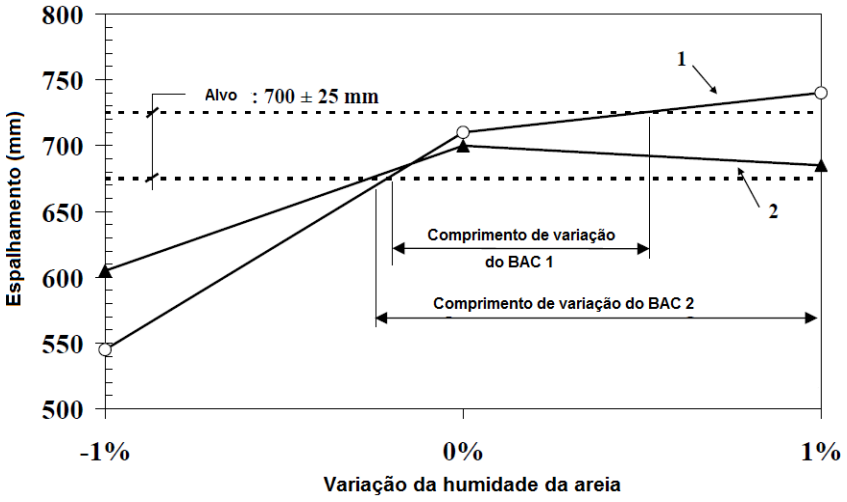


Fig. 2.11. – Quantificação do comprimento de variação

Este método é expedito, permite comparar a robustez de misturas numericamente, apesar de existir a possibilidade de *outliers* condicionarem gravemente a análise, caso o número de ensaios seja reduzido.

## 2.4. Reologia da Pasta de Cimento e Betão

O BAC pode ser interpretado, de forma simplificada, como agregados em suspensão na pasta. Desta forma, isolando a fase da pasta é possível realizar ensaios que de outra forma não seriam possíveis devido à dimensão dos agregados, permite ainda isolar fenómenos e economizar materiais. As análises em pastas e argamassas adicionam algumas imprecisões devido à ausência de certos materiais, não existindo correlações directas entre ambas, no entanto, é na pasta que ocorrem maior parte dos fenómenos que afectam a reologia do BAC, floculação das partículas coloidais, dispersão do superplastificante, formação de bolhas de ar, adsorção de água na superfície das partículas, etc (Billberg 2009).

A pasta no estado fresco comporta-se como um fluido viscoso, e o estudo do seu escoamento, ou seja da sua reologia (relação entre força, deformação e tempo) é fundamental para compreender a estrutura interna, para projectar equipamentos de bombagem de betão (Al-Martini 2009) e também para ajustar as composições em função trabalhabilidade desejada (Li 2007).

### 2.4.1. Fundamentos Básicos de Reologia da Pasta de Cimento

Ao ser aplicada a força F na pasta de cimento dá-se uma deformação por corte, i.e. há um deslocamento relativo ($\Delta x$) entre dois planos paralelos separados entre si por uma distância (*y*).

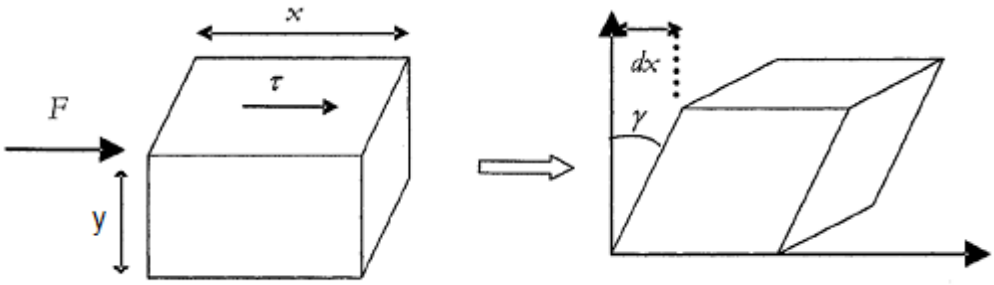


Fig. 2.12. - Deformação por corte (Al-Martini 2009)

A pasta de cimento deforma-se e a sua deformação ($\gamma$) aumenta continuamente com o tempo, neste caso interessa avaliar a taxa de deformação que mede a variação da deformação com o tempo, tal como indicado na Eq. (2.1), e expressa-se em (1/s) ou (Hz). A taxa de deformação para uma dada tensão aplicada depende da resistência que o material oferece ao escoamento, i.e. da viscosidade aparente ($\eta$). A viscosidade aparente é fisicamente definida como a medida da resistência ao escoamento (Al-Martini 2009) pode ser calculada segundo a Eq (2.2) e expressa-se em (Pa.s).

$$\dot{\gamma} = \frac{dx}{dt} \tag{2.1}$$

$$\eta = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} \tag{2.2}$$

Uma vez que, a viscosidade aparente é função da taxa de deformação, importa estudar as taxas de deformação a que o betão está sujeito durante os processos de produção e colocação. O betão desde o fabrico até à sua colocação é sujeito a taxas de deformação variáveis, tal como indicado na Fig. 2.13. Durante a colocação, o betão encontra-se sujeito a taxas de deformação da ordem de 3 a 20 Hz e no caso do BAC estas podem descer para valores da ordem de 1 a 0.5 Hz (Saak 2000).

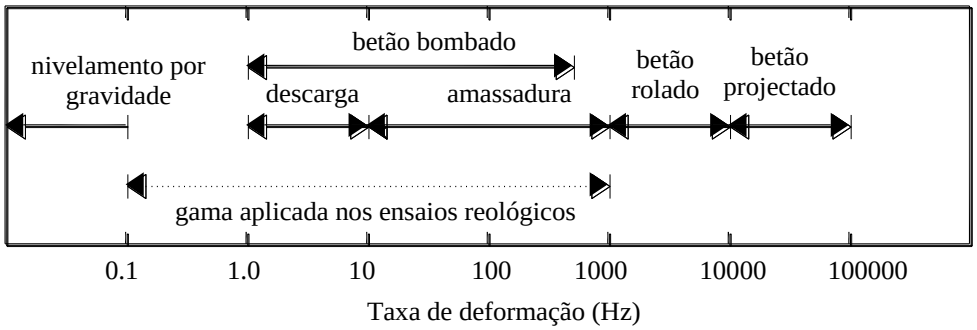


Fig. 2.13. - Gama das taxas de deformação associadas a diferentes processos (Saak 2000)

### 2.4.2. Tensão de Cedência

A reologia da pasta de cimento fresca é controlada pela estrutura tridimensional (gel) que se forma quando as partículas de cimento entram em contacto com a água. Esta estrutura resulta da combinação de forças coloidais (por exemplo, as forças de atracção de Van der Walls e de repulsão electrostática) e das reacções químicas que produzem silicatos de cálcio hidratados. Esta estrutura tem uma capacidade muito limitada para suportar cargas da qual resulta o comportamento viscoelástico da pasta de cimento. A pasta de cimento é muito viscosa, assemelhando-se a um sólido elástico para tensões baixas. O cimento é composto por uma parte de partículas coloidais (diâmetro<10μm) e outra de partículas não-coloidais. A combinação das diversas forças inter-partículas resulta na floculação das partículas da pasta de cimento e, em larga medida, a tensão de cedência é a tensão necessária para romper essa estrutura floculada e iniciar o escoamento (Saak 2000).

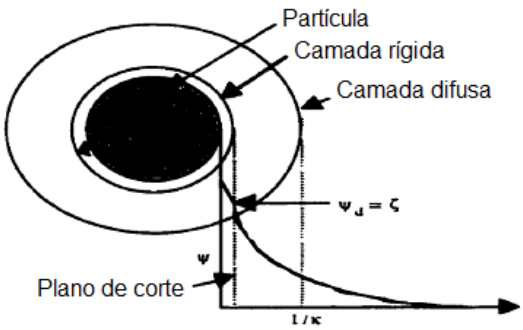


Fig. 2.14. – Modelo do potencial eléctrico para uma partícula coloidal, (Saak 2000).

Onde, $\Psi$ representa o potencial eléctrico, $\Psi_d$ representa o potencial eléctrico no plano de corte, $\xi$ representa o potencial zeta e k representa o parâmetro de Debye-Huckel, definidos em (Saak 2000).

As partículas de cimento em água são carregadas positivamente, presumivelmente devido aos iões positivos adsorvidos para a superfície negativa. Esta camada é a camada rígida. A natureza exacta desta camada não é ainda completamente compreendida, mas é tida como imóvel. No lado exterior da camada rígida, existe uma nuvem de iões onde o potencial decai exponencialmente até a carga da superfície ser neutralizada, Fig. 2.14. O somatório das forças totais no sistema são a soma das forças atractivas Van der Waals e as forças repulsivas electrostáticas.

Além das forças inter-partículas, a tensão de cedência também é afectada pelas reacções de hidratação que vão decorrendo com o tempo. Quando o cimento é misturado com a água existe uma evolução rápida de calor que ocorre durante cerca de 15 minutos, ver Fig. 2.15. Em seguida a reacção prossegue

muito lentamente durante 1-2 horas, no chamado período dormente ou de indução. A lentidão das reacções durante este período permite que a pasta mantenha a sua natureza fluida nas primeiras idades. O início de presa ocorre entre 2 a 4 horas após o fim da amassadura e continua rapidamente durante o período de aceleração. Após 4-8 horas, a taxa de reacção desacelera e continua até ao "steady-state period" (ver Fig. 2.15) (Saak 2000). Deve ser notado que a forma da curva da Fig. 2.15 se altera significativamente consoante o tipo de cimento.

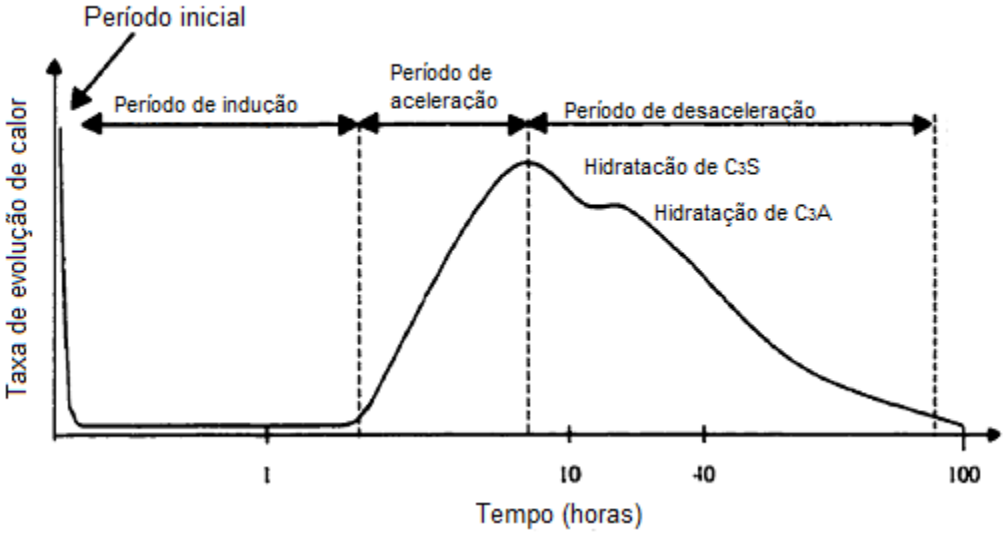


Fig. 2.15. – Taxa de evolução do calor durante a hidratação de uma pasta de cimento típica, (Saak 2000).

Uma das teorias mais aceites para explicar a evolução das reacções de hidratação na pasta de cimento explica o período dormente com a formação de uma camada (membrana) rica em produtos de hidratação em torno das partículas de cimento. Esta membrana impede o acesso da água e o transporte de iões para a parte não hidratada dos grãos de cimento. Partículas de cimento aglomeradas podem partilhar a mesma membrana, contudo esta membrana pode ser rompida se for aplicada uma tensão de corte suficientemente elevada. Ou seja, esta membrana protectora funciona como uma força mecânica mantendo as partículas de cimento juntas e a resistência oferecida por esta membrana influencia o valor da tensão de cedência da pasta (Saak 2000).

### 2.4.3. Viscosidade

Depois de ultrapassada a tensão de cedência, a suspensão inicia o escoamento para uma taxa de deformação baixa. Qualitativamente, a viscosidade aparente mede a resistência que o material oferece ao escoamento e é constante no caso dos fluidos Newtonianos (Saak 2000). A viscosidade de um fluido com partículas em suspensão depende da concentração de sólidos, densidade da matriz e a máxima densidade da matriz. Foi desenvolvida em (Li, Ohkubo et al. 2004), uma aproximação teórica aos parâmetros reológicos de betão de elevada fluidez em função da tensão de corte ($\tau$):

$$\eta_a = \frac{\tau}{C_1} e^{(\frac{E}{kT})} \frac{1}{\sinh[C_2(\tau - \tau_y)]} \tag{2.3}$$

Onde, $C_1=2kT/hN_c\Lambda_{cm}$; $C_2= S_d\Lambda_{cm}/2kTN_c$; E=energia potencial média de uma partícula de cimento que cria a resistência viscosa ao movimento de uma partícula de cimento; $N_c$ = número de partículas de cimento por unidade de dimensão; $\Lambda_{cm}$ = distância média do movimento de partículas de cimento quando o betão fresco flui; $k$ = constante de Boltzmann; $h$ = constante de Planck; T = temperatura absoluta; e $S_d$ = coeficiente de distribuição de tensões, que é igual ao rácio do volume das partículas de cimento pelo volume total de todas as partículas sólidas numa unidade de betão; $\tau_y$ é referido como a verdadeira tensão de cedência do betão fresco de elevada fluidez, i.e. tensão de corte originada por resistências inter-friccionais no betão fresco.

Como o betão é sujeito a diferentes taxas de deformação durante a sua produção e colocação é importante considerar um parâmetro de viscosidade que englobe várias taxas de deformação. Para tal, recorre-se a modelos fenomenológicos e empíricos para caracterizar o comportamento não-newtoniano dos fluidos em escoamento sob condições de equilíbrio, entre eles, o modelo de Bingham, de Casson, de Herschel-Bulckley, de Krieger-Dougherty e o modelo Power-law de Ostwald-de Waele. Em seguida, apresenta-se o modelo de Bingham bastante utilizado para a caracterização de pastas de cimento devido à sua simplicidade e reduzido número de parâmetros. Os parâmetros referem-se às constantes no modelo que é necessário ajustar aos resultados obtidos.

- **Bingham**

A relação de Bingham (ver Eq(2.4) e Eq(2.5)) é constituída por dois parâmetros ($\sigma_0$ e $\eta_{pl}$) e é utilizada para descrever fluidos viscoplásticos com tensão de cedência. Um material de Bingham ideal comporta-se como um sólido elástico para valores da tensão baixos e um fluido Newtoniano para valores da tensão acima de um valor crítico designado por tensão de cedência de Bingham $\sigma_0$. Na região da viscosidade plástica existe uma relação linear entre a tensão de corte e a taxa de deformação, com viscosidade diferencial constante e igual à viscosidade plástica $\eta_{pl}$

$$\sigma = \sigma_0 + \eta_{pl}\dot{\gamma} \tag{2.4}$$

$$\dot{\gamma} = 0 \;\; para \;\; \sigma < \sigma_B \tag{2.5}$$

Os valores típicos da viscosidade plástica de pastas de cimento de consistência normal variam entre 0.01 e 1 Pa.s (Nunes 2008).

### 2.4.4. Tixotropia

De uma perspectiva microestrutural, a tixotropia é o resultado da degradação estrutural devido à rotura dos flocos ou partículas ligadas. Quando uma estrutura específica colapsa, a viscosidade decresce com o tempo de deformação até atingir assimptóticamente o valor possível mais baixo, para uma determinada taxa de deformação. Este estado é denominado de estado de dispersão ‘sol’. Ao longo do tempo a estrutura ‘gel’ reconstrói-se e é eventualmente restaurada a sua condição original, ver Fig. 2.16. A transição gel-sol e subsequente reconstrução sol-gel, é idealmente reversível. No entanto, vários materiais (incluindo pasta de cimento) demonstram uma quebra irreversível designada por tixotropia (Saak 2000). Se um material apresenta tixotropia, as curvas resultantes (ascendente e descendente) não coincidem, e a área entre essas duas curvas pode ser utilizada como medida do grau

de tixotropia (Al-Martini 2009), são necessários dois ensaios para determinar a tixotropia, quer o material seja tixotropico ou não, um material é tixotrópico quando um 'loop' é também obtido no segundo teste.

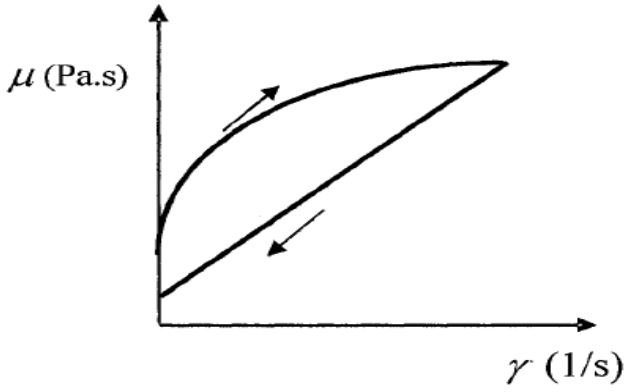


Fig. 2.16. – *Hysteresis loop* típico de um fluido tixotrópico (Al-Martini 2009)

### 2.4.5. Classificação das Curvas de Escoamento

O BAC quando sujeito a variações da taxa de deformação pode comportar-se de diferentes formas, na Fig. 2.17 apresentam-se um conjunto de curvas que descrevem os comportamentos reológicos mais frequentemente encontrados para uma gama limitada de taxas de deformação. De notar que, alguns materiais podem exibir comportamentos distintos para diferentes gamas da taxa de deformação ao longo de uma mesma curva de escoamento (Hackley 2001). Esses comportamentos representados na Fig. 2.17, são os seguintes:

1. **newtoniano**: a viscosidade não varia com a taxa de deformação. Quando a deformação é interrompida, a tensão cai instantaneamente para zero; quando a deformação recomeça a viscosidade é a mesma que foi medida inicialmente, independentemente do tempo de repouso (Al-Martini 2009);

2. **dilatante** ("shear thickening"): a viscosidade aumenta continuamente com a taxa de deformação;

3. **pseudoplástico** ("shear thinning or pseudoplastic"): a viscosidade diminui continuamente com a taxa de deformação e não há tensão de cedência;

4. **pseudoplástico com tensão de cedência**: a viscosidade diminui continuamente com a taxa de deformação depois de excedida a tensão de cedência

5. **plástico de Bingham ideal**: obedece idealmente à Lei de Bingham, acima da tensão de cedência de Bingham a viscosidade diferencial é constante, e designa-se por viscosidade

plástica, enquanto o coeficiente de viscosidade tende a diminuir para um valor limite correspondente a uma taxa de deformação infinita.

6. **plástico de bingham não-ideal**: acima da tensão de cedência a viscosidade diminui continuamente, enquanto a viscosidade diferencial aproxima-se de um valor constante à medida que a taxa de deformação aumenta. A tensão de cedência de Bingham obtém-se extrapolando a parte linear da curva de escoamento, na zona das taxas de deformação elevadas até intersectar o eixo das tensões. A viscosidade diferencial na região linear é designada por viscosidade plástica.

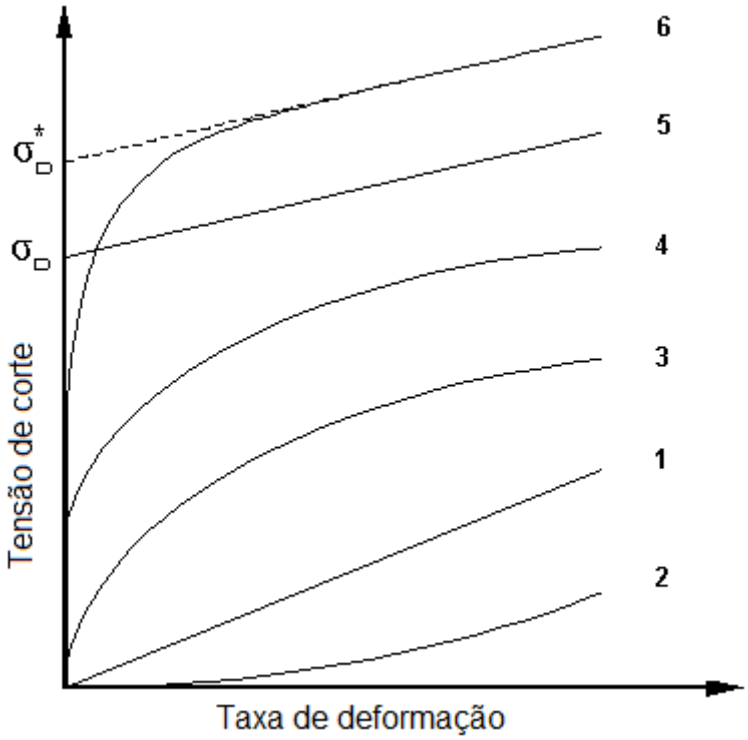


Fig. 2.17. – Identificação das curvas de escoamento em função da sua forma característica: (1) Newtoniano; (2) dilatante; (3) pseudoplástico; (4) pseudoplástico com tensão de cedência; (5) plástico de Bingham ideal; (6) plástico de Bingham não-ideal.

### 2.4.6. Efeitos do Tempo e Temperatura na Reologia de BAC sem Agitação

Quando o betão no estado fresco é mantido em estado estacionário (sem misturar), a sua fluidez degrada-se gradualmente com o tempo, sendo ainda agravada com o aumento da temperatura, essa degradação é atribuída essencialmente à hidratação do cimento e floculação de partículas de cimento, resultante dos choques decorrentes do movimento aleatório de partículas, *Brownian motion* (Li, Ohkubo et al. 2004). A causa química da queda de fluidez é a hidratação do cimento, que aumenta a energia de superfície nas partículas de cimento e baixa o efeito de dispersão do superplastificante cobrindo parcialmente os polímeros adsorvidos. Quando os produtos de hidratação de estrutura cristalina, como a etringite, são gerados à volta das partículas de cimento, a área de superfície

aumenta, diminui assim a densidade da camada de polímero adsorvida, tornando-se a floculação mais fácil. Caso exista uma sobredosagem, garante-se uma reserva de polímeros por adsorver, que será adsorvida pelos produtos de hidratação, mantendo a densidade do polímero constante por mais tempo. Logo, a densidade da camada do polímero de adsorção não altera com o tempo. No entanto, quando o excesso de polímeros estão esgotados, e a densidade da camada de polímeros das partículas de cimento decresce com o tempo, devido ao aumento da superfície específica dos hidratos, reduz-se a resistência à floculação. Resulta ainda da hidratação e diminuição da água de mistura livre um aumento do ângulo inter-friccional, logo, a verdadeira tensão de cedência ($\tau_y$) em betões de elevada fluidez aumenta com o tempo. Então a viscosidade plástica $\eta_{pl}$ de betões de elevada fluidez aumenta com o aumento do tempo decorrido no estado estacionário. É possível obter uma aproximação teórica às variações das constantes de Bingham com o tempo no estado estacionário, considerando que, as constantes são medidas com o método da trabalhabilidade 2-pontos, ilustrado na Fig. 2.18, são expressas pelas Eq(2.6) e (2.7).

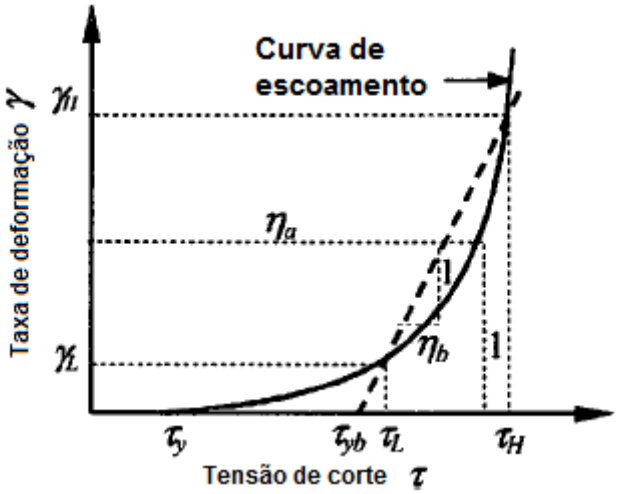


Fig. 2.18. – Método da trabalhabilidade 2-pontos

$$\eta_{pl} = \frac{\tau_H - \tau_L}{\dot{\gamma}_H - \dot{\gamma}_L} = \frac{1}{C_1} \cdot \frac{(\tau_H - \tau_L) \cdot e^{E/kT}}{\sinh[C_2(\tau_H - \tau_y)] - \sinh[C_2(\tau_L - \tau_y)]} \tag{2.6}$$

Onde, $\eta_{pl}$ = viscosidade plástica; $\tau_h$ e $\tau_l$ = tensão de corte do ponto mais alto e do ponto mais baixo, respectivamente.

$$\tau_{yb} = \frac{\tau_L \dot{\gamma}_H - \tau_H \dot{\gamma}_L}{\dot{\gamma}_H - \dot{\gamma}_L} \cong \tau_y + \frac{E}{C_2 kT} + \frac{\dot{\gamma}_H \ln \dot{\gamma}_L - \dot{\gamma}_L \ln \dot{\gamma}_H}{C_2(\dot{\gamma}_H - \dot{\gamma}_L)} + \ln \frac{2}{C_1} \tag{2.7}$$

As Eq (2.6) e (2.7) indicam que $\eta_{pl}$ ou $\tau_{yb}$ dos betões de elevada fluidez aumentam com o aumento da energia potencial média da barreira das partículas de cimento (E), que é energia das partículas relativa à estrutura em flocos, que as impede de dispersarem. Esta energia aumenta, no estado estacionário e com o decorrer do tempo.

# 3
# IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA ROBUSTEZ DO LABEST/FEUP

## 3.1. Introdução

No capítulo 3 foi desenvolvido um *script* em Matlab® que automatiza a metodologia LABEST/FEUP de avaliação da robustez (ver Anexo A) quando existem modelos que relacionem as propriedades relevantes do betão com os parâmetros da mistura. Procedeu-se à validação dos resultados do *script* por comparação com uma análise de robustez realizada em (Nunes 2008) e, posteriormente, aplicou-se a metodologia a uma mistura optimizada no âmbito do projecto FCT/PTDC/ECM/70693/2006 – "*Betão dimensionado para melhorar o desempenho nas primeiras idades e a durabilidade. Caracterização da escala nano à macro*".

## 3.2. Descrição do Script

O *script* desenvolvido de avaliação da robustez é composto pelas fases descritas na Fig. 3.1, ou seja:

1. Input e organização dos dados;
2. Criação de um conjunto de misturas fictícias baseado na composição alvo e nos desvios de produção, registados na unidade de produção com os constituintes em causa;
3. Previsão das propriedades das diferentes misturas desse sub-conjunto, através de modelos numéricos previamente ajustados a cada uma das propriedades em análise;
4. Verificação da conformidade das misturas de cada sub-amostra fictícia;
5. Análise da frequência de conformidade das misturas nas sub-amostras;

Este processo repete-se até que a média das frequências de conformidade de várias sub-amostras represente a medida de robustez com um erro baixo.

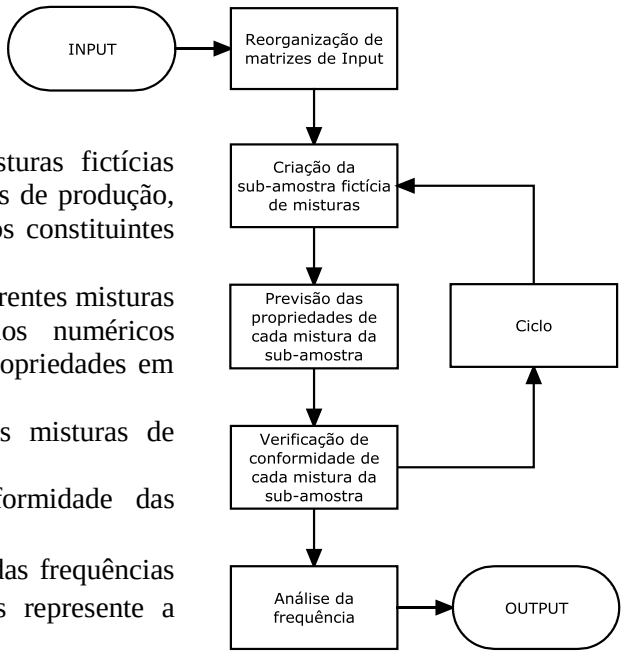


Fig. 3.1. – Fases do script

Na Fig. 3.2 as fases descritas da Fig. 3.1 são detalhadas com mais pormenor. Nessa figura [$\Delta$X] representa os desvios de produção das variáveis de mistura [X]; [$\Delta_{bs}$X] representa um conjunto de desvios recolhidos aleatoriamente dos desvios [$\Delta$X], com reposição; [$X_0$] representa os parâmetros da da mistura-alvo; [$X_{bs}$] representa as variáveis da sub-amostra fictícia acrescida dos desvios de produção; [$R_{inf}$] e [$R_{sup}$] são os limites do intervalo de aceitação para as propriedades do BAC; [Y] são os valores previstos das propriedades do betão para a população de misturas [$X_{bs}$] determinado através de modelos numéricos de previsão; $f_i$ é a taxa de sucesso da sub-amostra, ou seja, a frequência com que todas as variáveis de resposta [Y] de um elemento da sub-amostra se situam entre [$R_{inf}$] e [$R_{sup}$]; P representa a medida de robustez e é dada pela média da taxa de sucesso de um número elevado de sub-amostras.

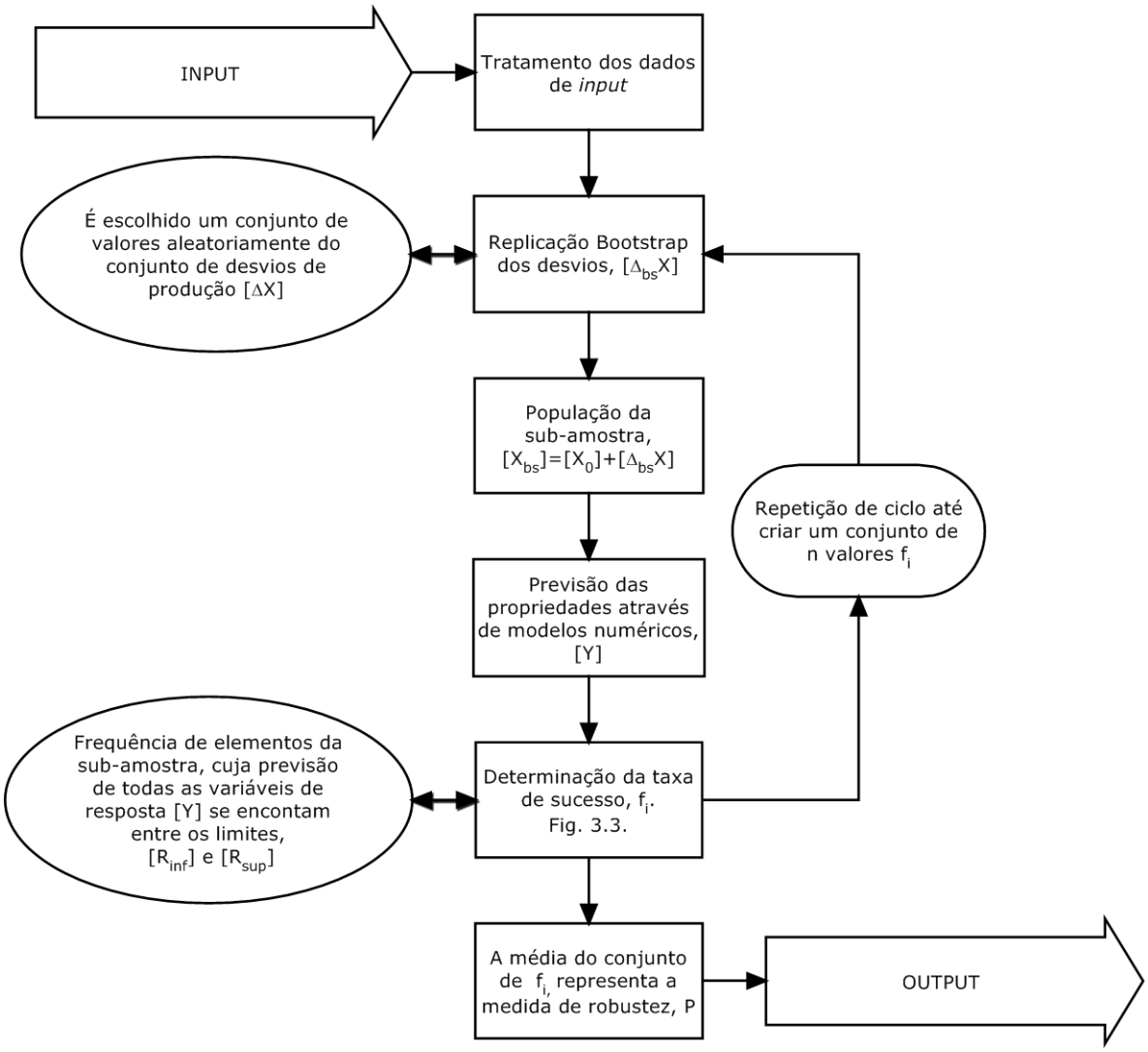


Fig. 3.2. – Layout do *script*

### 3.2.1. Variáveis de Input e Pré-Tratamento

A interface de interacção com o utilizador é o Excel®, aí são introduzidos todos os dados necessários para aplicar esta metodologia. O *input* desses valores para o Matlab® é realizado posteriormente através da função 'xlsread'. Optou-se por fazer esta interacção entre estes programas uma vez que é comum ser feito um pré-tratamento dos dados em Excel®, assim sendo, esse pré-tratamento pode ser feito no mesmo ficheiro simplificando o processo de *input*. Os dados necessários para a aplicação desta metodologia são: os modelos numéricos de previsão do tipo Eq. (3.1), a composição alvo, os desvios de produção, e os intervalos de aceitação das variáveis de resposta. Por estarmos a lidar com uma quantidade significativa de dados, os *input*'s são em geral tratados como arrays (conjunto de elementos, todos do mesmo tipo, ao qual é atribuído um nome), vectores ou matrizes, assim o cálculo matricial torna o processo mais expedito.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i X_i^2 + \sum_{i<j}\sum \beta_{ij} X_i Y_j + \varepsilon \tag{3.1}$$

Os modelos são fornecidos em folha de cálculo tal como demonstrado pelo exemplo do modelo referente ao diâmetro de espalhamento apresentado no Quadro 3.1.

Quadro 3.1. – Modelo numérico antes de ser adaptado para Matlab®

| | A<br>desp | B<br>= |
|---|---|---|
| 1 | -2046,86 | |
| 2 | -2592,99 | * w/c |
| 3 | 136413,62 | * Sp/p |
| 4 | -2828,56 | * Vw/Vp |
| 5 | 3984,79 | * Vs/Vm |
| 6 | 1153,15 | * s1/s |
| 7 | 7594,88 | * Vg/Vg,lim |
| 8 | 8463,47 | * w/c * Vs/Vm |
| 9 | 14205,31 | * Vw/Vp * Vs/Vm |
| 10 | -5561,04 | * Vw/Vp * s1/s |
| 11 | 7405,49 | * Vs/Vm * s1/s |
| 12 | -3467957,63 | * Sp/p^2 |
| 13 | -27986,02 | * Vs/Vm^2 |
| 14 | -7486,77 | * Vg/Vg,lim^2 |

Os elementos da coluna B permitem identificar a que elemento (*i*, ou *ij*) de $\beta$ se refere a célula da coluna A dessa linha. Como os elementos dessa coluna apresentam uma forma, dimensão e caracteres variáveis, complica a análise do Matlab® para posterior construção do vector modelo [M], ordenado. Então, optou-se por separar a coluna B manualmente em Excel®, transformando-a em duas colunas com o nome de cada variável (ver Quadro 3.2). Desta forma, as colunas B e C definem cada um dos índices *i* e *j* de $\beta_{ij}$, sendo mais facilmente analisadas em Matlab®, o somatório do seu valor nativo (número que corresponde a cada caracter) pode ser comparado com o somatório do valor nativo das variáveis, permitindo identifica-las.

Quadro 3.2. - Modelo numérico depois de ser adaptado para Matlab®

| | A<br>Desp (B) | B<br>= | C |
|---|---|---|---|
| 1 | -2046,86 | | |
| 2 | -2592,99 | w/c | 1 |
| 3 | 136413,6 | Sp/p | 1 |
| 4 | -2828,56 | Vw/Vp | 1 |
| 5 | 3984,793 | Vs/Vm | 1 |
| 6 | 1153,147 | s1/s | 1 |
| 7 | 7594,882 | Vg/Vg,lim | 1 |
| 8 | 8463,475 | w/c | Vs/Vm |
| 9 | 14205,31 | Vw/Vp | Vs/Vm |
| 10 | -5561,04 | Vw/Vp | s1/s |
| 11 | 7405,486 | Vs/Vm | s1/s |
| 12 | 3467958 | Sp/p | Sp/p |
| 13 | -27986 | Vs/Vm | Vs/Vm |
| 14 | -7486,77 | Vg/Vg,lim | Vg/Vg,lim |

### 3.2.2. Reorganização de Vectores e Matrizes

O *input* dos modelos revelou-se o mais complexo dos *input*'s. Devido à necessidade de conjugar a ordem das linhas da matriz transformação [$\beta$], Eq(3.3), com a ordem das colunas da matriz das variáveis de mistura [X], Eq.(3.4). A matriz [$\beta$] é composta por vários vectores modelo [M], exemplificado na matriz (3.2), consiste nos valores $\beta_0$, $\beta_i$ e $\beta_{ij}$ da Eq.(3.1) organizados numa sequência definida. O conjunto dos vectores modelo [M] forma o vector transformação [$\beta$], Eq.(3.3). Desta forma o produto matricial das variáveis de mistura [X], Eq(3.4), pelo vetor transformação [$\beta$], Eq.(3.3), permiter estimar as variáveis de resposta [Y], Eq(3.5), através de uma multiplicação matricial.

$$[M]=\begin{bmatrix}\beta_0\\ \beta_1\\ \vdots\\ \beta_k\\ \beta_{11}\\ \vdots\\ \beta_{1k}\\ \beta_{22}\\ \vdots\\ \beta_{2k}\\ \vdots\\ \beta_{kk}\end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$[\beta]=\left[\left[M^1\right] \quad \cdots \quad \left[M^b\right]\right] \quad (3.3)$$

$$[X]=\left[1 \quad X_i \quad \ldots \quad X_k \quad X_{ij} \quad \cdots \quad X_{kk}\right] \quad (3.4)$$

$$[Y]=[X]\times[\beta] \quad (3.5)$$

É importante ter em conta que, caso algum valor deste vector não exista, é colocado um zero em vez de eliminar a linha, caso assim não fosse, a multiplicação da matriz de [X] pela matriz [$\beta$] seria impossibilitada, devido às dimensões das matrizes não serem concordantes. O número de linhas do vector [X] depende da dimensão da sub-amostra.

Para organizar a matriz [$\beta$] pela ordem correcta criou-se uma *função* 'inp_model', exposta no anexo B, que consiste em duas partes. A primeira parte da *função* 'inp_model' desenvolve-se enquanto os valores da coluna C são iguais a 1, ou seja, para importar os coeficientes de efeito individual, $\beta_i$. A segunda parte desenvolve-se quando os valores da coluna C são diferentes de 1, ou seja, para os valores do coeficiente de efeito conjunto, $\beta_{ij}$

1. Na primeira parte é definida a variável correspondente ao índice *i* de $\beta_i$ e a coluna B é percorrida (ciclos 'for'), nas linhas em que a coluna C é igual a 1, à procura dessa variável. Se essa variável for encontrada, o valor da coluna A da linha correspondente é copiado para a posição correcta do vector modelo [M]. Caso não exista essa variável é colocado um zero nessa linha do vector modelo [M].

2. Na segunda parte da *função* 'inp_model' o processo é em todo semelhante, são fixadas as duas variáveis correspondentes aos índices *i* e *j* de $\beta_{ij}$ e, posteriormente, as colunas B e C são percorridas (novamente através de ciclos for) à procura dessas variáveis em simultâneo na mesma linha, em duas fases, por exemplo, é procurada a combinação $X_1$ $X_2$ e de seguida $X_2$ $X_1$. Se essas variáveis forem encontradas o valor da linha correspondente da coluna A é importado para a posição correcta do vector modelo [M]. Uma vez que é frequente eliminar ou acrescentar erradamente um caracter no processo manual de adaptação do modelo em bruto (Quadro 3.1) para o modelo de input (Quadro 3.2) foi criada uma verificação de erro que consiste em comparar o somatório dos valores do modelo importado [M] com o modelo em Excel® (Quadro 3.2). Caso os somatórios sejam diferentes significa que um ou mais valores não foram importados. Na prática, este aviso de erro ocorre não só quando existem erros no input do modelo mas também quando são perdidos algarismos significativos no processo de input, sendo mostrado um falso aviso, que deve ser sempre verificado. De cada vez que a função 'inp_model' é executada é importado um vector modelo [M] para a matriz transformação [$\beta$], ficando uma coluna maior.

Os intervalos de aceitação para as variáveis de resposta podem ser valores absolutos, mas é frequente, principalmente nos limites da resistência à compressão, estabelecer limites em relação ao desempenho da composição alvo, por exemplo, ±5 MPa. Caso os limites sejam relativos na linha Absoluto/Relativo deve constar "relativo": Nesse caso procede-se a uma correcção dos vectores limites das variáveis de resposta, num ciclo ('if'). Nos casos em que a linha absoluto/relativo coincide com "relativo", corrigem-se os limites $R^{sup}$ e $R^{inf}$ pelo valor correspondente à soma do valor resposta da composição alvo, $Y^{alvo}$ adicionada do valor da linha $R^{sup}$, no caso de $R^{inf}$; e reduzida do valor $R^{inf}$, no caso de $R^{inf}$. No exemplo do Quadro 3.3, $R_4^{sup}$ é igual a 1 enquanto $R_5^{sup}$ é igual a $Y_5^{alvo}$ adicionado de 5.

Quadro 3.3. – Exemplo de Input dos intervalos de aceitação para as variáveis de resposta

| | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ | $Y_5$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Absoluto/Relativo | absoluto | absoluto | absoluto | absoluto | relativo |
| $R^{sup}$ | 710 | 15 | 12 | 1 | 5 |
| $R^{inf}$ | 650 | -12 | 8 | 0,8 | 5 |

### 3.2.3. Sub-Amostra de Misturas Fictícias

A técnica estatística Bootstrap referida em 2.3.1 consiste na selecção aleatória de linhas da matriz de desvios de produção, $[\Delta_{bs}X]$. Esta selecção é feita com reposição, podendo um desvio ser seleccionado mais do que uma vez, uma vez, ou não ser seleccionado. Estes desvios são obtidos através da função 'bootstrp' e o número de desvios é definido pelo utilizador (tamanho da 'sub-amostra'), estes desvios adicionados à composição alvo, formam a população da sub-amostra, $[X_{bs}]$, ver Eq. 3.6.

$$[X_{bs}] = [X^{alvo}] + [\Delta_{bs} X] \tag{3.6}$$

Para cada elemento (linha) desta população é prevista a resposta [Y], através dos modelos numéricos, pelo produto matricial $[X_{bs}]\times[\beta]$, como referido em Eq(3.5). A quantidade total de elementos desta população cujas variáveis de resposta previstas [Y] respeitam todos os limites de aceitação impostos para as variáveis de resposta ($R^{sup}$ e $R^{inf}$), dividido do número de elementos da população é tida como a taxa de sucesso da sub-amostra, $f_i$, ver Eq. 3.7.

$$[f_i] = \frac{\bigcap_{a=1}^{b} R_{inf}^{a} < Y_a < R_{sup}^{a}}{número\ de\ elementos\ da\ sub-amostra\ \ i} \tag{3.7}$$

Onde, *b* é número de variáveis de resposta; *i* é o número da linha do vector [f] que corresponde à i-ésima amostra.

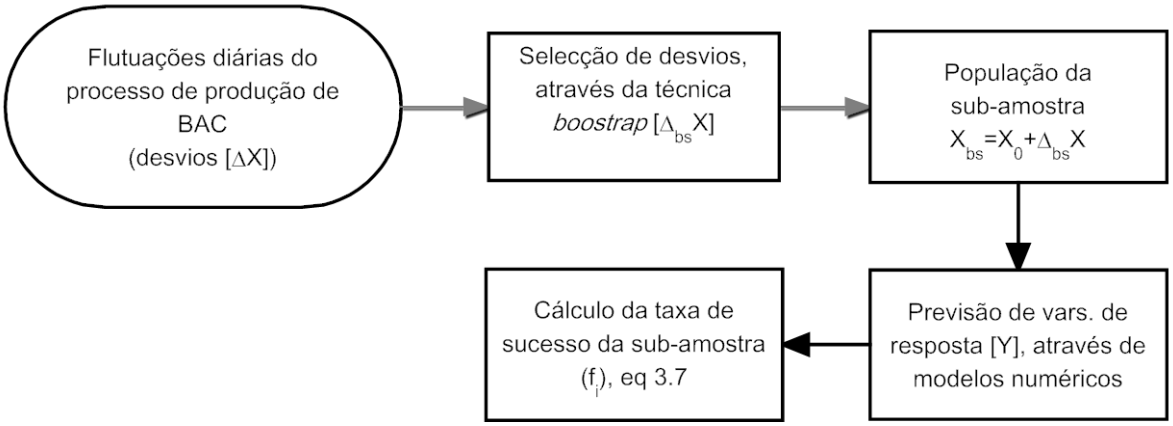


Fig. 3.3. - Determinação da taxa de sucesso de uma sub-amostra

### 3.2.4. Medida de Robustez

O processo ilustrado na Fig. 3.3 é repetido um número de vezes definido pelo utilizador (número de sub-amostras) e a média das taxas de sucesso de todas as sub-amostras é tida como a medida de robustez da mistura, para uma determinada unidade de fabrico (ver Fig. 3.4).

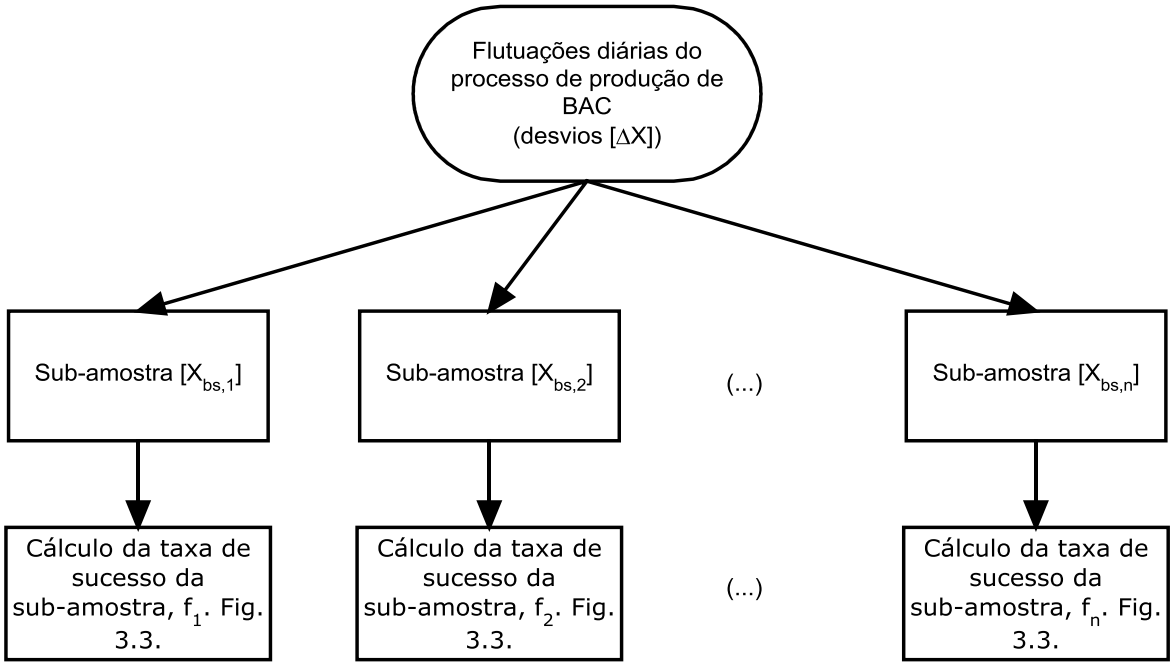


Fig. 3.4. - Determinação dos n elementos do vector taxa de sucesso, f.

O vector [f] é construído à medida que sucedem os ciclos " for" de 1 até n, a cada ciclo uma nova linha é criada em [f]. Ao mesmo tempo que são determinadas as taxas de sucesso das sub-amostras, é também determinada a taxa de sucesso marginal de cada variável de resposta para essa sub-amostra ($f^a$), através da equação (3.4):

$$\left[ f_i^{\,a} \right] = \frac{R_{inf}^{a} < Y_i < R_{sup}^{a}}{número\, de\, elementos\, da\, sub-amostra\, i} \tag{3.4}$$

O somatório das taxas de sucesso marginais de cada amostra dividida do número de sub-amostras representa a medida de robustez marginal, ou seja, a frequência de sucesso da variável de resposta $P_a$. Isto permite fazer uma análise da influência de cada variável de resposta na medida de robustez global, P.

### 3.2.5. Output

Os resultados deste *script* apresentam uma análise estatística discreta do vector [f], que inclui a média, mediana, moda, desvio padrão de média, mínimo, máximo, desvio padrão, percentil 2.5% e percentil 97.5%, que são exportados para o Excel® através da função xlswrite. Um exemplo da tabela de *output* pode ser visto no Quadro 3.4.

Quadro 3.4. – Exemplo do *output* do *script*

| | $P_1$ | $P_2$ | $P_3$ | $P_4$ | p |
|---|---|---|---|---|---|
| Mean(f) | 0,86 | 0,99 | 0,88 | 1,00 | 0,76 |
| Median | 0,87 | 1 | 0,88 | 1 | 0,76 |
| Mode | 0,88 | 1 | 0,88 | 1 | 0,76 |
| Std. error of mean | 0,015 | 0,004 | 0,014 | 0,002 | 0,019 |
| Min | 0,75 | 0,94 | 0,74 | 0,98 | 0,6 |
| Max | 0,98 | 1 | 0,99 | 1 | 0,88 |
| Std. Deviation | 0,0341 | 0,008 | 0,032 | 0,004 | 0,043 |
| Perc 2,5% | 0,80 | 0,97 | 0,82 | 0,99 | 0,67 |
| Perc 97,5% | 0,93 | 1 | 0,94 | 1 | 0,84 |

Onde, $P_a$ se refere à medida de robustez marginal da variável de resposta $Y_a$ e P refere-se à medida de robustez global.

## 3.3. Validação do *Script*

### 3.3.1. Âmbito do Projecto

No âmbito do projecto POCI/ECM/61649/2004 – "*Uma Abordagem Científica no Dimensionamento de Composições de Betão para Promover a Sustentabilidade na Construção"* a metodologia LABEST/FEUP de análise da robustez foi empregue com o objectivo validar a metodologia de avaliação da robustez desenvolvida no LABEST/FEUP e de concluir quanto à aplicabilidade da metodologia como meio para optimizar misturas de BAC, (Nunes 2008).

A validação da metodologia foi efectuada por comparação da medida de robustez com a sensibilidade dos parâmetros do BAC no estado fresco, ou seja, a análise de robustez segundo (BIBM 2005). A optimização do BAC resulta de uma optimização numérica, com a finalidade de obter composições económicas, mantendo a auto-compactabilidade.

Neste estudo foram desenvolvidos modelos numéricos de previsão dos resultados dos ensaios do BAC, nomeadamente, no ensaio de espalhamento ($D_{esp}$ e $t_{500}$), no ensaio de escoamento no funil V (tfunil), o ensaio na caixa L (H2/H1), em função dos seguintes parâmetros da mistura:

- a razão água/cimento, em massa ($X_1$=w/c);
- a razão superplastificante/finos, em massa ($X_2=S_p/p$);
- a razão volumétrica água/finos ($X_3=V_w/V_p$);
- a razão volumétrica areia/ argamassa ($X_4=V_s/V_m$);
- a razão $areia_1$/areias, em massa ($X_5=s_1/s$);
- e o volume sólido ($X_6=V_g/V_{g,lim}$).

### 3.3.2. Modelos Numéricos

O modelo ajustado para $t_{500}$ revelou-se pouco fiável, como tal, esse parâmetro foi ignorado na análise de robustez. Os modelos ajustados para cada uma das propriedades analisadas encontram-se no Quadro 3.5. As variáveis de resposta consideradas foram:

- Desp - diâmetro de espalhamento ($Y_1$), obtido segundo NP EN 12350-8 (IPQ 2010) que caracteriza a fluidez e a velocidade de escoamento do BAC na ausência de obstruções. O betão fresco é vertido para dentro de um cone como no ensaio de abaixamento da NP EN 12350-2 (IPQ 2002) quando o cone é levantado o betão espalha-se de forma aproximadamente circular, são então medidos o maior diâmetro do espalhamento do betão e o diâmetro na direcção normal a esta, sendo que, o espalhamento é a média destes valores.
- Tfunil- tempo necessário para escoar o betão no funil V ($Y_2$), obtido segundo NP EN 12350-9, (IPQ 2010). O ensaio do funil V é utilizado para avaliar a viscosidade e a capacidade de enchimento do BAC. Enche-se com betão fresco um funil em forma de V e mede-se o tempo que o betão leva a escoar do funil, que é registado como o tempo de escoamento no funil V
- H1/H2 - capacidade de passagem na caixa L ($Y_3$), obtido segundo NP EN 12350-10, (IPQ 2010). O ensaio na caixa L é utilizado para avaliar a capacidade de passagem do BAC ao escoar através de passagens apertadas, incluindo espaços entre armaduras e outras obstruções, sem segregar ou bloquear. Faz-se escoar horizontalmente um determinado volume de betão

fresco através do espaço entre armaduras verticais. Medem-se as alturas de betão na secção vertical (H1) e no fim da secção horizontal (H2). A razão H1/H2 é uma medida da capacidade de passagem ou de bloqueio do BAC.

- fc,28dias - resistência à compressão aos 28 dias ($Y_4$), obtida segundo NP EN 12390-3 (IPQ 2003). Os provetes são executados de acordo com NP EN 12390-1 (IPQ 2004) e mantidos em câmara de temperatura e humidade controlada (20ºC e H $\geq$ 95%), até ao ensaio de compressão A resistência à compressão é dada pela força máxima à rotura dividida pela área transversal.

Quadro 3.5. – Modelos ajustados (para valores $X_i$ descodificados)

| Variável de resposta | $D_{esp}$(mm) | $[Tfunil(s)]^{-0,5}$ | $[H2/H1(mm)+0,01]^{1,98}$ | fc,28d (MPa) |
|---|---|---|---|---|
| independente | -2046,86 | -1,348 | -17,258 | 51,92 |
| w/c | -2592,99 | 0,526 | 10,091 | -70,55 |
| Sp/p | 136413,62 | 35,430 | 280,451 | 13347,77 |
| Vw/Vp | -2828,56 | 0,787 | -1,446 | -1221,72 |
| Vs/Vm | 3984,79 | -1,677 | 23,340 | 1516,30 |
| s1/s | 1153,15 | 0 | 0,834 | 0 |
| Vg/Vg,lim | 0 | 5,109 | 34,245 | 185,35 |
| (w/c)x(Sp/p) | 0 | 0 | -334,389 | 0 |
| (w/c)x(Vw/Vp) | 7594,88 | 0 | -25,380 | 0 |
| (w/c)x(Vs/Vm) | 0 | 0 | 39,315 | 0 |
| (Sp/p)x(Vs/Vm) | 0 | 0 | 409,426 | 0 |
| (Sp/p)x(Vg/Vg,lim) | 8463,47 | 0 | 0 | -8076,63 |
| (Vw/Vp)x(Vs/Vm) | 14205,31 | 0 | 31,932 | 0 |
| (Vw/Vp)x(s1/s) | -5561,04 | 0 | 0 | 0 |
| (Vs/Vm)x(s1/s) | 7405,49 | 0 | 0 | 0 |
| $(Sp/p)^2$ | -3467957,63 | -880,943 | -8056,001 | -231623,05 |
| $(Vw/Vp)^2$ | | 0 | 0 | 797,51 |
| $(Vs/Vm)^2$ | -27986,02 | 0 | -90,020 | -1814,84 |
| $(Vg/Vg,lim)^2$ | -7486,77 | -5,286 | -33,987 | 0 |
| Erro residual | | | | |
| Média | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Desvio padrão | 18,89 | 0,011 | 0,055 | 1,58 |
| $R^2$ | 0,963 | 0,976 | 0,951 | 0,892 |
| $R^2_{adj}$ | 0,943 | 0,971 | 0,921 | 0,859 |

### 3.3.3. Optimização da Robustez

Foram analisados 6 critérios de optimização distintos (A a F) e 3 valores da razão água/cimento (ver Quadro 3.6). Para todas as misturas o alvo de Desp foi 680mm, o alvo do tfunil foi 10s e o alvo H2/H1≥0,83. Para cada uma das composições optimizadas foi efectuada uma análise de robustez, considerando os intervalos de aceitação apresentados no Quadro 3.7.

Quadro 3.6. – Critérios de optimização, adaptado de (Nunes 2008)

| | Critério | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Variável | A | B | C | D | E | F |
| w/c | 0,4; 0,45; 0,5 | | | | | |
| Sp/p | No intervalo | Minimizar | Minimizar | No intervalo | Maximizar | Minimizar |
| Vw/Vp | No intervalo | No intervalo | No intervalo | No intervalo | Maximizar | Maximizar |
| Vs/Vm | No intervalo | No intervalo | Maximizar | No intervalo | Maximizar | No intervalo |
| S1/s | No intervalo | No intervalo | No intervalo | No intervalo | No intervalo | No intervalo |
| Vg/Vg,lim | No intervalo | No intervalo | Maximizar | Maximizar | Maximizar | No intervalo |
| Vpasta | Minimizar | Sem limite | Sem limite | Sem limite | Sem limite | Minimizar |
| Desp | Alvo = 680mm | | | | | |
| Tfunil | Alvo = 10s | | | | | |
| H2/H1 | Encontra-se no intervalo [0,83; 1,0] | | | | | |
| O intervalo das variáveis de mistura considerado foi [-2,0; 2,0] (valor codificado do design factorial) | | | | | | |

Quadro 3.7. – Intervalos de aceitação das variáveis de resposta

| Variável de resposta | Desp | Tfunil | H2/H1 | fc,28 |
|---|---|---|---|---|
| Rsup | 710 | 12 | 1 | $Y^{alvo}$+5 |
| Rinf | 650 | 8 | 0,8 | $Y^{alvo}$-5 |

### 3.3.4. Validação do Script

A validação do *script* foi efectuada por comparação com as 3 composições obtidas com o critério de optimização F do Quadro 3.6. As condições de sub-amostragem de Bootstrap (tamanho da sub-amostra e quantidade de sub-amostragem) foram consideradas iguais, 100 e 2000, respectivamente. A comparação das medidas de robustez pode ser verificada no Quadro 3.8 a 3.10. Como é possível verificar existem pequenas diferenças nos resultados. No entanto, essas diferenças devem-se ao processo de Bootstrap em si, que tem por base a escolha aleatória de desvios. Assim, a concordância de resultados levou-nos a concluir sobre a correcta implementação da metodologia LABEST/FEUP em Matlab®.

Quadro 3.8. – Verificação do script para a composição F, com w/c=0,5

| Parâmetros de mistura | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $X_1$: w/c | 0,50 | | | | |
| $X_2$: Sp/p | 1,42% | | | | |
| $X_3$: $V_w/V_p$ | 0,756 | | | | |
| $X_4$: $V_s/V_m$ | 0,445 | | | | |
| $X_5$: $s_1/s$ | 0,442 | | | | |
| $X_6$: $V_s/V_{s,lim}$ | 0,515 | | | | |
| Metodologia LABEST/FEUP (Nunes 2008) | | | | | |
| | P1 | P2 | P3 | P4 | P |
| Robustez | 0,82 | 0,99 | 0,86 | 1,00 | 0,70 |
| Percentil 2,5% | 0,75 | 0,97 | 0,79 | 0,99 | 0,61 |
| Percentil 97,5% | 0,89 | 1,00 | 0,93 | 1,00 | 0,79 |
| Metodologia LABEST/FEUP (Aplicada em Matlab) | | | | | |
| Média | 0,82 | 0,99 | 0,86 | 1,00 | 0,70 |
| Percentil 2,5% | 0,74 | 0,97 | 0,79 | 0,99 | 0,61 |
| Percentil 97,5% | 0,89 | 1,00 | 0,92 | 1,00 | 0,79 |

Quadro 3.9. - Verificação do script para a composição F, com w/c=0,45

| Parâmetros de mistura | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $X_1$: w/c | 0,45 | | | | |
| $X_2$: Sp/p | 1,46% | | | | |
| $X_3$: $V_w/V_p$ | 0,757 | | | | |
| $X_4$: $V_s/V_m$ | 0,434 | | | | |
| $X_5$: $s_1/s$ | 0,511 | | | | |
| $X_6$: $V_s/V_{s,lim}$ | 0,507 | | | | |
| Metodologia LABEST/FEUP (Nunes 2008) | | | | | |
| | P1 | P2 | P3 | P4 | P |
| Robustez | 0,86 | 0,99 | 0,88 | 1,00 | 0,76 |
| Percentil 2,5% | 0,79 | 0,97 | 0,82 | 0,99 | 0,67 |
| Percentil 97,5% | 0,93 | 1,00 | 0,94 | 1,00 | 0,84 |
| Metodologia LABEST/FEUP (Aplicada em Matlab) | | | | | |
| Média | 0,87 | 0,99 | 0,88 | 1,00 | 0,76 |
| Percentil 2,5% | 0,80 | 0,97 | 0,82 | 0,99 | 0,68 |
| Percentil 97,5% | 0,93 | 1,00 | 0,94 | 1,00 | 0,83 |

Quadro 3.10. - Verificação do script para a composição F, com w/c=0,4

| Parâmetros de mistura | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $X_1$: w/c | 0,4 | | | | |
| $X_2$: Sp/p | 1,97% | | | | |
| $X_3$: $V_w/V_p$ | 0,794 | | | | |
| $X_4$: $V_s/V_m$ | 0,455 | | | | |
| $X_5$: $s_1/s$ | 0,487 | | | | |
| $X_6$: $V_s/V_{s,lim}$ | 0,493 | | | | |
| Metodologia LABEST/FEUP (Nunes 2008) | | | | | |
| | P1 | P2 | P3 | P4 | P |
| Robustez | 0,82 | 1,00 | 0,92 | 1,00 | 0,75 |
| Percentil 2,5% | 0,74 | 0,98 | 0,87 | 0,98 | 0,66 |
| Percentil 97,5% | 0,89 | 1,00 | 0,97 | 1,00 | 0,83 |
| Metodologia LABEST/FEUP (Aplicada em Matlab) | | | | | |
| Média | 0,82 | 0,99 | 0,92 | 1,00 | 0,75 |
| Percentil 2,5% | 0,75 | 0,98 | 0,87 | 0,98 | 0,67 |
| Percentil 97,5% | 0,89 | 1,00 | 0,97 | 1,00 | 0,83 |

## 3.4. Aplicação da Metodologia para Avaliação da Robustez de um BAC Branco

### 3.4.1. Âmbito do Estudo

No âmbito projecto FCT/PTDC/ECM/70693/2006 – "*Betão dimensionado para melhorar o desempenho nas primeiras idades e a durabilidade. Caracterização da escala nano à macro*." foi desenvolvida uma composição de betão cujas exigências de desempenho envolviam:

- auto-compactabilidade;
- cor (branco) e boa qualidade do acabamento (betão à vista);
- baixo calor de hidratação e baixa retracção, para evitar a ocorrência de fendilhação durante as primeiras idades;
- e elevada resistência à penetração de cloretos, de modo a assegurar a durabilidade da estrutura.

O estudo da composição, realizado no LABEST/FEUP, foi desenvolvido em duas fases: iniciou-se por um estudo ao nível das argamassas ao qual se seguiu um estudo ao nível do betão. O estudo ao nível das argamassas destinou-se a analisar a interacção entre os materiais constituintes da pasta, nomeadamente, cimento branco, fíler calcário, metacaulino, água e superplastificante; e a avaliar a interacção da pasta com o agregado (areia normalizada). A inclusão do metacaulino como adição para além do fíler calcário visou uma melhoria considerável da durabilidade do betão. O programa experimental foi definido segundo um plano factorial o que permitiu modelar numericamente as diversas propriedades relevantes. A composição do BAC pode ser obtida fixando a composição da pasta, obtida a partir da argamassa optimizada e substituindo a areia normalizada pelos agregados reais. No entanto, é necessário realizar alguns ensaios ao nível do betão para ajustar o conteúdo em agregados e a proporção entre eles. Os ensaios ao nível do betão foram programados segundo um plano factorial, considerando como variáveis apenas as referentes ao esqueleto sólido formado pelos agregados. No

Quadro 3.11 apresenta-se a composição final optimizada de BAC branco e as respectivas propriedades no estado fresco, durante o endurecimento e no estado endurecido.

Quadro 3.11. - Caracterização da composição optimizada de BAC branco em laboratório

| Materiais constituintes (kg/m3) | | Propriedades | |
|---|---|---|---|
| Cimento | 416 | Desp (mm) | 805 |
| Fíler calcário | 151 | Tfunil (seg) | 13,96 |
| Metacaulino | 44 | H2/H1 | 0,927 |
| Água | 184 | SR (%) | 13,90 |
| Superplastificante (V3008) | 6,10 | fc,28d (MPa) | 80,4 |
| | | Δtmáx (ºC) | 15,0 |
| Areia fina | 324 | Retrac, 90d | 345 |
| Areia grossa | 487 | Resist,28d | 219,7 |
| Brita calcária | 744 | Dcl,28d | 3,54 (equivalente a 930 Coulomb) |

As propriedades modeladas foram as abaixo descritas, excepto Desp, Tfunil, H2/H1, fc,28d que estão descritos em 3.3.2.

- SR(%) – Índice de segregação, obtido segundo NP EN 12350-1, (IPQ 2002). O ensaio da resistência à segregação no peneiro é utilizado para avaliar a resistência do BAC à segregação. É vertida uma parte da amostra de betão fresco sobre um peneiro com aberturas quadradas de

5 mm. Após 2 min regista-se o peso do material que passou através do peneiro. A parcela segregada é então calculada como a proporção da amostra que passou através do peneiro.

- Δtmáx (ºC) – Temperatura máxima, obtida segundo (Nunes, Oliveira et al. 2011). A temperatura máxima é resultado do calor de hidratação e representa um indicador sobre a possibilidade de ocorrência de fendilhação durante a cura do betão. A temperatura máxima é na verdade uma variação da temperatura, ou seja, os ensaios decorreram a 20ºC e como tal a Δtmáx refere-se à temperatura registada reduzida de 20ºC.
- $Retrac_{,90d}$ – Retracção aos 90 dias, obtida segundo (Nunes, Oliveira et al. 2011). A retracção por secagem e autogénea é determinante na fendilhação durante a cura do betão. A avaliação da retracção determinou-se pela variação de comprimento de provetes cilíndricos. A $Retrac_{,90d}$ é então dada pela deformação registada ao fim de 90 dias, em *microstrain*s ($10^{-6}$).
- Resist,28d - A resistividade eléctrica aos 28 dias obtida segundo (Nunes, Oliveira et al. 2011). A resistividade está intrinsecamente relacionada com a porosidade e conectividade entre os poros do betão saturado (Lubeck 2008), sendo um indicador da durabilidade do betão. A técnica de medição da resistividade utiliza dois eléctrodos posicionados em duas faces opostas e planas do provete saturado, por meio dos quais é aplicada uma corrente eléctrica e medida a diferença de potencial resultante. Aplicando a Lei de Ohm, a relação entre a corrente aplicada e a tensão medida dá-nos a resistência eléctrica do material. A resistividade, ρ[Ω.m] é obtida multiplicando-se a resistência por uma constante geométrica que depende das dimensões do provete e dos eléctrodos utilizados
- Dcl - coeficiente de difusão dos cloretos, obtido segundo (Nunes, Oliveira et al. 2011). A determinação da resistência à penetração de cloretos foi realizada através de um ensaio de migração em regime não estacionário designado por método rápido CTH, LNEC E 463 (2004). Simplificadamente o ensaio consiste em aplicar uma corrente eléctrica ao provete quando numa face se encontra NaCl e na outra NaOH forçando os iões $Cl^-$ a migrar. A medição da profundidade de penetração dos cloretos (xd) é efectuada através de um processo colorimétrico. Uma relação teórica entre os fenómenos de difusão e migração, permite determinar o coeficiente de penetração de cloretos, Dcl.

O desempenho da composição de betão final optimizada, referida no (

Quadro **3.11**), foi verificado numa aplicação à escala real, em ambiente de obra. Este betão foi produzido na central da Unibetão, na Maia, e aplicado na "Ilha Ecológica" do Porto de Recreio, em Leixões (ver Fig. 3.5 e Fig. 3.6). Aquando da betonagem o betão foi caracterizado no estado fresco, recorrendo aos ensaios de espalhamento e fluidez e foram recolhidos diversos provetes para uma caracterização mais alargada do betão no estado endurecido.

Fig. 3.5. – Estrutura a betonar: (a) parede de forma complexa; (b) densidade de armadura na parede

Fig. 3.6. - (a) e (b) Aspecto final do Porto de Recreio onde foi aplicado o BAC branco (parede curva do elemento)

Durante a aplicação à escala real do BAC observou-se alguma variação em termos do comportamento no estado fresco. O primeiro fornecimento do BAC branco apresentou sinais de segregação, o segundo fornecimento apresentou-se demasiado viscoso devido ao tempo de espera entre betonagens e apenas o último fornecimento apresentou características semelhantes às observadas em laboratório.

A Fig. 3.7 refere-se ao primeiro fornecimento. Na Fig. 3.7 (a) é possível observar alguma segregação do agregado grosso, e no ensaio de espalhamento (Fig. 3.7 (b)) observa-se a separação da pasta no bordo exterior da área de espalhamento, o que é um indicador da ocorrência de segregação. Ao realizar o ensaio de fluidez observou-se o bloqueio dos agregados na boca de saída do funil devido ao assentamento dos agregados grossos, (Fig. 3.8(b)). Na segunda amassadura ocorreu o contrário, o betão apresentou elevada viscosidade, sendo necessário efectuar alguma vibração mecânica do betão para assegurar o completo preenchimento do molde (ver Fig. 3.8 (a) e Fig. 3.9 (a)). Estas variações evidenciam a importância da robustez das misturas de BAC. No entanto, apesar destas dificuldades esta aplicação evidenciou as inúmeras vantagens do uso da tecnologia do BAC, decorrentes da eliminação da necessidade de vibração.

Fig. 3.7. – Primeira amassadura: (a) escoamento do BAC; (b) Ensaio de espalhamento do BAC

Fig. 3.8. – Segunda amassadura: (a) Colocação do betão com vibração; (b) ensaio de funil V.

Fig. 3.9. – (a) e (b) pormenores do escoamento da segunda amassadura.

### 3.4.2. Modelos Numéricos

Neste estudo, ao contrário do apresentado na secção 3.3, não se modelaram as propriedades relevantes do betão em função da totalidade dos parâmetros da mistura. No estudo ao nível do betão a composição da pasta manteve-se inalterada e apenas se alteraram os parâmetros da mistura relacionados com os agregados. Os modelos mais completos, em termos da quantidade de parâmetros da mistura envolvidos, foram obtidos ao nível da argamassa (incluindo areia normalizada). Desta forma, a avaliação da robustez aqui será efectuada considerando apenas as variações na pasta recorrendo para tal aos modelos ajustados ao nível da argamassa.

As variáveis de mistura consideradas neste estudo foram: a razão volumétrica água/finos ($X_1=V_w/V_p$); a razão água/cimento, em massa ($X_2$=w/c); a razão superplastificante/finos, em massa ($X_3=S_p/p$); a razão metacaulino/cimento, em massa ($X_4$=mtk/c); e a razão volumétrica areia/ argamassa ($X_5=V_s/V_m$). Os modelos ajustados para cada uma das propriedades analisadas encontram-se no Quadro 3.12 e Quadro 3.13. As variáveis de resposta consideradas foram:

- diâmetro de espalhamento ($Y_1$);
- tempo necessário para escoar a argamassa no funil V ($Y_2$);
- resistência à compressão aos 28 dias ($Y_3$):
- resistividade aos 28 dias ($Y_4$);
- carga total passada aplicando uma diferença de potencial de 30V durante 24h ($Y_5$);
- coeficiente de difusão aos cloretos ($Y_6$);
- retracção observada aos 7 dias de idade ($Y_7$)
- a temperatura máxima Tmáx ($Y_8$).

Quadro 3.12. – Modelos ajustados

| Variável de resposta | $D_{esp}$(mm) | $[Tfunil(s)]^{-0,5}$ | fc,28d(MPa) | Log10(Resist,28d) |
|---|---|---|---|---|
| independente | -6855,50 | -13,075 | -3017,63 | 5,022 |
| Vw/Vp | -358,54 | -3,284 | 226,56 | 5,450 |
| w/c | 3037,07 | 0,380 | -128,89 | -20,307 |
| Sp/p | 1103750,00 | 2240,191 | 752165,9 | -287,216 |
| Vs/Vm | 12733,33 | 31,755 | 1974,19 | 0,873 |
| mtk/c | -7876,90 | -14,480 | 168,80 | -1,417 |
| Vw/Vp * Vs/Vm | 0 | 0 | -563,08 | 0 |
| Vw/Vp * mtk/c | 3979,17 | 0 | 0 | 0 |
| w/c * Vs/Vm | 7000,00 | 0 | 0 | 0 |
| w/c * mtk/c | 12750,00 | 16,46748 | 0 | -12,563 |
| Sp/p * Vs/Vm | -2287500,00 | -4868,98 | 0 | 0 |
| Sp/p * mtk/c | 0 | | 0 | 2709,308 |
| Vs/Vm * mtk/c | 0 | 14,359 | 0 | 0 |
| $(Vw/Vp)^2$ | 0 | 2,248 | 0 | -3,140 |
| $(w/c)^2$ | -7621,43 | 0 | 0 | 23,336 |
| $(Sp/p)^2$ | 0 | 0 | -5,4E+07 | 0 |
| $(Vs/Vm)^2$ | 0 | 0 | -1665,45 | 0 |
| $(mtk/c)^2$ | 0 | -10,374 | -753,24 | -31,235 |
| Erro residual | | | | |
| Média | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Desvio padrão | 8,03 | 0,014 | 1,374 | 0,0136 |
| $R^2$ | 0.959 | 0.935 | 0.652 | 0.9853 |
| $R^2_{adj}$ | 0.9748 | 0.969 | 0.817 | 0.9927 |

Quadro 3.13. – Modelos ajustados

| Variável de resposta | Log10(Coulombs) | Log10(Dcl) | Sh7d | T_Max |
|---|---|---|---|---|
| independente | -1,482 | 40,667 | -27672,1 | 216,94 |
| Vw/Vp | 0,184 | 3,252 | 15133,7 | 9,36 |
| w/c | 24,722 | 24,719 | -2413,22 | -482,07 |
| Sp/p | 0 | -13442,1 | 4101056 | -28526,5 |
| Vs/Vm | -0,552 | 0 | 34268,41 | -32,12 |
| mtk/c | -8,151 | -0,521 | -4034,04 | 154,29 |
| Vw/Vp * w/c | 0 | -9,731 | 0 | 0 |
| Vw/Vp * Sp/p | 0 | 0 | -2057222 | 0 |
| Vw/Vp * Vs/Vm | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Vw/Vp * mtk/c | 0 | 9,629 | 0 | 0 |
| w/c * Sp/p | 0 | 0 | 0 | 69649,87 |
| w/c * Vs/Vm | 0 | 0 | 0 | 0 |
| w/c * mtk/c | 0 | 25,620 | 26811,11 | -413,61 |
| Sp/p * Vs/Vm | 0 | 0 | -4916667 | 0 |
| Sp/p * mtk/c | 0 | -4065,07 | 0 | 0 |
| Vs/Vm * mtk/c | 0 | 0 | -15285,2 | 0 |
| $(Vw/Vp)^2$ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $(w/c)^2$ | -26,691 | -17,750 | 0 | 0 |
| $(Sp/p)^2$ | 0 | 984208,1 | 0 | 0 |
| $(Vs/Vm)^2$ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $(mtk/c)^2$ | 7,995 | 12,770 | 0 | 0 |
| Erro residual | | | | |
| Média | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Desvio padrão | 0,0195 | 0,0191 | 13,237 | 0,328 |
| $R^2$ | 0.9825 | 0.9782 | 0.8683 | 0.8677 |
| $R^2_{adj}$ | 0.9869 | 0.9885 | 0.9107 | 0.9067 |

### 3.4.3. Desvios da Produção

Tendo em vista a avaliação da robustez da composição de BAC branco foram solicitados à Unibetão os registos das composições teóricas e reais durante toda a produção para a aplicação à escala real no Porto de Leixões. Da análise destes registos verificou-se que a composição teórica utilizada pela Unibetão sofreu um ajuste relativamente à composição ajustada no laboratório da FEUP. Logo, neste trabalho serão considerados os desvios da composição relativamente à composição teórica do LABEST/FEUP (Quadro 3.14) e os desvios relativos à composição teórica da Unibetão (Quadro 3.15). De entre os desvios observados nos diversos parâmetros da mistura usaram-se apenas os relativos aos parâmetros que definem a pasta: $X_1=V_w/V_p$, $X_2$=w/c, $X_3$=Sp/p e $X_4$=mtk/c, descritos em 3.4.2.

Quadro 3.14. – Desvios totais (relativamente à composição teórica da FEUP)

| Desvios | $\Delta X_1$ | $\Delta X_2$ | $\Delta X_3$ | $\Delta X_4$ | $\Delta X_5$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 9,36E-03 | 5,14E-03 | -1,53E-05 | 7,69E-04 | 0 |
| 2 | 7,94E-02 | 4,07E-02 | -2,71E-05 | 9,55E-05 | 0 |
| 3 | 6,04E-02 | 3,21E-02 | -5,45E-05 | 7,69E-04 | 0 |
| 4 | -2,30E-02 | -1,07E-02 | -3,28E-05 | 9,39E-04 | 0 |
| 5 | 5,12E-02 | 2,76E-02 | -4,08E-05 | 7,69E-04 | 0 |
| 6 | 1,06E-01 | 5,51E-02 | 1,13E-04 | 8,33E-04 | 0 |
| 7 | 7,94E-02 | 4,16E-02 | -1,92E-05 | 7,39E-04 | 0 |

Quadro 3.15. – Desvios de produção (relativamente à composição teóricada Unibetão)

| Desvios | $\Delta X_1$ | $\Delta X_2$ | $\Delta X_3$ | $\Delta X_4$ | $\Delta X_5$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -1,22E-02 | -6,57E-03 | 2,17E-06 | 0,00E+00 | 0 |
| 2 | 2,57E-02 | 1,24E-02 | -5,32E-06 | -6,74E-04 | 0 |
| 3 | 7,24E-03 | 4,26E-03 | -3,81E-05 | 0,00E+00 | 0 |
| 4 | -5,77E-03 | -2,47E-03 | -1,64E-05 | 1,70E-04 | 0 |
| 5 | -7,67E-04 | 4,15E-04 | -2,45E-05 | 0,00E+00 | 0 |
| 6 | 4,66E-04 | 5,59E-04 | 1,29E-04 | 6,36E-05 | 0 |
| 7 | -3,55E-04 | 6,38E-05 | -1,91E-06 | -2,99E-05 | 0 |

### 3.4.4. Intervalos de Aceitação e Estimativa da Robustez

Os intervalos de aceitação considerados para cada variável de resposta foram determinados a partir do valor de cada variável de resposta para a composição optimizada ($Y^{alvo}$) e do valor do erro experimental (desvio padrão ($\sigma$)) associado a cada ensaio. Tal como se indica no Quadro 3.16, avaliou-se a robustez para diferentes intervalos de aceitação, obtidos a partir de $R_{sup}=(Y^{alvo}+n\ \sigma)$; $R_{inf}=(Y^{alvo}-n\ \sigma)$ com n=1,2 e 3.

Quadro 3.16. – Intervalos de aceitação considerados para as variáveis de resposta $R_{sup}$ e $R_{inf}$.

| | | $D_{esp}$ | $T_{funil}$ | $f_{c,28d}$ | $Resist_{28\ d}$ | Q30V | $D_{cl}$ | Retrac,7 | Tmáx |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $Y_1$ | $Y_2$ | $Y_3$ | $Y_4$ | $Y_5$ | $Y_6$ | $Y_7$ | $Y_8$ |
| | Unidades | mm | s | MPa | kΩ.cm | Coulomb | $X10^{-12}m^2/s$ | $x10^{-6}$ | ºC |
| $R_{sup}$ | +3σ | 292,39 | 11,40 | 93,07 | 213,64 | 2460,53 | 3,27 | 592,36 | 9,59 |
| | +2σ | 281,30 | 10,97 | 89,28 | 211,19 | 2371,02 | 3,22 | 572,86 | 9,35 |
| | +1σ | 270,21 | 10,53 | 85,49 | 208,74 | 2281,51 | 3,17 | 553,36 | 9,11 |
| | $Y^{alvo}$ | 259,12 | 10,10 | 81,69 | 206,29 | 2192,00 | 3,11 | 533,86 | 8,87 |
| $R_{inf}$ | -1σ | 248,03 | 9,67 | 77,90 | 203,84 | 2102,49 | 3,06 | 514,36 | 8,63 |
| | -2σ | 236,94 | 9,24 | 74,10 | 201,39 | 2012,98 | 3,01 | 494,86 | 8,40 |
| | -3σ | 225,86 | 8,80 | 70,31 | 198,94 | 1923,47 | 2,95 | 475,36 | 8,16 |

As medidas de robustez, marginais e total, obtidas na situação em que se consideram os desvios em relação à composição teórica da Unibetão, são representados na Fig. 3.10 e Quadro 3.19, esta é a situação mais favorável. Os resultados obtidos com os desvios em relação à composição optimizada da FEUP, são representados na Fig. 3.11 e Quadro 3.20.

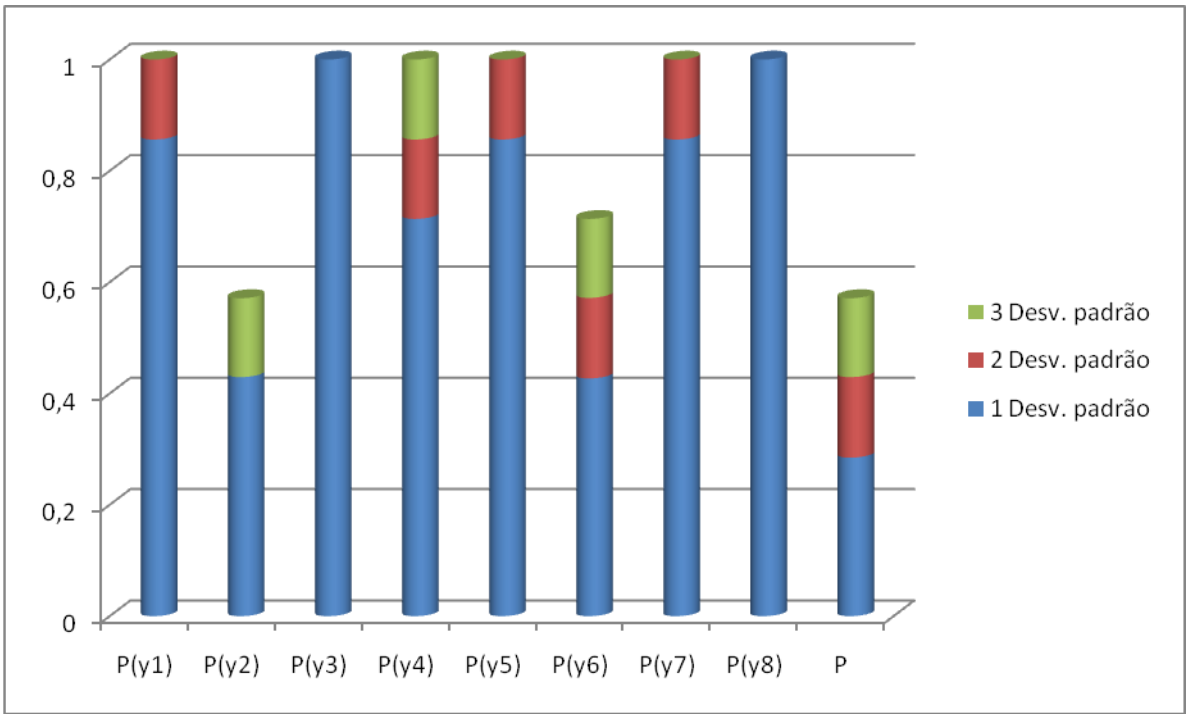


Fig. 3.10. - Medidas de robustez para os desvios em relação à composição teórica da Unibetão, considerando os diferentes intervalos de aceitação

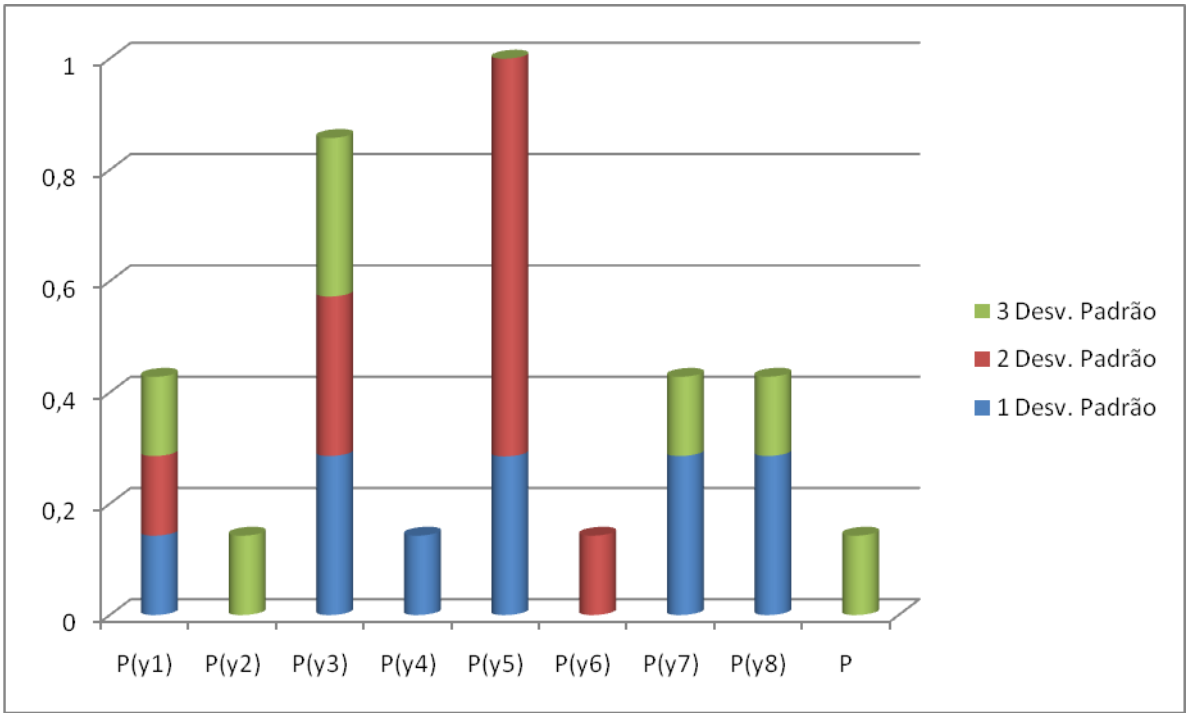


Fig. 3.11. - Medidas de robustez para os desvios em relação à composição teórica da FEUP considerando os diferentes intervalos de aceitação

É possível identificar uma clara limitação da medida de robustez pelos parâmetros $Y_2$ e $Y_6$, Tfunil(s) e Dcl, respectivamente. Estas são as propriedades mais sensíveis a desvios na mistura.

Os resultados obtidos considerando os desvios relativos à composição da Unibetão, com limites iguais a 3 desvios padrão acima e abaixo do desempenho alvo, estão dispostos no Quadro 3.17. Os resultados obtidos considerando os desvios relativos à composição da FEUP, com limites iguais a 3 desvios padrão acima e abaixo do desempenho alvo, estão dispostos no Quadro 3.18.

Quadro 3.17. – Medidas de robustez para limites iguais a 3 desvios padrão dos desvios de produção, em relação à composição alvo da Unibetão

| | P(y1) | P(y2) | P(y3) | P(y4) | P(y5) | P(y6) | P(y7) | P(y8) | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Média | 1,00 | 0,57 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,71 | 1,00 | 1,00 | 0,57 |
| Mediana | 1,00 | 0,57 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,71 | 1,00 | 1,00 | 0,57 |
| Moda | 1,00 | 0,57 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,71 | 1,00 | 1,00 | 0,57 |
| Desv. P. Med. | 0,000 | 0,022 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,020 | 0,000 | 0,000 | 0,022 |
| Mínimo | 1,00 | 0,38 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,53 | 1,00 | 1,00 | 0,38 |
| Máximo | 1,00 | 0,72 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,86 | 1,00 | 1,00 | 0,72 |
| Desvio Padrão | 0,000 | 0,050 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,045 | 0,000 | 0,000 | 0,050 |
| Perc. 2,5% | 1,00 | 0,47 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,63 | 1,00 | 1,00 | 0,47 |
| Perc. 97,5% | 1,00 | 0,66 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,80 | 1,00 | 1,00 | 0,66 |

Quadro 3.18. – Medidas de robustez para limites iguais a 3 desvio padrão dos desvios totais, em relação à composição alvo da FEUP

| | P(y1) | P(y2) | P(y3) | P(y4) | P(y5) | P(y6) | P(y7) | P(y8) | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Média | 0,43 | 0,14 | 0,86 | 0,14 | 1,00 | 0,14 | 0,43 | 0,43 | 0,14 |
| Mediana | 0,43 | 0,14 | 0,86 | 0,14 | 1,00 | 0,14 | 0,43 | 0,43 | 0,14 |
| Moda | 0,43 | 0,14 | 0,85 | 0,14 | 1,00 | 0,14 | 0,43 | 0,41 | 0,14 |
| Desv. P. Med. | 0,022 | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,000 | 0,016 | 0,022 | 0,022 | 0,016 |
| Mínimo | 0,26 | 0,04 | 0,73 | 0,04 | 1,00 | 0,04 | 0,26 | 0,26 | 0,04 |
| Máximo | 0,6 | 0,29 | 0,97 | 0,29 | 1,00 | 0,29 | 0,6 | 0,62 | 0,29 |
| Desvio Padrão | 0,051 | 0,035 | 0,035 | 0,034 | 0,000 | 0,034 | 0,050 | 0,050 | 0,035 |
| Perc. 2,5% | 0,33 | 0,08 | 0,78 | 0,08 | 1,00 | 0,08 | 0,33 | 0,33 | 0,08 |
| Perc. 97,5% | 0,53 | 0,22 | 0,92 | 0,22 | 1,00 | 0,22 | 0,53 | 0,52 | 0,22 |

É de salientar que, se for considerada a composição teórica da Unibetão como referência (ver Quadro 3.19) e os intervalos de aceitação iguais a 2 desvios padrão, apenas 3 medidas de robustez marginal não atingiram os 100%

Quadro 3.19. – Aumento da robustez com a largura do intervalo de aceitação, em relação à composição alvo da Unibetão

| | P(y1) | P(y2) | P(y3) | P(y4) | P(y5) | P(y6) | P(y7) | P(y8) | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $1\sigma$ | 0,86 | 0,4 | 1 | 0,71 | 0,86 | 0,43 | 0,86 | 1 | 0,28 |
| $2\sigma$ | 1 | 0,43 | 1 | 0,86 | 1 | 0,57 | 1 | 1 | 0,43 |
| $3\sigma$ | 1 | 0,57 | 1 | 1 | 1 | 0,71 | 1 | 1 | 0,57 |

Quadro 3.20. – Aumento da robustez com a largura do intervalo de aceitação, em relação à composição alvo da FEUP

| | P(y1) | P(y2) | P(y3) | P(y4) | P(y5) | P(y6) | P(y7) | P(y8) | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $1\sigma$ | 0,15 | 0 | 0,29 | 0,14 | 0,29 | 0 | 0,29 | 0,29 | 0 |
| $2\sigma$ | 0,308 | 0 | 0,57 | 0,14 | 1 | 0,14 | 0,29 | 0,29 | 0 |
| $3\sigma$ | 0,43 | 0,15 | 0,86 | 0,14 | 1 | 0,14 | 0,43 | 0,43 | 0,14 |

# 4
# INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E TEMPO NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DA PASTA DE CIMENTO

## 4.1. Introdução

O programa experimental aqui descrito surge na sequência do Capítulo 3, tendo em vista a avaliação da influência da temperatura desde a amassadura até ao momento da betonagem na robustez da composição analisada. Como forma de compreender a evolução e dependência das propriedades da pasta de cimento relativamente à temperatura foram efectuados ensaios reométricos, ensaios de resistividade e ensaios de resistência.

Durante o transporte das misturas de betão-pronto para o local de construção, factores como o tráfego, a distância até ao local de construção e atrasos na colocação estão normalmente associados a perdas de trabalhabilidade. A perda de trabalhabilidade é uma das principais consequências que decorre da produção de betão em climas quentes, podendo criar diversos problemas incluindo dificuldade de colocação e compactação resultando em elevado volume de vazios, baixa resistência mecânica e baixa durabilidade (Al-Martini 2009). Existem algumas soluções possíveis para ultrapassar este problema, entre elas, a possibilidade de recorrer a adjuvantes, o recurso a estas soluções deve ter em atenção o seu possível efeito na retracção plástica e consequente fendilhação (Soroka and Ravina 1998). Segundo (Diawara 2008) o tempo que decorre desde a adição da água ao cimento até ao início da betonagem varia entre 30 a 90 minutos, estes tempos devem ser reduzidos no caso de climas quentes.

O betão auto-compactável requer especial atenção no método de mistura e transporte devido ao seu baixo teor de água relativamente ao elevado teor de materiais cimentícios. Vários investigadores notaram que a duração do período de mistura e o momento em que se adiciona o superplastificante ao BAC pode influenciar tanto as propriedades no estado fresco como no estado endurecido (Diawara 2008). Devido à elevada fluidez, o volume de BAC colocado no camião misturador não deve exceder 80% da sua capacidade total. Esta limitação destina-se a prevenir que o BAC seja expelido durante o transporte.

Em geral, ocorre uma redução do diâmetro de espalhamento quando a água de mistura, adsorvida na superfície das partículas de cimento, é consumida pelas reacções de hidratação ou por evaporação (Diawara 2008). Isto conduz a uma perda de consistência do betão no estado fresco com o tempo. Para que isso não aconteça a quantidade da água de mistura requerida aumenta. Este efeito é atribuído à aceleração da hidratação do cimento (Soroka and Ravina 1998). A perda no diâmetro de espalhamento

pode causar um aumento no teor de ar, perda de resistência e durabilidade; dificuldade em bombear e colocar; e um esforço excessivo nas operações de colocação e de acabamentos.

Para ultrapassar a redução do diâmetro de espalhamento, são geralmente praticados dois métodos: um deles consiste em começar com um diâmetro de espalhamento superior ao requerido, o outro consiste em adicionar água extra ou adjuvantes um pouco antes da betonagem, designado de retemperamento (Diawara 2008). O aumento progressivo da variedade e poder de dispersão dos adjuvantes na indústria do betão têm facilitado o controlo da perda de espalhamento. Em particular, diversos superplastificantes têm sido desenvolvidos com a finalidade de melhorar a dispersão e conservar a trabalhabilidade ao longo do tempo.

O aumento de água é indesejável uma vez que aumenta o rácio w/c e afecta adversamente as propriedades do betão reduzindo a resistência mecânica e a durabilidade (Al-Martini 2009). Aumentar a quantidade de cimento para obter o rácio w/c requerido é também indesejável (Diawara 2008), uma vez que aumenta o custo envolvido e o aumento da retracção por secagem do betão, aumentando o risco de fendilhação. Como tal, para evitar efeitos indesejáveis pode ser vantajoso recorrer a agentes redutores de água (Soroka and Ravina 1998). Segundo (Al-Martini 2009) ficou provado que os superplastificantes melhoram as propriedades reológicas do betão, mesmo em condições de elevadas temperaturas.

Pretende-se com este programa experimental determinar ao fim de quanto tempo ocorre uma variação significativa da trabalhabilidade das pastas, em função da temperatura ambiente. Com esse objectivo, a pasta da mistura apresentada no Capítulo 3, foi ensaiada a diferentes temperaturas, nomeadamente, 10, 23, 33 e 39ºC. Os ensaios de caracterização reológica foram realizados ao longo do tempo, de forma a reflectir a influência do intervalo de tempo que decorre desde a adição de água ao cimento até ao momento da betonagem, considerando todas as possibilidades de atraso referidas.

Os ensaios aqui descritos, realizados durante o mês de Maio de 2011 no LABEST/FEUP, tiveram como finalidade contribuir para a evolução de conhecimento acerca da robustez do BAC perante variações de temperatura, tentando dar um contributo para a melhoria de práticas correntes durante a fase de desenvolvimento, produção, transporte e colocação do betão.

## 4.2. Procedimento Experimental

Os estudos em pastas assentam na hipótese de que o betão no estado fresco é composto por partículas (agregados) em suspensão numa fase líquida, sendo que o seu comportamento reológico é fortemente determinado pela fase líquida. Neste contexto a fase líquida é a pasta, constituída pelas partículas do cimento, fíler, metacaulino, a água e o superplastificante. Como tal, é na pasta que ocorrem muitos dos fenómenos que afectam a reologia do betão, nomeadamente, a floculação de partículas coloidais, dispersão originada pelo superplastificante, formação de bolhas de ar, adsorção de água na superfície das partículas, etc. É, então, adequado proceder a medições em pastas quando o objectivo é determinar a influência desses parâmetros na reologia do betão; apesar de não haver uma correlação directa conhecida entre os parâmetros avaliados em pastas e os parâmetros reológicos avaliados no betão, como verificado em (Al-Martini 2009).

Para que a pasta de cimento flua, a tensão de cedência ($\sigma_0$) tem que ser ultrapassada. A viscosidade ($\eta$) pode ser fisicamente definida como a resistência ao movimento. Em particular, a viscosidade plástica ($\eta_{pl}$) é definida pelo declive da recta da curva de escoamento de acordo com o modelo Bingham descrito em 2.4.3.

### 4.2.1. Materiais, Composição e Procedimento de Amassadura

Os materiais utilizados nos ensaios em pastas foram os materiais constituintes do betão utilizado, no estudo FEUP/LABEST no âmbito do projecto FCT/PTDC/ECM/70693/2006 – "*Betão dimensionado para melhorar o desempenho nas primeiras idades e a durabilidade. Caracterização da escala nano à macro.*". A composição utilizada consistiu em 415,92kg/m$^3$ de CEM II/A-L 52,5 N (Br), 150,58kg/m$^3$ de fíler calcário, 184,48kg/m$^3$ de água destilada e 6,10 kg/m$^3$ de Viscorete 3008 da Sika. Para cada ensaio preparou-se uma amassadura com 1,1 l de volume. Os materiais constituintes da pasta utilizada foram recolhidos do mesmo fornecimento, mantiveram-se inalterados e as suas proporções constantes em todos os ensaios realizados, A massa volúmica do CEM II/A-L 52,5 N (Br), do fíler calcário e do metacaulino são, respectivamente, 3040kg/m$^3$, 2680kg/m$^3$ e 2200kg/m$^3$ e o peso específico do superplastificante baseado em policarboxilatos modificados Viscorete 3008 é 1,07kg/m$^3$.

Existem diversas formas de efectuar a mistura das pastas de forma eficaz, é de resto possível verificar que maior parte dos autores utilizam o seu próprio método de mistura, que em função do equipamento utilizado, do volume de amostra e tipo (betão, argamassa, pasta) garanta uma perfeita homogeneização da amostra. A Fig. 4.1 ilustra o procedimento de amassadura que consiste numa primeira mistura dos finos com 80% de água (400ml) seguidamente o superplastificante é diluído na restante quantidade de água e adicionado à mistura, continuando o procedimento de mistura. A mistura foi efectuada numa misturadora de pastas/argamassas e a limpeza das paredes foi executada com o auxílio de uma espátula.

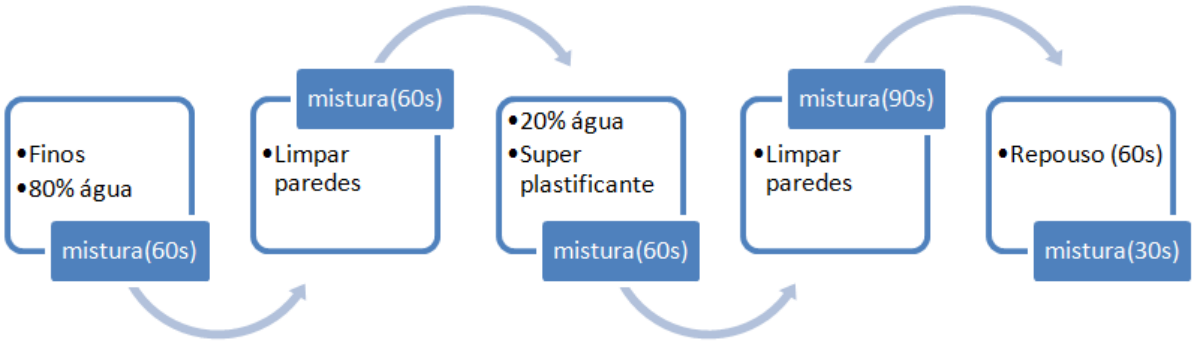


Fig. 4.1. – Procedimento de amassadura

### 4.2.3. Ensaio Reológico

Para o presente trabalho de caracterização reológica foi utilizado um reómetro rotacional da Bohlin CVO-100, ver Fig. 4.2. Os testes reológicos foram efectuados usando o método prato/cone, o cone utilizado possui um ângulo $\alpha$=1º, um diâmetro d=50mm e é truncado de modo a garantir um "gap" de 150µm, ver Fig. 4.3. Sob o prato existe uma câmara cheia de fluído para manter a temperatura da amostra, sendo a temperatura do fluído controlada à custa de um sistema "Peltier".

Fig. 4.2. – Reómetro rotacional CVO-100

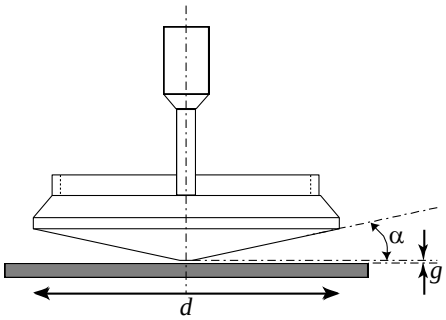


Fig. 4.3. - Características do sistema cone/prato usado nos ensaios.

O ensaio reométrico levado a cabo no reómetro rotacional Bohlin CVO-100, controlado de forma automática, em modo de controlo da taxa de deformação, permite obter valores da tensão aplicada que é necessária para obter uma dada taxa de deformação. Aos resultados podem ser ajustados vários modelos reológicos (ex. Newtoniano, Bingham, Herchel-Bulkley, Caisson, Bingham modificado, Sisko, e Williamson). O modelo de Bingham, descrito em 2.4.3., foi utilizado para caracterizar as propriedades relógicas da pasta de cimento, i.e. obter o valor da tensão cedência e da viscosidade plástica. Como é sabido, as propriedades reológicas calculadas podem variar dependendo do modelo reológico utilizado.

#### 4.2.3.1. Metodologia de Ensaio

Os ensaios de caracterização reológica foram iniciados com um pré-condicionamento que quebra a estrutura interna da pasta de cimento, destinado a criar condições iniciais de ensaio uniformes. Este pré-condicionamento consistiu na aplicação de uma taxa de deformação de 200 $s^{-1}$ durante 45 s, ver Fig. 4.5, seguidos de 100 s em repouso. Para efectuar as medições dos pares de valores (tensão aplicada, taxa de deformação) a taxa de deformação evoluiu de (0 $s^{-1}$) a (200 $s^{-1}$), de forma logaritmica, por 12 patamares, para produzir a curva ascendente, ver Fig. 4.4, e em seguida esta foi reduzida de (200 $s^{-1}$) a (0 $s^{-1}$), de igual forma, produzindo a curva descendente. A 200 $s^{-1}$ ocorre a quebra da sua estrutura, logo, a curva descendente não seguirá o mesmo caminho que a curva ascendente. Este procedimento permite a produção de um 'hysteresis loop', ver Fig. 4.4, cuja área é um parâmetro representante da tixotropia da pasta da cimento (Saak 2000).

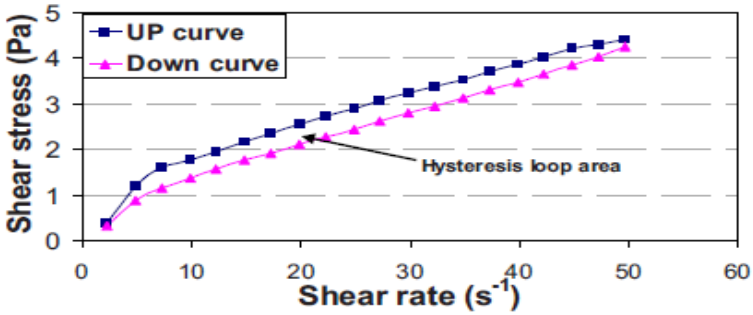


Fig. 4.4. – Hysteresis loop, (Al-Martini and Nehdi 2009)

Em cada patamar de taxa de deformação constante existe um tempo de espera, em que não é gravada informação durante esse período, definido por 10s, o valor médio da tensão aplicada é medido na fase final do patamar, fase de integração, em que ocorre gravação de informação, durante um período de tempo definido por 5 segundos (Fig. 4.5).

O modelo teórico escolhido para ajuste dos dados foi o modelo de Bingham pela sua simplicidade (reduzido número de parâmetros de ajustamento). No entanto, existem autores que sugerem modelos mais complexos, segundo (Nunes 2008). Apenas os pontos correspondentes a um comportamento pseudoplástico na parte da curva descendente foram considerados para o referido ajuste. Em certos casos foi necessário remover os últimos pontos correspondentes às taxas de deformação mais elevadas. Segundo (Al Martini, S. and Nehdi, M., 2009), a curva descendente é melhor aproximação à equação Bingham do que a curva ascendente

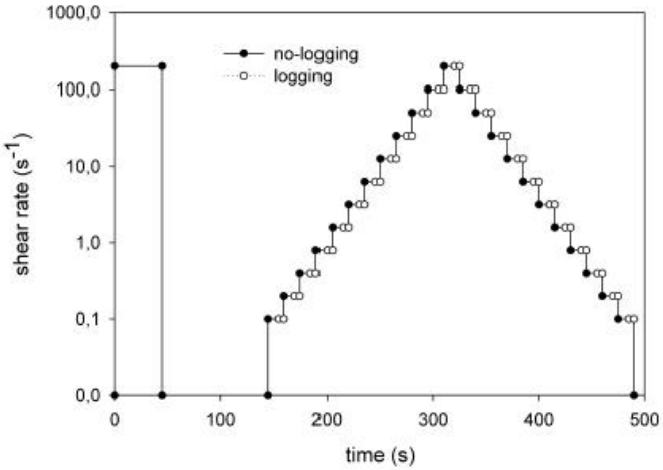


Fig. 4.5. – Sequência de teste: pré-condicionamento, repouso, medições por patamares (Nunes 2008)

### 4.2.4. Ensaio de Resistividade

A resistividade eléctrica é a propriedade que caracteriza a dificuldade com que as cargas eléctricas se movimentam no betão. O fluxo de carga eléctrica no betão ocorre essencialmente pelos iões existentes na água que ocupa os poros interligados do betão, sendo muito sensível ao teor de humidade e à

temperatura do mesmo, está intrinsecamente relacionada com a porosidade e conectividade entre os poros do betão saturado. (Lubeck 2008) e FCT/PTDC/ECM/70693/2006

No presente trabalho a técnica de ensaio da resistividade utilizada foi a mesma utilizada em FCT/PTDC/ECM/70693/2006, consiste em fazer passar a corrente por dois eléctrodos colocados na extremidade do provete, medindo-se a diferença de potencial, ver Fig. 4.6, o *set up* experimental pode ser visto em Fig. 4.7.

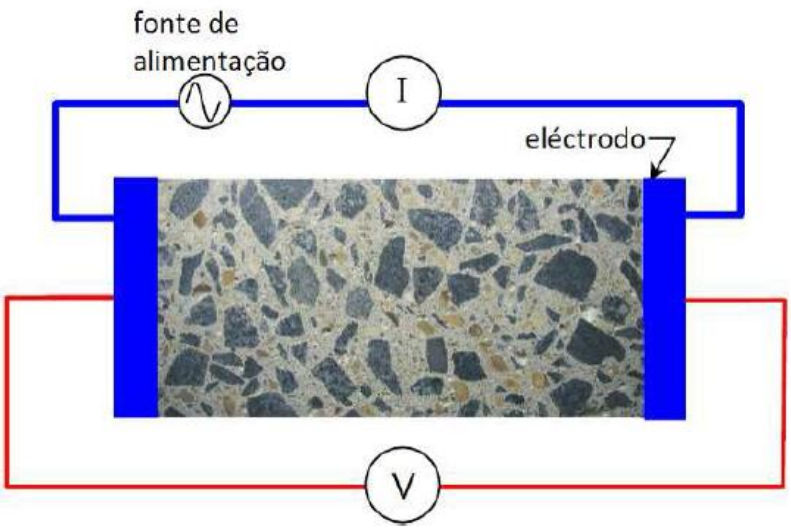


Fig. 4.6. – Representação esquemática do método utilizado da resistividade, FCT/PTDC/ECM/70693/2006

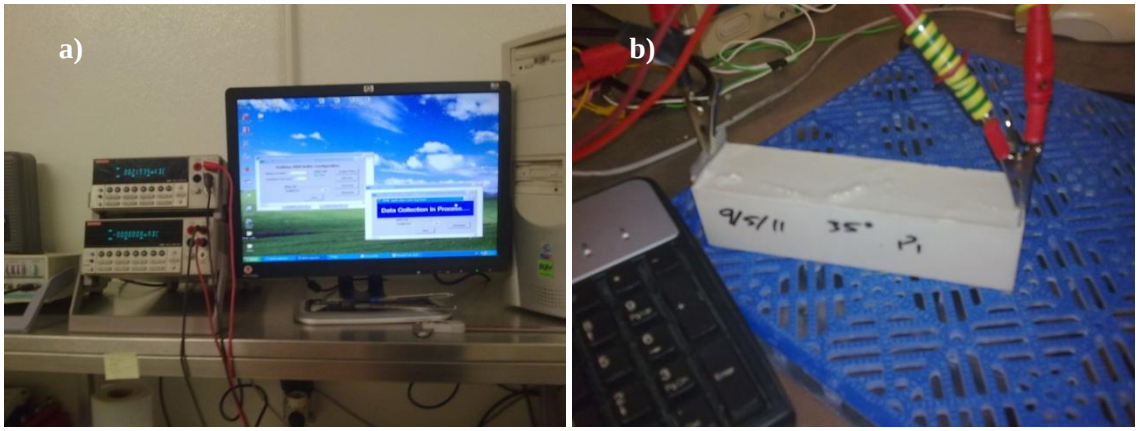


Fig. 4.7. – Set up experimental do ensaio da resistividade [(a)-dispositivos de medição e registo;(b)-detalhe de conexão ao provete]

Aplicando-se a lei de Ohm é possível obter a resistividade ($\rho$), como demonstrado na eq (4.1)

$$R = \frac{V}{I} \Leftrightarrow R = \rho \cdot \left(\frac{L}{A}\right) \Leftrightarrow \rho = \frac{V \cdot A}{L \cdot I} \tag{4.1}$$

Onde R é a resistência eléctrica ($\Omega$), I a intensidade de corrente (A), V a diferença de potencial (V), $\rho$ a resistividade eléctrica ($\Omega$.m), L o comprimento do provete (m) e A a área do eléctrodo que está em contacto com o provete ($m^2$).

Foram inseridas redes de aço inox nas extremidades dos provetes utilizados, com as dimensões de 4x4x16 ($cm^3$), que funcionaram como eléctrodos, Fig. 4.8. A pasta foi colocada nos moldes logo após o procedimento de mistura, a descofragem ocorreu a 1 dia de idade e posteriormente foram colocados dentro de agua, numa câmara de temperatura controlada a (20ºC).

Segundo FCT/PTDC/ECM/70693/2006, a comparação da resistividade de provetes em iguais condições de humidade e temperatura, permite inferir quanto à quantidade e interconectividade dos poros da matriz cimentícia.

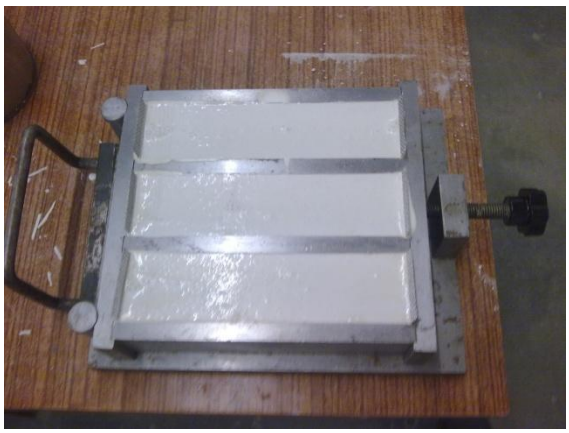

Fig. 4.8. – Moldes dos provetes

### 4.2.5. Ensaio de Resistência à Tracção e Compressão

Os ensaios de resistência foram efectuados na pensa hidráulica Instron 300 disponível no LABEST, pelo mesmo procedimento seguido em FCT/PTDC/ECM/70693/2006. Os ensaios realizaram-se com controlo de deformação, à velocidade de 0,01 mm/s, os dados foram adquiridos a uma frequência de 10 vezes por segundo.

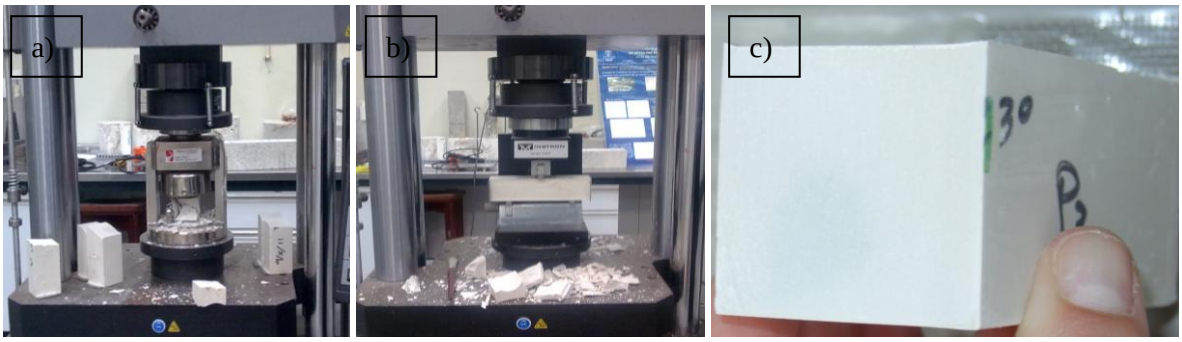


Fig. 4.9. – (a) Provete durante o ensaio de rotura à compressão; (b) Provete durante o ensaio de rotura à flexão; (c) Metade do provete inicial, resultante da rotura por flexão

O ensaio de flexão, foi efectuado com uma carga a meio vão, onde a tensão da fibra inferior foi determinada, $f_{fl}$ e o espaçamento entre os apoios foi de 100 mm, ver Fig. 4.9 (b), após a rotura obtiveram-se dois paralelepípedos que foram ensaiados à compressão simples, ver Fig. 4.9 (a).

Os ensaios foram realizados em 3 provetes para cada temperatura de condicionamento, 10, 23, 35, 45ºC, ou seja 3 ensaios de flexão e 6 à compressão. Dos resultados obtidos foi considerada a média.

### 4.2.2. Programa Experimental

No Quadro 4.1, resumem-se as condições adoptadas para os diversos ensaios realizados no âmbito do presente trabalho. Em geral, os materiais constituintes (com excepção do superplastificante) foram pesados e acondicionados à temperatura pretendida sensivelmente 12 h antes do inicio da amassadura, neste estudo pretendia-se estudar o comportamento das pastas à temperatura de 10ºC, ambiente (~23ºC), 35ºC e 45ºC. No entanto, no caso das temperaturas mais elevadas (35ºC e 45ºC) verificou-se que antes de cada ensaio a temperatura medida na pasta era inferior à temperatura fixada para o ambiente da estufa (ver os casos dos ensaios C a F no Quadro 4.1). Nesta sequência aumentou-se a temperatura da estufa de modo a obter uma temperatura na pasta próxima da pretendida. Com a estufa a 45ºC mediu-se na pasta uma temperatura de 33ºC, próxima dos 35ºC pretendidos; e com a estufa a 70ºC obteve-se na pasta 39 a 40ºC. Ou seja, não se testaram pastas conservadas a uma temperatura máxima de 45ºC, como inicialmente previsto, mas apenas a 40ºC.

Quadro 4.1. – Temperatura dos constituintes a diferentes fases do ensaio

| Ensaio | A | B | C | D | E | F |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Temperatura de acondicionamento dos materiais constituintes [ºC] | 10 | 23 | 35 | 45 | 45 | 45 |
| Temperatura de conservação após a amassadura [ºC] | 10 | 23 | 35 | 45 | 70 | 70 |
| Temperatura média da pasta antes do ensaio [ºC] | 10 | 23 | 31 | 33 | 40 | 39 |
| Temperatura no reómetro (durante o ensaio) [ºC] | 10 | 23 | 35 | 23 | 23 | 30 |

Para combater a redução de temperatura ocorrida durante a amassadura da pasta no ensaio D, procurou compensar-se essas perdas colocando a mistura na estufa a 70ºC enquanto decorriam os ensaios no reómetro, nos ensaios procedentes, E e F. Dessa forma conseguiu-se elevar a temperatura da pasta para as temperaturas apresentadas no Quadro 4.2.

Quadro 4.2. – Evolução da temperatura durante o ensaio F

| Ensaio F | Tempo | Temperatura [ºC] |
|---|---|---|
| | 00:00:00 | 45 |
| 1º | 00:12:00 | 36 |
| 2º | 00:25:56 | 39,6 |
| 3º | 00:38:25 | 42,4 |

Daqui percebe-se a influência do período de mistura na temperatura que levou a uma redução na temperatura da pasta de 9ºC, dado que a amassadura foi realizada à temperatura ambiente. Idealmente a amassadura deveria ser realizada numa câmara num ambiente à temperatura desejada. A perda de temperatura ocorrida durante a amassadura não foi ainda mais acentuada porque as reacções de hidratação fazem com que após a adição da água ao cimento haja um aumento rápido da temperatura (a pasta encontrava-se a 41ºC antes da adição da água e passou para 45ºC ao fim de 1 min de amassadura), tal como se pode observar na Fig. 2.15, que descreve a taxa de evolução do calor de hidratação no período inicial da hidratação (Saak 2000).

Outro aspecto que exigiu particular atenção na realização destes ensaios foi a temperatura, à qual a amostra foi mantida no reómetro, durante o período do ensaio. Nos ensaios C e E a diferença de temperatura entre a pasta no início do ensaio e a temperatura no reómetro conduziu a que ocorresse uma variação significativa das características reológicas da pasta durante o próprio ensaio, registando-se uma diferença acentuada entre a curva ascendente e descendente. Este efeito, ocorreu no ensaio C, onde a temperatura do reómetro (35ºC) se situava acima da temperatura da pasta (31ºC), associado a este facto, observou-se um aumento da viscosidade aparente na curva descendente (Fig. 4.10). Este crescimento gradual ao longo do ensaio poderá ser resultado do aumento da quantidade de partículas de cimento hidratadas potenciado pelo crescimento da velocidade das reacções de hidratação. Tal como é possível observar a partir da Fig. 4.10, para a taxa de deformação mais baixa a diferença entre a curva ascendente e descendente ultrapassa os 300%.

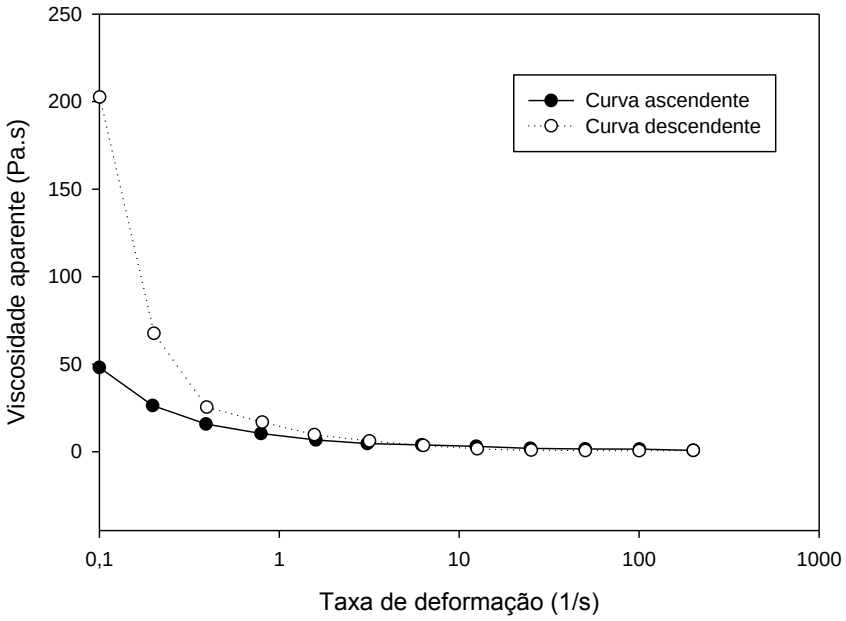


Fig. 4.10. – Análise da curva descendente do ensaio C aos 60 minutos

No ensaio E, onde a temperatura do reómetro (23ºC) foi inferior à temperatura da pasta (40ºC), ocorreu o efeito inverso, ou seja, uma redução da viscosidade aparente da curva ascendente para a curva descendente, mais acentuada para menores taxas de deformação (Fig. 4.11). Com a redução de temperatura as reacções de hidratação tornam-se mais lentas, no entanto as partículas já hidratadas assim permanecem, a redução de viscosidade aparente poderá advir da menor interacção inter-partículas, também o facto de a temperatura ser menor significa que a estrutura em flocos desfeita às mais altas taxas de deformação serão mais lentas a refazer-se.

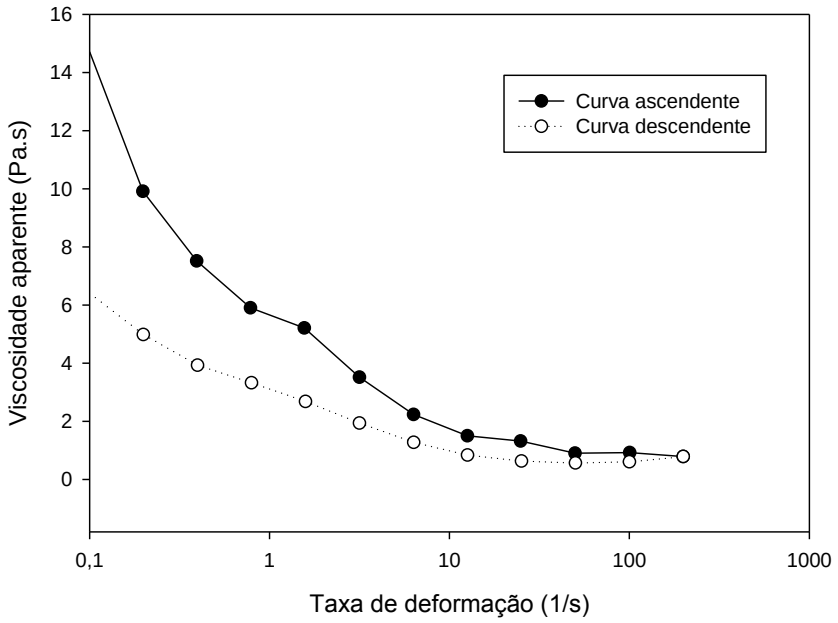


Fig. 4.11. – Análise da curva descendente do ensaio E aos 38 minutos

Ambas as situações são indesejáveis pois as alterações ocorridas durante o ensaio são significativas. De salientar que, de acordo com o procedimento adoptado a curva utilizada para o ajuste ao modelo de Bingham é a curva descendente, e sendo esta a curva mais alterada não representa o estado real da pasta no início do ensaio. Por este motivo, os resultados dos ensaios C e E não foram considerados para a discussão e conclusões deste estudo.

Para evitar alterações significativas da reologia da pasta durante o ensaio manteve-se a temperatura do reómetro próxima da temperatura da pasta, sendo que para temperaturas elevadas, acima de 35ºC, se considerou uma redução na ordem dos 10ºC, garantindo que para a eventualidade de ocorrer uma perda de temperatura, desde que a amostra é retirada da estufa até que é iniciado o ensaio no reómetro não se verifique uma temperatura no reómetro superior à da pasta, isto porque, as temperaturas ligeiramente superiores do reómetro demonstraram ser mais perniciosas do que ligeiramente inferiores. A Fig. 4.12, representando os resultados do ensaio F aos 23 minutos demonstra que este procedimento foi eficaz para evitar grandes diferenças entre a curva ascendente e descendente.

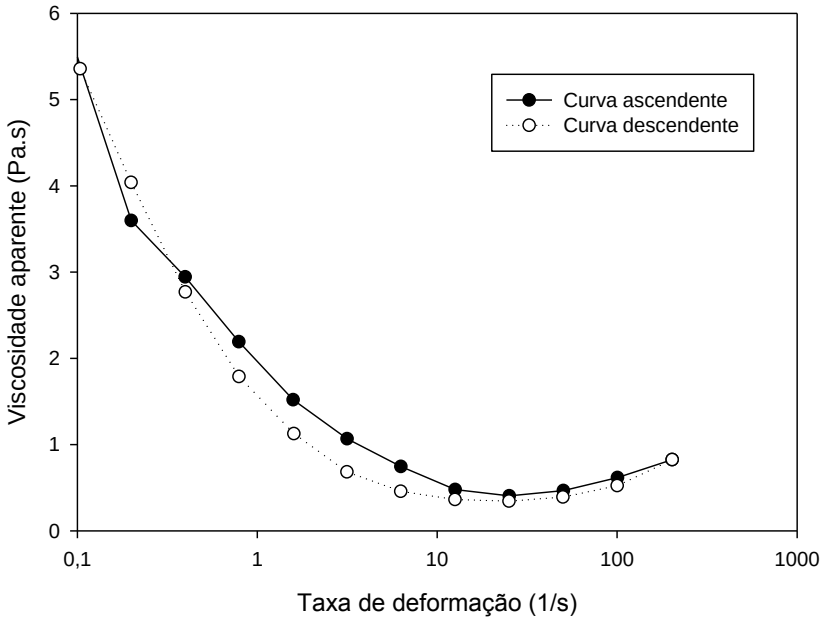


Fig. 4.12. - Análise da curva descendente do ensaio F aos 23 minutos

## 4.3. Resultados e Discussão

### 4.3.1. Efeitos Conjuntos do Tempo e da Temperatura na Viscosidade Aparente

A partir da curva de escoamento obtida no ensaio reométrico que nos fornece os pares de valores (taxa de deformação, tensão aplicada) é possível determinar a viscosidade aparente obtida através de

$$\eta = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} \tag{4.2}$$

Onde, $\sigma$ é a tensão aplicada e $\dot{\gamma}$ a taxa de deformação. Em seguida analisam-se os resultados da viscosidade aparente para cada um dos ensaios descritos em 4.2.

A viscosidade aparente do ensaio A Fig. 4.13, revelou uma evolução lenta no tempo, apenas ao fim de 315 minutos se registou uma subida significativa da viscosidade para as mais baixas taxas de deformação. É possível observar um comportamento pseudoplástico, bastante relevante, para as taxas de deformação mais baixas até cerca de 10 $s^{-1}$. No entanto para as taxas de deformação mais elevadas desenvolve um comportamento dilatante (2.4.5.). Os valores da viscosidade aparente observados a esta temperatura revelaram-se insignificantes quando comparados com os ensaios a temperaturas superiores, pelo que o único problema de auto-compactabilidade que poderá surgir a 10ºC até aos 315 minutos será o de segregação.

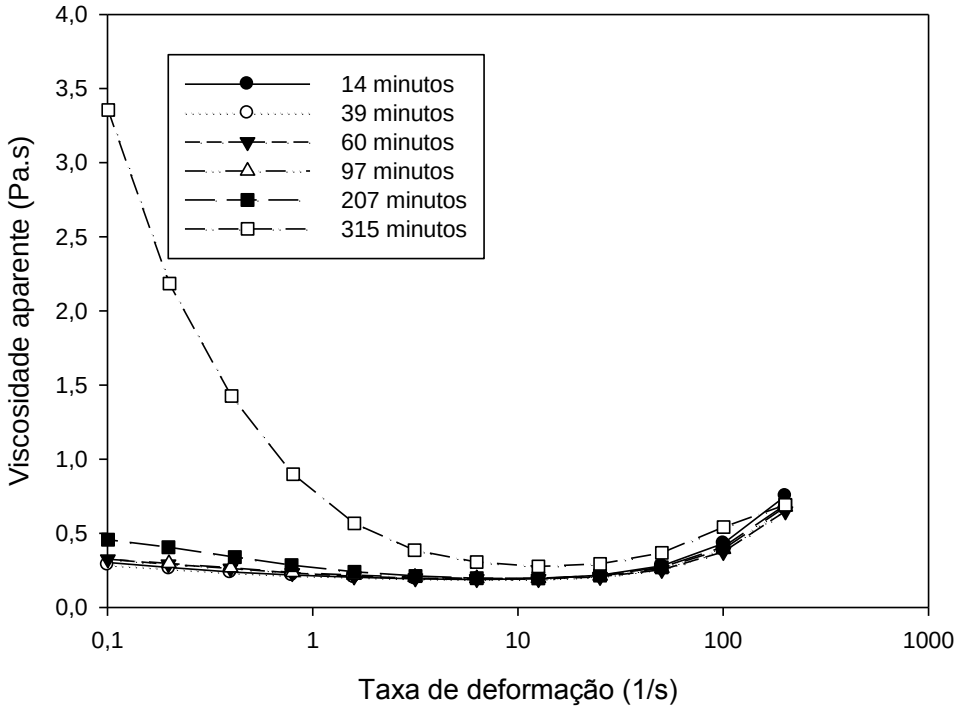


Fig. 4.13. – Evolução da viscosidade aparente do ensaio A (pasta a 10ºC), em função da taxa de deformação para diferentes idades

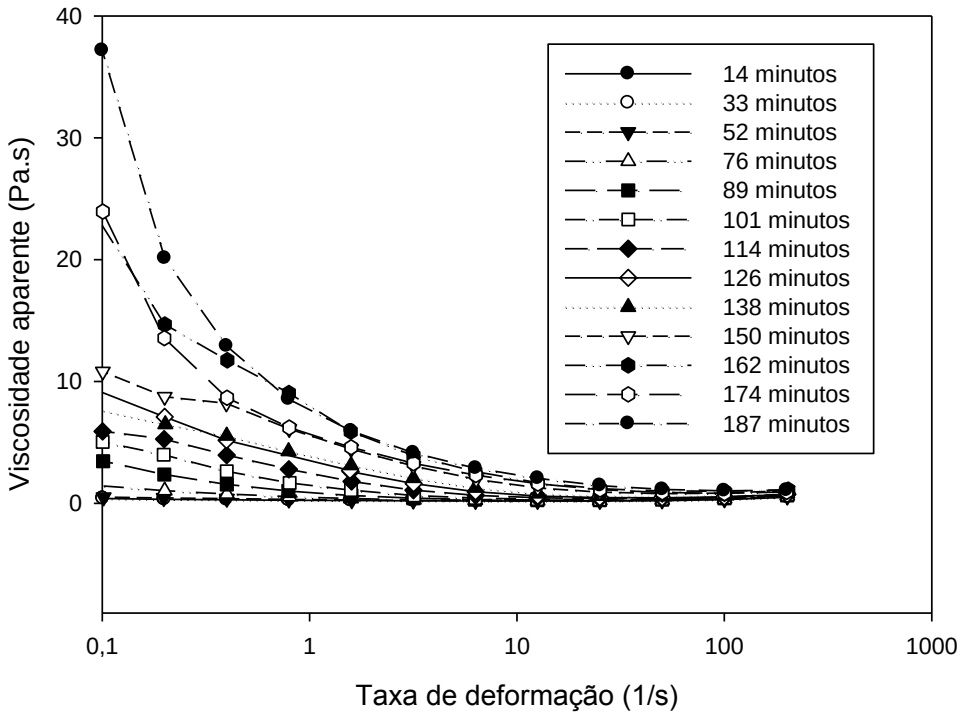


Fig. 4.14. - Evolução da viscosidade aparente do ensaio B (pasta a 23ºC), em função da taxa de deformação para diferentes idades

O ensaio B que se encontrava à temperatura ambiente de 23ºC desenvolve uma viscosidade aparente claramente superior ao registado no ensaio A. A viscosidade aparente mantém-se abaixo dos 12 Pa.s até aos 138 minutos, momento até ao qual o crescimento da viscosidade aparente foi gradual e constante; a partir dos 150 minutos a taxa de crescimento da viscosidade aparente com o tempo aumentou a um ritmo mais acelerado (Fig. 4.14). Para taxas de deformação elevadas existe um ligeiro comportamento dilatante, no entanto, a viscosidade aparente apenas cresce ligeiramente podendo afirmar-se que a pasta desenvolve um comportamento pseudoplástico em todo o seu domínio.

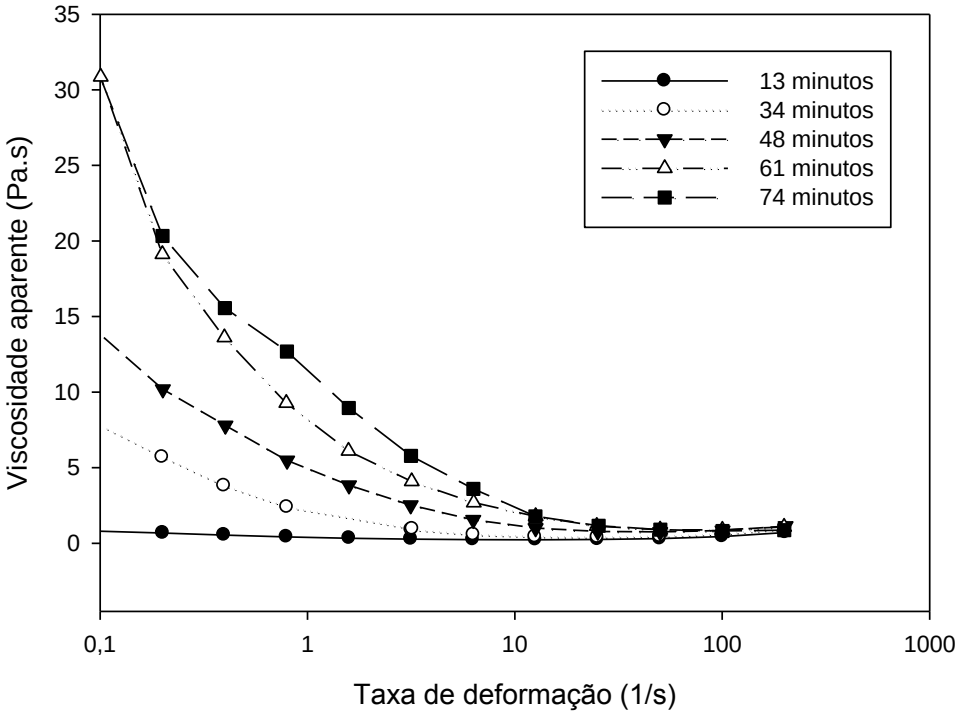


Fig. 4.15. - Evolução da viscosidade aparente do ensaio D (pasta a 33ºC), em função da taxa de deformação para diferentes idades

O ensaio D, cuja pasta se encontrava à temperatura de 33ºC, manteve a viscosidade aparente abaixo dos 15Pa.s até aos 48 minutos, a partir desse momento sofreu um grande aumento, situando-se acima dos 30Pa.s (Fig. 4.15). Novamente, foi observado um ligeiro comportamento dilatante, nas taxas de deformação mais elevadas.

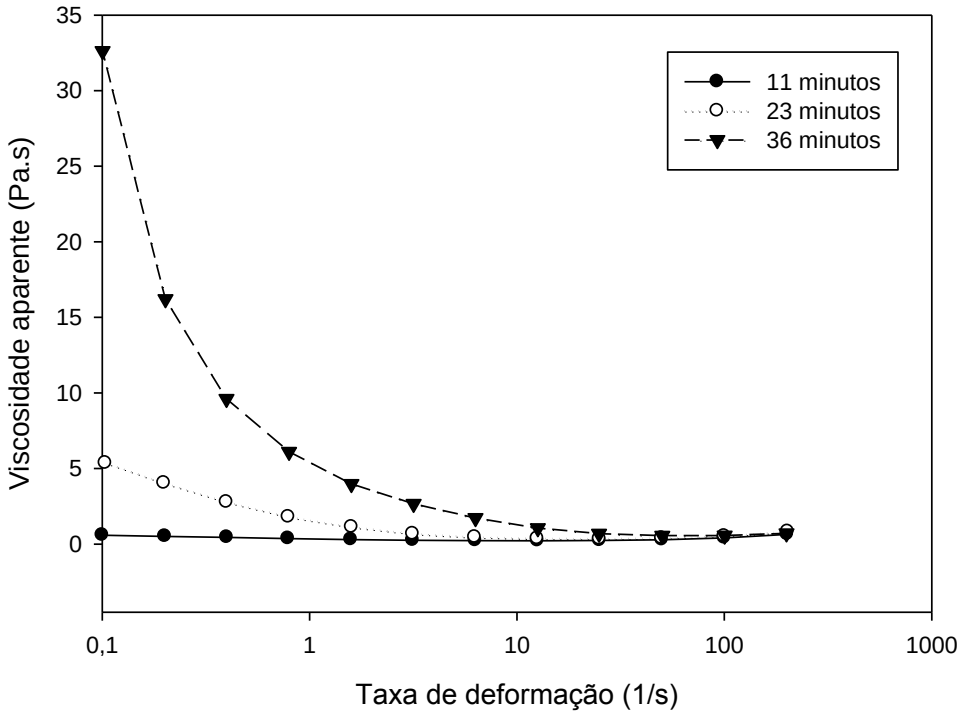


Fig. 4.16. - Evolução da viscosidade aparente do ensaio F (pasta a 39ºC), em função da taxa de deformação para diferentes idades

O ensaio F, cuja pasta se encontrava à temperatura de 39ºC, manteve a viscosidade aparente em valores próximos dos outros ensaios, o que se justifica devido à temperatura da pasta no ensaio aos 11 minutos, (Quadro 4.2) Também neste ensaio, foi observado um comportamento dilatante nas taxas de deformação mais elevadas. De notar que aos 36 minutos, já é possível identificar alguma instabilidade da curva, o que ocorre devido à evolução da estrutura da pasta de cimento.

Em suma, todas as pastas exibiram um comportamento pseudoplástico na generalidade da curva descendente, viscosidade aparente versus taxa de deformação, excepto nas taxas de deformação mais elevadas onde se registou um comportamento dilatante, nunca superior a 4 Pa.s. Este comportamento ocorre devido ao movimento desordenado de partículas a taxas de deformação muito elevadas o qual pode gerar o congestionamento das mesmas.

Os resultados obtidos estão de acordo com (Al Martini, S. and Nehdi, M., 2009), a viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de deformação, visto que, em valores de taxa de deformação baixos as forças de interacção entre partículas são predominantes sobre as forças hidrodinâmicas exercidas, logo ocorre a formação de flocos, enquanto para valores de taxa de deformação mais elevados as forças hidrodinâmicas aumentam e ultrapassam forças de interacção entre partículas levando à rotura dos flocos em partículas de menores dimensões o que leva à libertação da fase líquida bloqueada nos interstícios dos flocos, diminuindo assim a viscosidade aparente.

### 4.3.2. Viscosidade Plástica (Bingham) em Função do Tempo

Os valores de viscosidade plástica no momento de betonagem são fundamentais para que a peça betonada fique completamente homogénea, evitando segregação ou bloqueios. A evolução da viscosidade plástica (Bingham) com o tempo, para diferentes temperaturas, é aqui analisada.

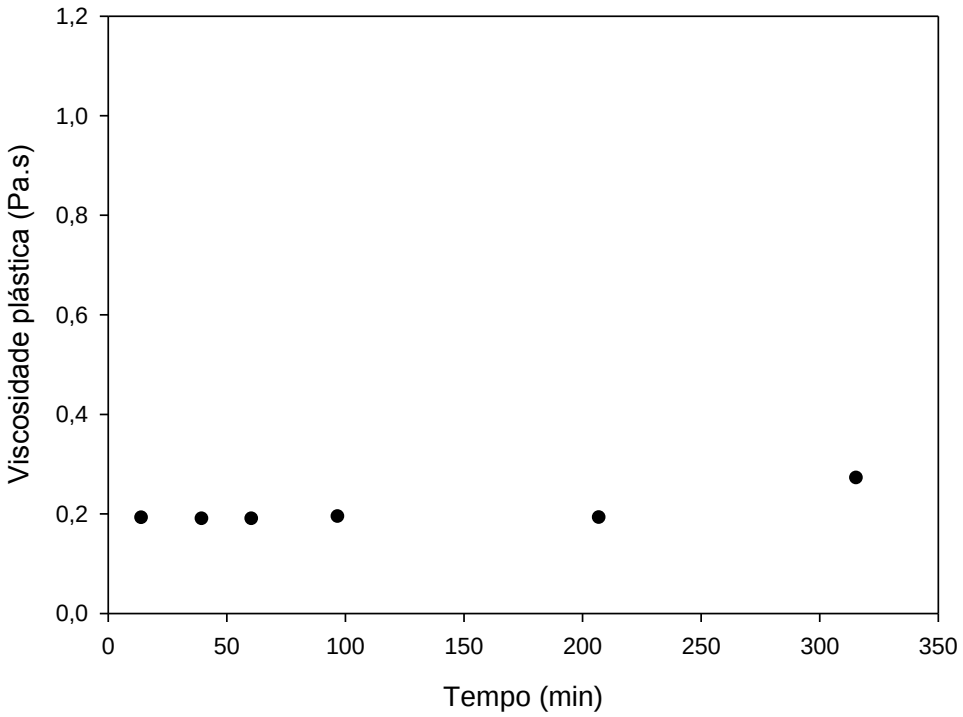


Fig. 4.17. - Evolução da viscosidade plástica do ensaio A (pasta a 10ºC) em função da idade da pasta

A viscosidade plástica da pasta a 10ºC, manteve-se a níveis muito próximos de 0,2Pa.s, não se observando uma variação significativa dos valores ao longo do tempo até aos 315 min. A viscosidade plástica da pasta mantida à temperatura ambiente evolui de forma crescente numa relação exponencial com o tempo, atingindo valores de viscosidade superiores a 1 Pa.s (Fig. 4.17) É notório que o crescimento da viscosidade plástica se torna mais acentuado a partir dos 100 minutos.

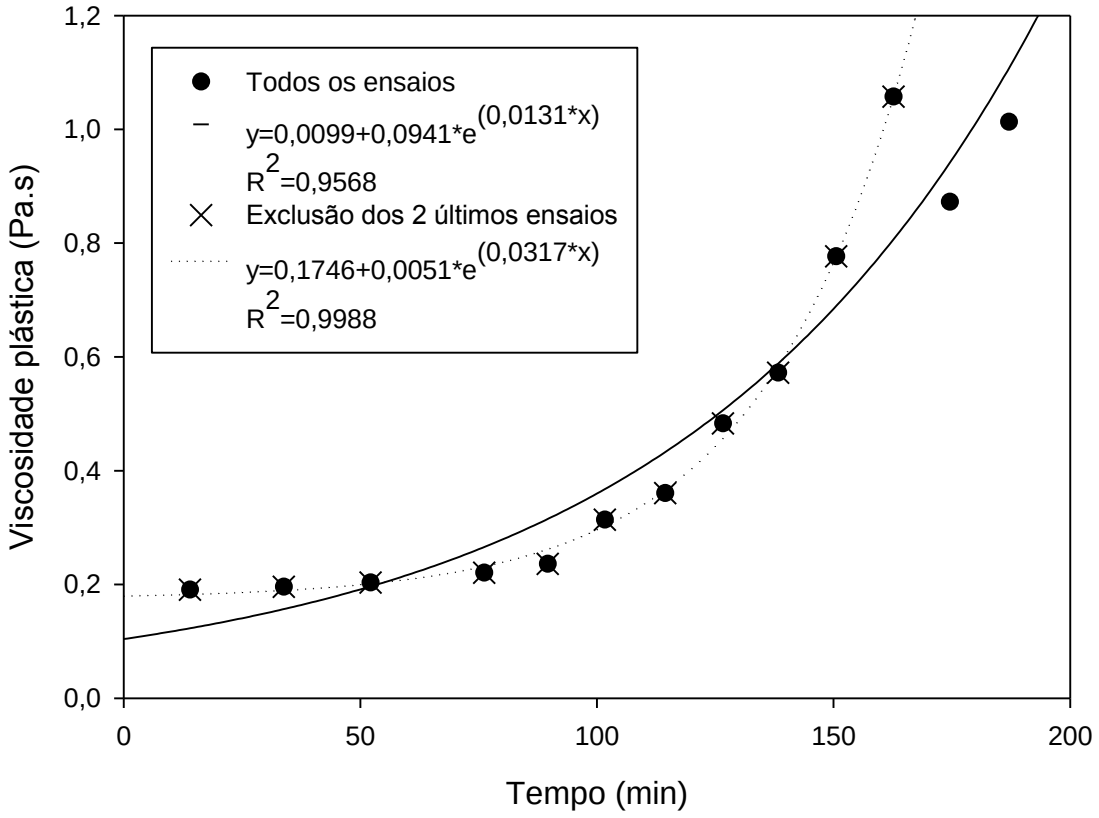


Fig. 4.18. - Evolução da viscosidade plástica do ensaio B, pasta a 23ºC em função da idade da pasta

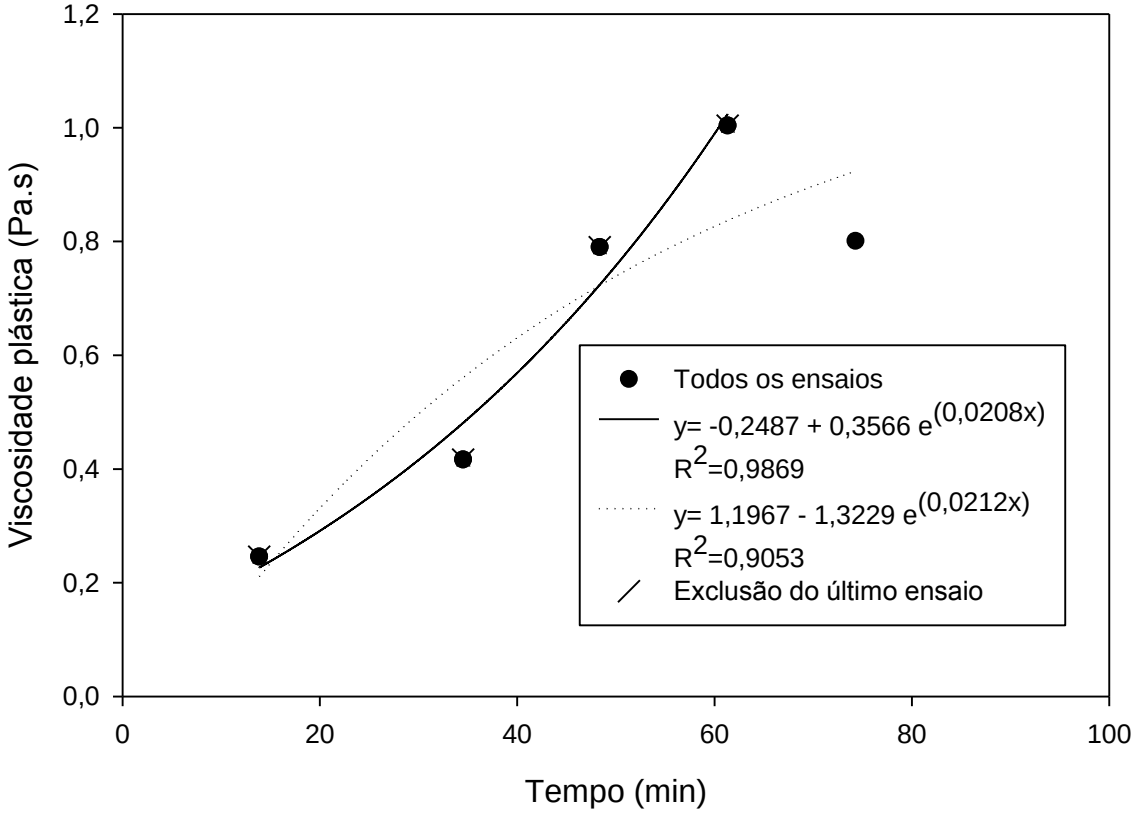


Fig. 4.19. - Evolução da viscosidade plástica do ensaio D, pasta a 33ºC, em função da idade da pasta

A viscosidade plástica da pasta mantida a 33ºC evolui de forma exponencial no tempo, atingindo valores de viscosidade superiores a 1 Pa.s a partir dos 50 minutos (Fig. 4.19). O crescimento exponencial revela um baixo coeficiente de correlação, quando considerado o último ensaio, o que não acontece quando esse ensaio é ignorado.

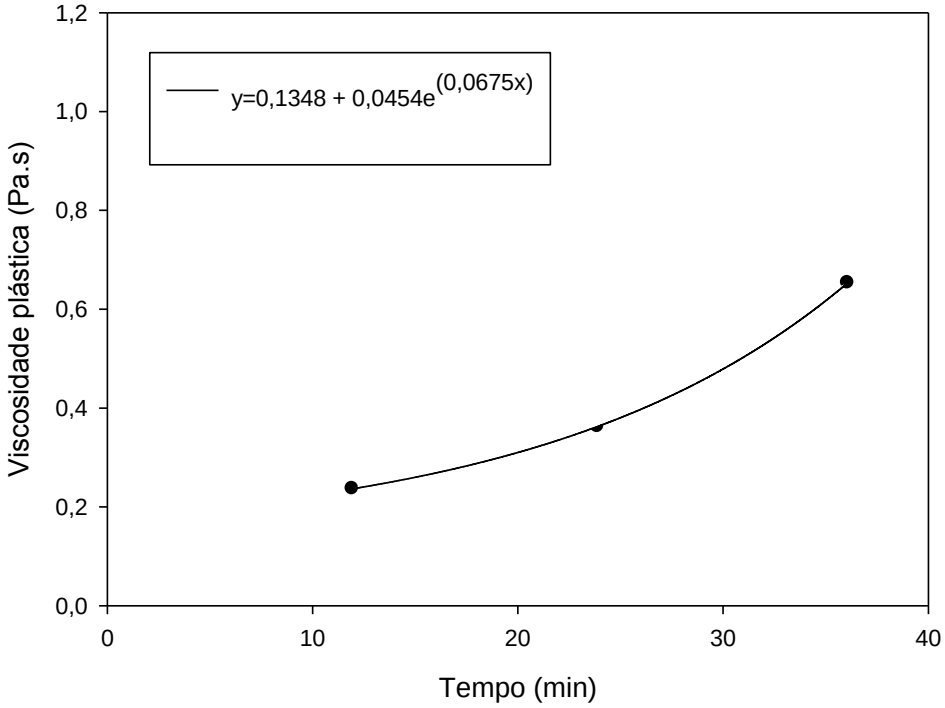


Fig. 4.20. - Evolução da viscosidade plástica do ensaio F, da pasta a 39ºC, em função da idade da pasta

A viscosidade plástica da pasta condicionada à temperatura de 39ºC evolui muito rapidamente e de forma exponencial com o tempo (Fig. 4.20). É possível verificar que aos 35 minutos a amostra F (39ºC) apresenta já uma viscosidade plástica 35% superior ao ensaio D (33ºC). A partir dos 36 minutos já não foi possível efectuar mais ensaios pois a amostra encontrava-se com rigidez muito elevada.

Na Fig. 4.21 é possível efectuar uma comparação relativa do efeito do tempo na viscosidade plástica de pastas acondicionadas a diferentes temperaturas.

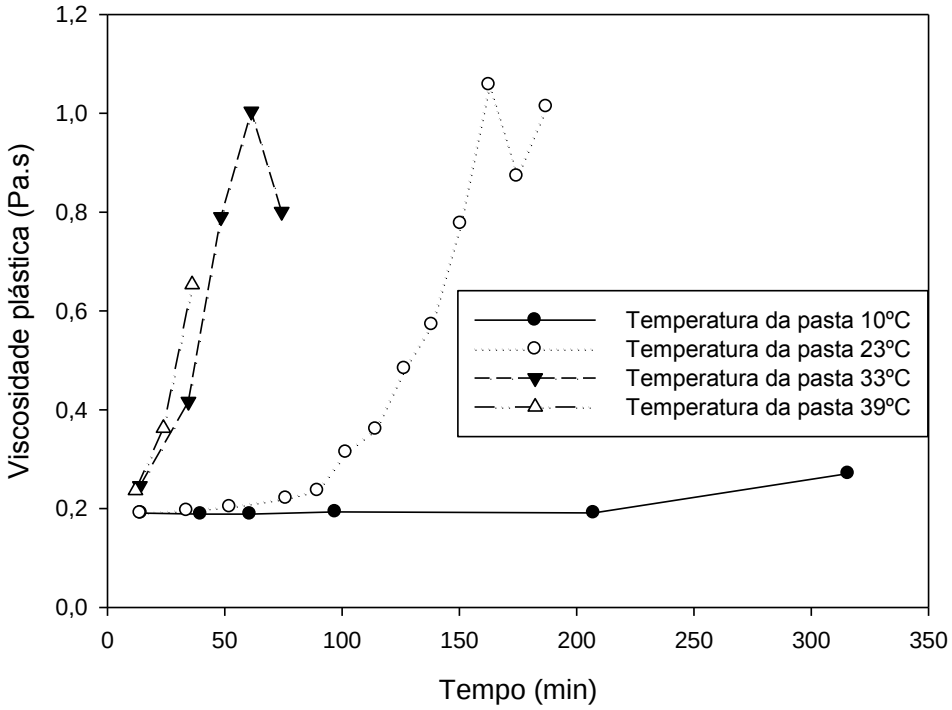


Fig. 4.21. - Evolução da viscosidade plástica em função da idade da pasta a 10ºC, 23ºC, 33ºC e 39ºC.

Através da comparação de todos os diferentes casos aqui analisados, é possível concluir que:

- Existe uma variação relativa insignificante da viscosidade plástica da pasta condicionada a 10ºC
- Os valores da viscosidade plástica, referentes ao primeiro ensaio, no ensaio D (33ºC) e no ensaio F (39ºC) foi relativamente próxima; o que poderá ser justificado pela temperatura inicial das pastas ser relativamente próximas 33ºC e 36ºC respectivamente.
- É observado um crescimento da curva viscosidade plástica cada vez mais rápido e acentuado quando a temperatura é aumentada.
- O tempo durante o qual é possível efectuar o ensaio é cada vez mais reduzido, à medida que a temperatura aumenta. A viscosidade chega a valores tão elevados que o reómetro não se revelou capaz de reduzir a distância entre o prato superior e inferior até ao 'gap' definido.

- Os últimos ensaios efectuados para as temperaturas mais elevadas, levantam algumas dúvidas quanto à sua precisão, uma vez que, as condições da pasta já bastante hidratada (Fig. 4.22), podem influenciar os resultados obtidos. Note-se que, para um correcto ensaio a pasta colocada no reómetro no fim do ensaio deve ter o aspecto observado na Fig. 4.23.

- A viscosidade plástica de Bingham exibe valores mais elevados para amostras condicionadas a ambientes de temperatura mais elevada. Estes resultados seguem em conformidade com o observado em (Al Martini, S. and Nehdi, M., 2009).

- Em (Petit, Khayat et al. 2009) observou-se uma evolução linear da viscosidade plástica com o tempo o que difere da relação exponencial observada nas experiências levadas a cabo neste trabalho.

Fig. 4.22. – Aspecto da amostra após o último ensaio (36 min) da pasta acondicionada a 45ºC [(a)-parte superior; (b)-parte inferior]

Fig. 4.23. - Aspecto da amostra no fim do ensaio aos 13 minutos, da pasta acondicionada a 33ºC.

### 4.3.3. Tensão de Cedência

A tensão de cedência tal como a viscosidade plástica é determinante no escoamento do betão, e também na libertação do ar encurralado no seu interior. A tensão de cedência ao longo do tempo é aqui analisada para as diferentes temperaturas a que a pasta de cimento foi sujeita.

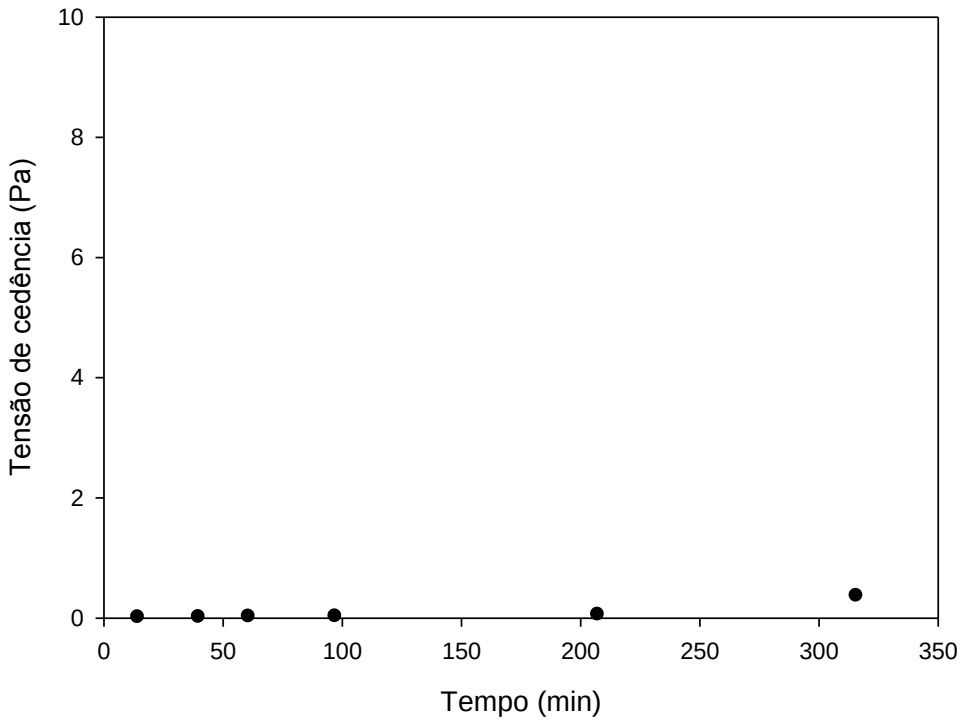


Fig. 4.24. - Evolução da tensão de cedência do ensaio A, pasta a 10ºC, em função da idade da pasta

A tensão de cedência da pasta a 10ºC, comportou-se de forma semelhante à viscosidade plástica, manteve-se a níveis muito próximos de zero.

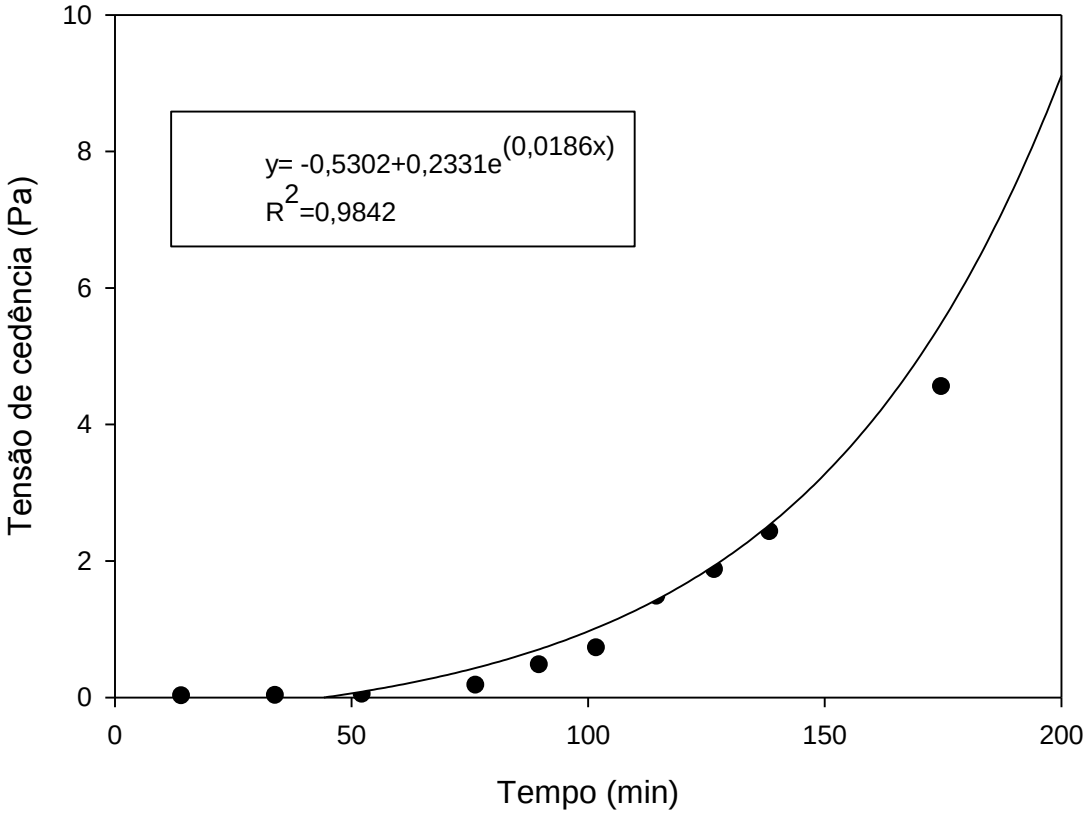


Fig. 4.25. - Evolução da tensão de cedência ensaio B, pasta a 23ºC, em função da idade da pasta

A tensão de cedência da amostra mantida à temperatura ambiente segue uma lei claramente exponencial ao longo do tempo (Fig. 4.25). Até aos 138 minutos o crescimento é consideravelmente lento mantendo-se abaixo dos 2,5Pa, posteriormente em 12 minutos quase duplica a tensão de cedência de 2,44Pa para 4,19Pa. É observado um pequeno patamar de tensões dos 150 até aos 174 minutos.

A amostra condicionada a 33ºC ensaio D, aproxima-se de uma lei exponencial o seu coeficiente de correlação situa-se muito próximo de 1. Manteve-se apenas 40 minutos abaixo dos 2Pa (ver Fig. 4.26).

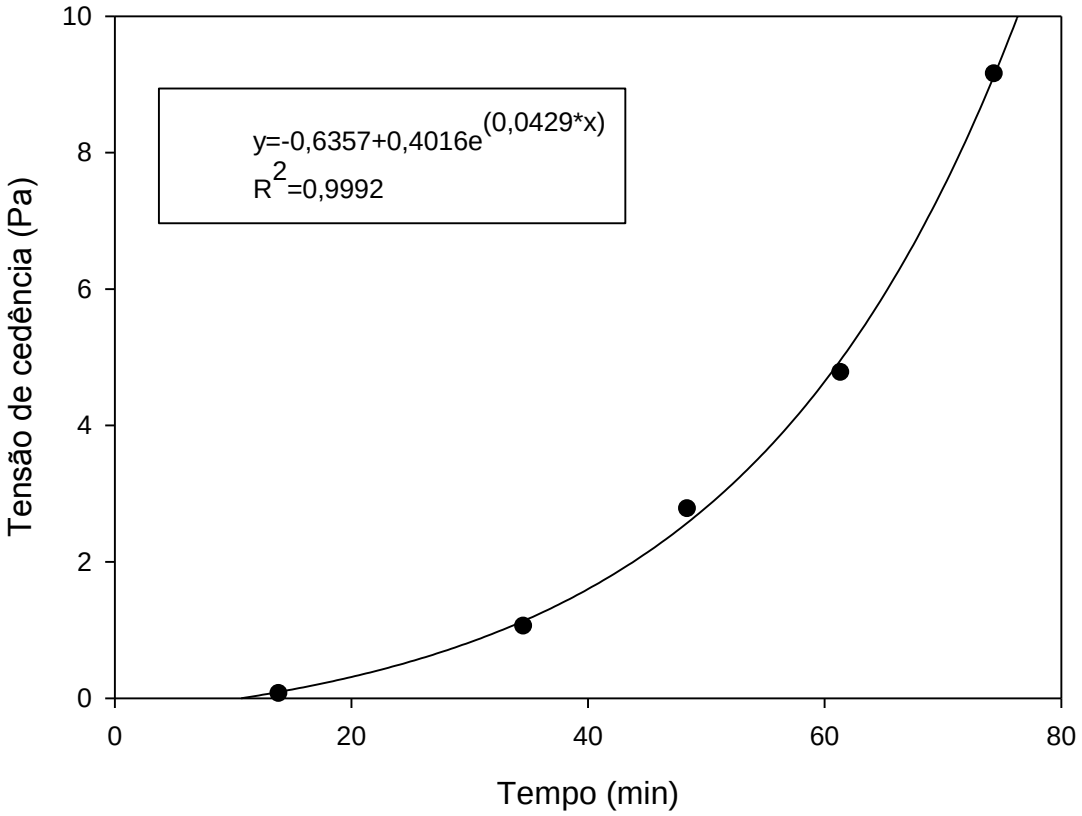


Fig. 4.26. - Evolução da tensão de cedência ensaio D, pasta a 33ºC, em função da idade da pasta

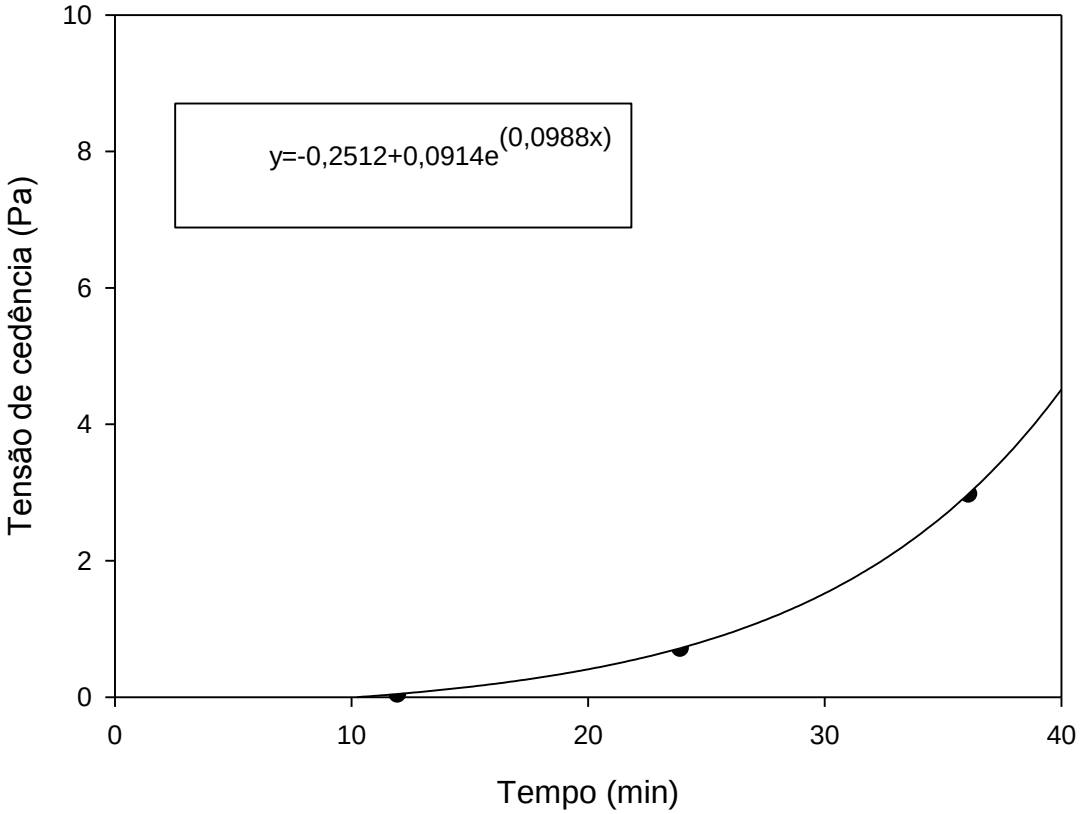


Fig. 4.27. - Evolução da tensão de cedência do ensaio F, pasta a 39ºC,em função da idade da pasta

A tensão de cedência no ensaio F, condicionada a 39ºC, cresceu exponencialmente no tempo, a uma taxa muito superior às temperaturas inferiores, inferindo-se que apenas durante 30 minutos é mantida uma tensão de cedência inferior aos 2Pa (Fig. 4.27). O reduzido número de valores obtidos torna as conclusões a esta temperatura limitadas. Na Fig. 4.28 apresenta-se a tensão de cedência de Bingham ao longo do tempo para as diferentes temperaturas de condicionamento.

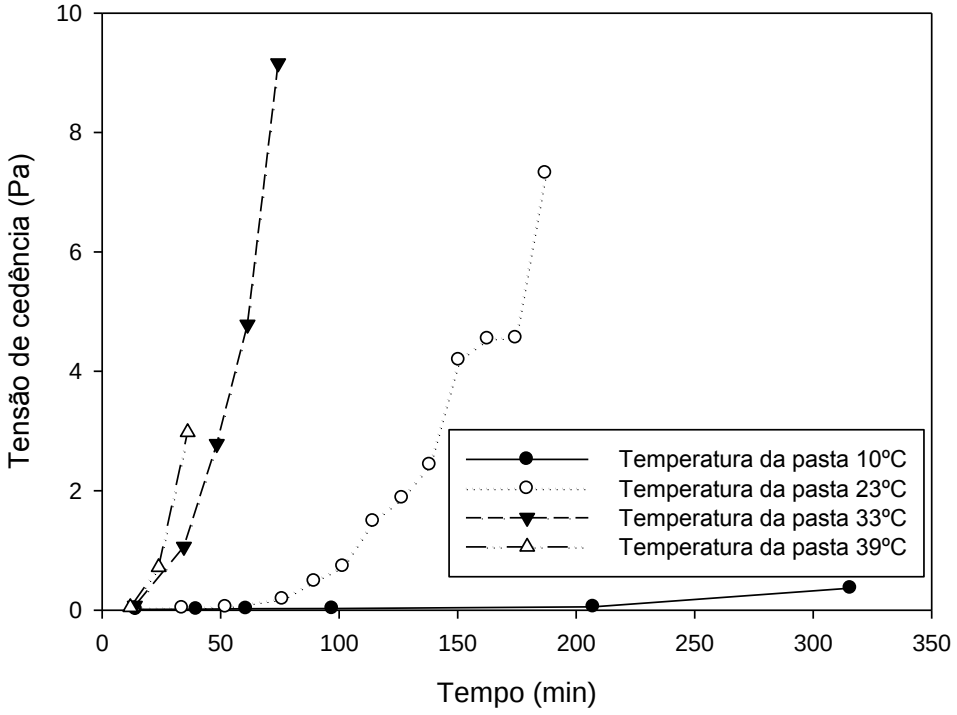


Fig. 4.28. - Evolução da tensão de cedência em função da idade da pasta a 10ºC, 23ºC, 33ºC e 39ºC.

Através da comparação de todos os diferentes casos aqui analisados, é possível concluir que:

- A baixas temperaturas (10ºC) a tensão de cedência mantém-se em valores muito reduzidos nas primeiras 5h, possivelmente assim continuaria por mais algumas horas, no entanto, por motivos operacionais o ensaio foi interrompido ao fim de 5h e 15minutos. Significa isto que não existe problemas de perda de auto-compactabilidade para temperaturas reduzidas, no entanto, podem surgir problemas relacionados com o retardamento da cura.
- A elevadas temperaturas a hidratação do cimento dá-se mais rapidamente, a elevada superfície específica dos produtos de hidratação reduz a eficácia da adsorção do polímero (PCE), aumentando a tensão de cedência, podendo representar um problema para a colocação do betão (Al Martini, S. and Nehdi, M., 2009);
- As tensões de cedência relativas ao primeiro ensaio reométrico são bastante próximas devido à redução de temperatura ocorrida durante o procedimento de mistura.

### 4.3.6. Região de Pastas de BAC com Qualidade

Na Fig. 4.29identificam-se as características reológicas das pastas adequadas para o BAC segundo (Nunes 2008). Na Fig. 4.30.apresenta-se a globalidade dos resultados obtidos com o programa experimental descrito anteriormente e identifica-se a região óptima para as pastas destinadas ao BAC. Com base nesta figura é possível concluir que parte das pastas analisadas, devido aos efeitos do tempo e temperatura, apresentavam características diferentes das observadas em (Nunes, S.C.B., 2008), o que pode implicar a perda de auto-compactabilidade.

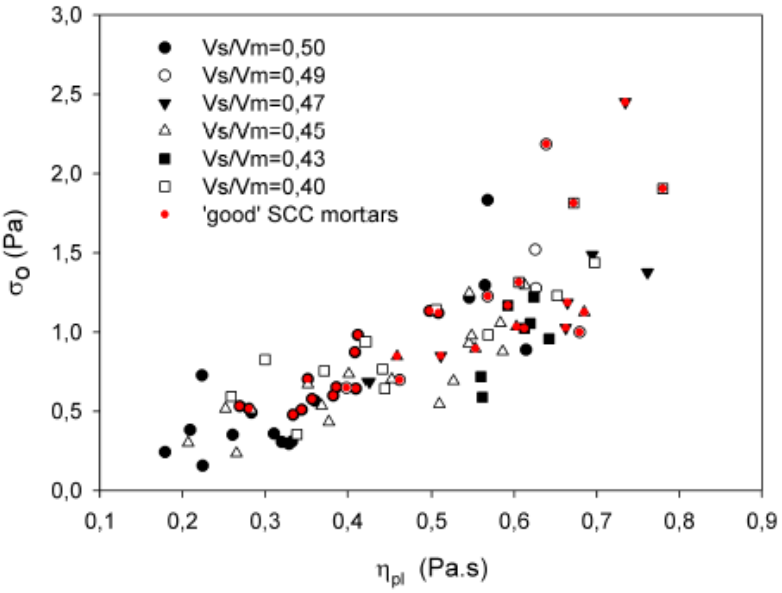


Fig. 4.29. – Região de pastas adequadas para o BAC, em função dos parâmetros de Bingham, (Nunes 2008)

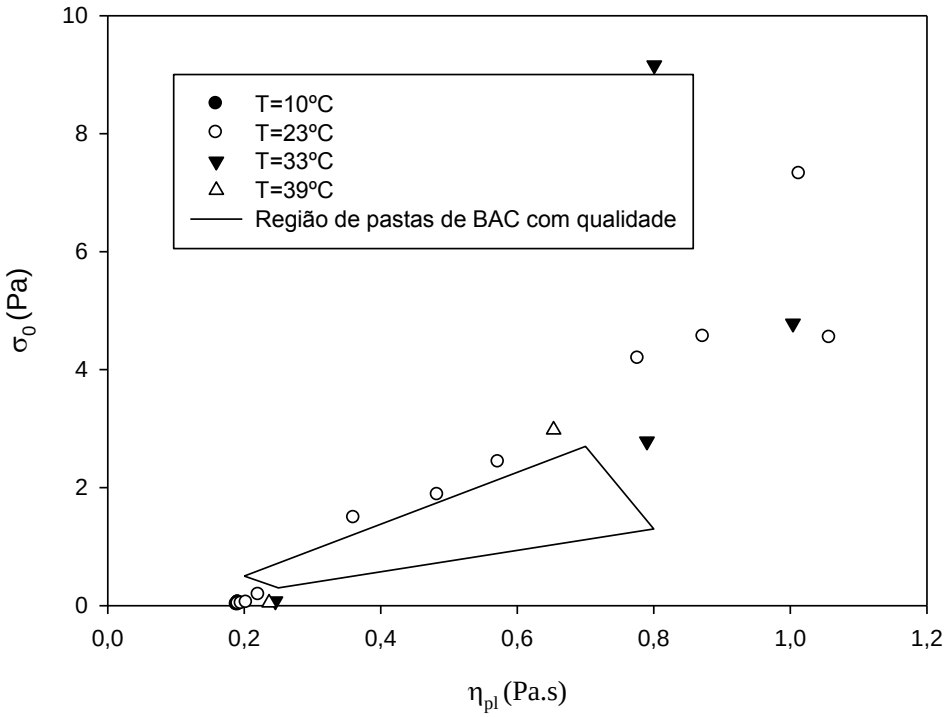


Fig. 4.30. – Região de pastas de BAC com qualidade

### 4.3.4. Resistividade

Os resultados dos ensaios da resistividade média dos 3 provetes para ao período subsequente ao ensaio reométrico, com uma cadência de 7 dias são apresentados na Fig. 4.31. Devido a uma avaria na estufa entre os 27 e 28 dias de idadoe, essas resistividades foram medidas no dia seguinte, daí as omissões no Quadro 4.3, nessa data a temperatura da câmara estava ainda descontrolada estando a aproximadamente 30ºC em vez de 20ºC. Como a temperaturas mais elevadas os iões movem-se com maior velocidade a passagem da corrente eléctrica é mais rapidamente transportada, o que fez com que ocorresse uma diminuição da resistividade aos 27 e 28 dias, Quadro 4.3.

Quadro 4.3. – Evolução da resistividade dos provetes de pasta de cimento ao longo do tempo

| Idade (dias) | Resistividade $\rho_a$ (kΩ.cm) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 35 | 23 | 45 | 10 |
| 7 | 4,033 | 4,045 | 4,230 | 3,514 |
| 14 | 6,454 | 6,175 | 6,849 | 5,330 |
| 21 | 7,386 | 6,976 | 7,900 | 6,083 |
| 27 | | | 7,609 | 5,821 |
| 28 | 7,018 | 6,545 | | |
| 35 | 8,148 | 7,574 | 8,720 | 6,733 |

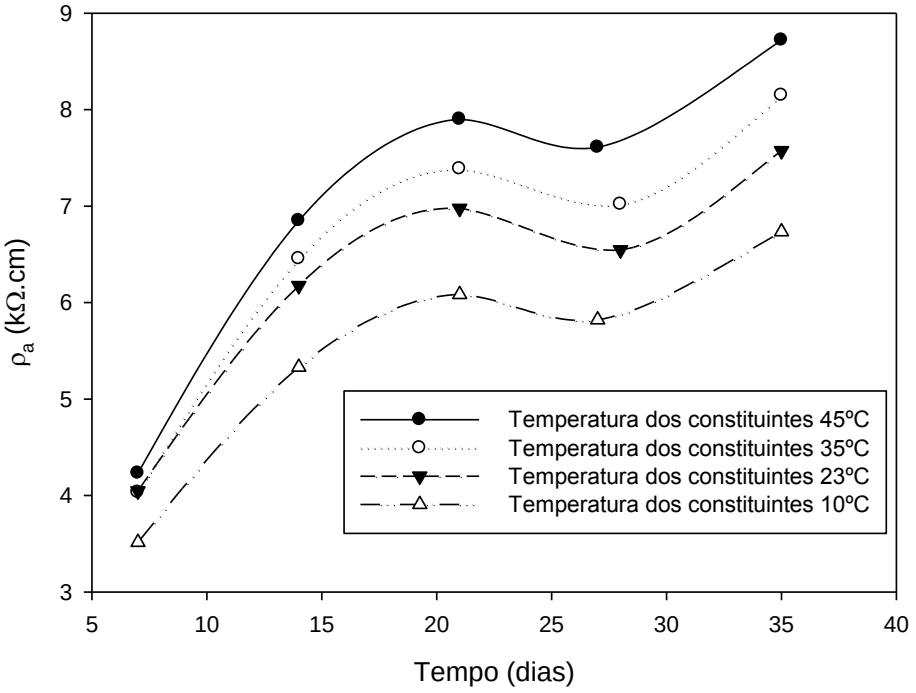


Fig. 4.31. - Evolução da resistividade dos provetes de pasta de cimento ao longo do tempo

O crescimento inicial da resistividade é acentuado, com o tempo esse crescimento tende a estabilizar, tal como verificado com excepção do ensaio problemático.

A influência da temperatura dos constituintes condicionados até ao início da mistura revelou-se significativa, registando-se maiores resistividades para os constituintes condicionados a maiores temperaturas. Estes resultados, significam que a estrutura porosa se encontra mais interligada nos constituintes a menores temperaturas, podendo resultar em redução da durabilidade da do betão.

### 4.3.5. Resistência

Os resultados dos ensaios de resistência à flexão e compressão, estão dispostos no Quadro 4.4. Um dos ensaios de flexão da mistura condicionada a 10ºC não foi considerado, visto que, a rede de aço inox de um dos provetes desviou-se da posição inicial no momento de colocação da pasta, o que levou a que no ensaio de flexão a rede estivesse entre os apoios do provete, aumentando significativamente a resistência. Por esse motivo, não foi possível considerá-lo.

Quadro 4.4. – Resultados dos ensaios de resistência flexão e à compressão

| Ensaio | $f_{fl}$ (MPa) | Desvio | $\delta$ (%) | $f_{cm}$(MPa) | Desvio | $\delta$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A (10ºC) | 14,49 | 1,455 | 10,0 | 91,37 | 9,074 | 9,9 |
| B (23ºC) | 13,76 | 0,636 | 4,6 | 141,10 | 7,271 | 5,2 |
| C (35ºC) | 14,43 | 2,297 | 15,9 | 93,17 | 8,775 | 9,4 |
| D (45ºC) | 13,16 | 0,981 | 7,5 | 149,69 | 4,700 | 3,1 |

Os provetes do ensaio A, a 10ºC registaram maior resistência à flexão, 14,5MPa no entanto a diferença entra a resistência à flexão dos diversos ensaios não é tão relevante como na resistência à compressão. A maior resistência à compressão foi observada nos provetes do ensaio D, 149,7MPa Não se observam relações directas entre a temperatura e as resistências.

# 5
# CONCLUSÕES

## 5.1. Conclusões

O presente estudo realçou as dificuldades por vezes encontradas em manter constantes as propriedades do betão auto-compactável (BAC) no estado fresco. A sensibilidade dessas propriedades a variações na mistura, no tempo de transporte e às condições ambientais é significativa, e a redução desta sensibilidade é complexa.

O BAC tem sido crescentemente utilizado devido à sua trabalhabilidade melhorada, e mesmo com uma robustez limitada o BAC é uma tecnologia com grande potencial tanto para aplicação na pré-fabricação como para a construção *in situ.*

No presente trabalho, para além da avaliação da influência de variações nas dosagens da mistura, decorrentes da produção, foi analisada a influência do tempo e da temperatura nas propriedades reológicas da pasta de cimento; tendo sido verificada uma diminuição da trabalhabilidade com o tempo que foi mais acelerada em pastas sujeitas a temperaturas mais elevadas.

Do trabalho aqui realizado pode concluir-se o seguinte:

### 5.1.1. Modelos de Análise de Robustez de BAC

- A metodologia LABEST/FEUP (Nunes 2008) engloba os desvios de pesagens que ocorrem no processo de produção. A robustez é quantificada numéricamente, o que facilita a comparação da robustez entre misturas. A desvantagem desta metodologia prende-se com o número de ensaios requeridos para obter os modelos numéricos de previsão.
- O método baseado no Sp (Ramge and Lohaus 2010) é essencialmente gráfico e não possibilita uma análise de robustez numérica, podendo ser útil numa fase de pré-dimensionamento. Esta metodologia tem a vantagem de apontar os limites de água de mistura necessária para uma determinada concentração de superplastificante garantindo a auto-compactabilidade.
- A metodologia proposta por Peter Billberg (Billberg 2009), apesar de ser limitada a pastas e argamassas, é de grande utilidade, para análise e dimensionamento de misturas de BAC, apesar de ser sensível a outliers. Comparando a áreas relativas das curvas de mistura (tensão de cedência vs viscosidade plástica), permite identificar as misturas que apresentam menores variações, em função das variações que se pretender analisar.
- A análise da sensibilidade das propriedades de auto-compactabilidade, quando ocorre uma variação na de quantidade de água, por exemplo, em (BIBM 2005), é uma análise bastante

simples, e bastante eficiente, no entanto, é limitada a variações de água e não apresenta um resultado de fácil comparação.

### 5.1.2. Implementação da Metodologia LABEST/FEUP em Matlab®

A avaliação da robustez do BAC pela metodologia LABEST/FEUP, através da sua automatização em Matlab®, foi realizada para o caso de uma composição de BAC branco aplicado em obra. A composição do BAC branco foi previamente optimizada em laboratório. No entanto, durante a produção em ambiente industrial, utilizando os mesmos materiais constituintes, as propriedades do betão sofreram alterações relativamente ao observado em laboratório. pelo que, a mistura foi ajustada na central de produção. Neste trabalho desenvolveram-se duas avaliações da robustez, em função da composição alvo utilizada:

- Considerando a composição ajustada na central como composição alvo, os desvios obtidos são menores e o valor da robustez foi igual a 57% para uma amplitude dos intervalos de aceitação correspondente a 3 desvios-padrão.
- Considerando a composição ajustada em laboratório como composição alvo, os desvios obtidos são superiores e o valor da robustez foi igual apenas a 14% para uma amplitude dos intervalos de aceitação correspondente a 3 desvios padrão

As variáveis de resposta mais condicionantes foram o tempo de escoamento em funil V(Tfunil), e o coeficiente de difusão de cloretos (Dcl). A amplitude dos intervalos de aceitação para cada variável de resposta foi considerada em função do desvio padrão (1, 2 e 3 respectivamente); o que significa que variáveis de resposta com um desvio padrão reduzido (em consequência de um baixo erro experimental) foram controladas por limites exíguos, reduzindo a robustez marginal e, consequentemente, a global.

Quando comparadas as medidas de robustez resultantes deste estudo, com as medidas de robustez observadas em (Nunes 2008), que variaram sensivelmente entre 70% e 90%, percebe-se que a robustez da mistura analisada é claramente inferior.

### 5.1.3. Análise da Influência do Tempo e Temperatura na Reologia da Pasta de Cimento

Foram efectuados ensaios reométricos num reómetro rotacional, em pastas de cimento à temperatura média de 10, 23, 33 e 39ºC. Estes valores correspondem à temperatura média da pasta durante o ensaio. Para controlar as temperaturas das pastas ensaiadas a temperaturas superiores à ambiente (33ºC e 39ºC) os constituintes foram colocados antes de mistura numa estufa a 45ºC, tendo-se observado uma descida significativa da temperatura durante o período de mistura. Para contrariar esse efeito a mistura foi mantida na estufa a 45ºC durante os ensaios reométricos e obteve-se uma temperatura média da pasta de 33ºC. No outro caso a temperatura da estufa foi aumentada para 70ºC e a temperatura média da pasta subiu para 39ºC.

O comportamento reológico da pasta de cimento foi fortemente influenciada pela temperatura do reómetro. De forma a controlar a diferença entre a curva ascendente e a curva descendente foi utilizada uma temperatura no reómetro equivalente à temperatura das pastas para temperaturas até aos 23ºC. Para temperaturas mais elevadas o reómetro foi regulado para uma temperatura de cerca 10ºC inferior à temperatura da pasta. Desta forma, conseguiu-se manter o comportamento da pasta constante durante todo o ensaio, ou seja, curva ascendente semelhante à descendente.

A viscosidade plástica de Bingham apresentou o seguinte comportamento:

- A baixas temperaturas (10ºC) a viscosidade plástica manteve-se perto de 0,2Pa.s, sem apresentar alterações significativas durante cerca de 300 minutos, a duração do ensaio.
- À temperatura ambiente a viscosidade plástica que inicia a 0,2Pa.s cresce a uma taxa cada vez superior, segundo uma lei exponencial.
- A temperaturas superiores o crescimento foi mais acentuado, no entanto, mantendo a forte correlação à lei exponencial.

A tensão de cedência de Bingham apresentou um comportamento muito semelhante à viscosidade plástica:

- A baixas temperaturas (10ºC) a tensão de cedência manteve-se perto de 0,04Pa, sem apresentar alterações significativas durante cerca de 300 minutos, a duração do ensaio.
- À temperatura ambiente a tensão de cedência inicia-se a uma tensão muito próxima de zero e cresce a uma taxa cada vez superior segundo uma lei exponencial.
- A temperaturas superiores o crescimento foi mais acentuado no entanto mantendo a forte correlação à lei exponencial.

A rapidez com que ocorreu o endurecimento do betão nas misturas a elevadas temperaturas deveu-se a vários factores, entre eles a maior evaporação da água de mistura, a diminuição da densidade do superplastificante com o aumento da superfície específica provocada pelos produtos de hidratação, e também devido à grande quantidade de metacaulinos que tem grande influência na cinética do endurecimento, segundo, FCT/PTDC/ECM/70693/2006 – "*Betão dimensionado para melhorar o desempenho nas primeiras idades e a durabilidade. Caracterização da escala nano à macro*.". Deve ser notado que as conclusões aqui retiradas são limitadas à mistura em estudo.

#### 5.1.4. Análise de Influência do Tempo e Temperatura na Resistividade de Pastas

A resistividade dos provetes de pastas saturadas até aos 35 dias foi predominantemente crescente com o tempo, e aos 35 dias ainda não havia sinais de ter estabilizado. A influência da temperatura dos constituintes revelou grande importância na resistividade, verificou-se maior resistividade nos provetes de pasta de cimento, cujos constituintes se encontravam a maior temperatura. Logo, é possível concluir que a estrutura porosa se encontra mais interligada. Ou seja, mais altas temperaturas durante a mistura poderão aumentar a durabilidade da estrutura.

#### 5.1.5. Análise de Influência do Tempo e Temperatura na Resistência de Pastas

A resistência dos provetes de pasta de cimento não exibiram um comportamento dependente da temperatura. Tanto os resultados de resistência à compressão como os resultados de resistência à flexão variaram significativamente.

### 5.2. Estudos futuros

Em termos de estudos futuros, dado que existe um grande desconhecimento sobre as propriedades das misturas de BAC a elevadas temperaturas haveria interesse em:

- Incluir o factor tempo e o factor temperatura nas variáveis de entrada do planeamento factorial para optimização do BAC;

- Repetir os ensaios reométricos aqui desenvolvidos com a mesma mistura para as temperaturas mais elevadas, uma vez que para estas pastas a rigidez precoce impediu que fosse possível obter uma evolução dos parâmetros de Bingham detalhada;
- Compreendendo que as conclusões aqui obtidas são limitadas a esta composição, seria importante alargar o estudo a outras composições com outro tipo de cimentos, adições e superplastificantes;
- Estudar a influência de outras temperaturas, com a finalidade de estabelecer limites aceitáveis de temperatura ambiente durante a produção;
- Estudar a evolução de misturas com uma sobredosagem de superplastificante (para além da dosagem de saturação) a elevadas temperaturas ao longo do tempo, ;
- Analisar a influência da energia de mistura durante o tempo de transporte, a diferentes frequências de mistura e a diferentes temperaturas.

No que respeita ao *script* desenvolvido em Matlab® seria desejável optimizar o input dos modelos do *script* em Matlab® e explorar outras formas de representação dos resultados.

## Bibliografia


Al-Martini, S. (2009). Investigation on rheology of cement paste and concrete at high temperature. Canada, The University of Western Ontario (Canada).

Al-Martini, S. and M. Nehdi (2009). "Coupled effects of time and high temperature on rheological properties of cement pastes incorporating various superplasticizers." Journal of Materials in Civil Engineering **21**(Compendex): 392-401.

BIBM (2005). European guidelines for self-compacting concrete: Specification, production and use, BIBM, CEMBUREAU, EFCA, EFNARC, and ERMCO.

Billberg, P. (2009). INCREASE OF SCC ROBUSTNESS TO VARYING AGGREGATE MOISTURE CONTENT USING VMA. 2nd International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete. C. J. Shi, Z. W. Yu, K. H. Khayat and P. Y. Yan. Bagneux, R I L E M Publications. **65:** 473-482.

Bonen, D. (2007). "Robustness of Self-consolidating concrete." 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete

Diawara, H. (2008). Parametric study of self-consolidating concrete. N. Ghafoori. United States -- Nevada, University of Nevada, Las Vegas.

Georgiadis, A. S., K. K. Sideris, et al. (2010). "Properties of scc produced with limestone filler or viscosity modifying admixture." Journal of Materials in Civil Engineering **22**(4): 352-360.

Hackley, V. A. (2001). Guide to rheological nomenclature [electronic resource]: measurements in ceramic particulate systems [Gaithersburg, Md.] : Washington, DC :, U.S. Dept. of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology ; For sale by the Supt. of Docs., U.S. G.P.O.

IPQ (2002). Ensaios de betão fresco NP EN 12350-2 2002 Parte 2 ensaio de abaixamento. Caparica, IPQ**:** 11 p.-11 p.

IPQ (2002). Ensaios do betão fresco NP EN 12350-1 2002 Parte 1 amostragem. Lisboa, IPQ**:** 7 p.-7 p.

IPQ (2003). Ensaios do betão endurecido NP EN 12390-3 2003 parte 3 resistência à compressão dos provetes de ensaio. Caparica, IPQ**:** 21 p.-21 p.

IPQ (2004). Ensaios do betão endurecido NP EN 12390-1 2003 parte 1 forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes. Caparica, IPQ**:** 14 p.-14 p.

IPQ (2007). Betão NP EN 206-1: 2007 Parte 1 especificação, desempenho, produção e conformidade. Lisboa, IPQ**:** 84.

IPQ (2007). Betão Parte 9 regras adicionais para betão autocompactável (BAC) NP EN 206-9: 2010. Lisboa, IPQ**:** 35.

IPQ (2007). Betão Parte 9 regras adicionais para betão autocompactável (BAC) NP EN 206-9: 2010. Lisboa, IPQ**:** 35 p.-35 p.

IPQ (2008). Sistemas de gestão da qualidade requisitos (ISO 9001:2008) NP EN ISO 9001: 2008.

IPQ (2010). Ensaios do betão fresco Parte 8 betão autocompactável. Ensaio de espalhamento NP EN 12350-8: 2010. Caparica, IPQ**:** 12 p-12 p.

IPQ (2010). Ensaios do betão fresco Parte 9 betão autocompactável. Ensaio de escoamento no funil V NP. Caparica, IPQ**:** 11 p-11 p.

IPQ (2010). Ensaios do betão fresco Parte 10 betão autocompactável. Ensaio de escoamento na caixa L NP. Caparica, IPQ**:** 12 p-12 p.

IPQ (2010). Ensaios do betão fresco Parte 11 betão autocompactável. Ensaio de segregação no peneiro. Caparica, IPQ**:** 12 p-12 p.

IPQ (2010). Ensaios do betão fresco Parte 12 betão autocompactável. Ensaio de espalhamento no anel J NP. Caparica, IPQ**:** 14 p-14 p.

Ivan, N. Y. T. (2008). Performance and Robustness of Self-Consolidatin Concrete. Hong Kong, The University of Hong Kong.

Li, Z. (2007). "State of workability design technology for fresh concrete in Japan." Cement and Concrete Research **37**(9): 1308-1320.

Li, Z. G., T. Ohkubo, et al. (2004). "Theoretical analysis of time-dependence and thixotropy of fluidity for high fluidity concrete." Journal of Materials in Civil Engineering **16**(3): 247-256.

Lubeck, A. (2008). Resistividade elétrica de concretos de cimento portland branco e elevados teores de escória de alto forno. Santa Maria, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria.

Montgomery, D. C. (2001). Design and analysis of experiments. New York [etc], John Wiley & Sons.

Nunes, S. (2001). Betão auto-compactável Tecnologia e propriedades. Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**:** ir.

Nunes, S. (2008). Performance-based design of self-compacting concrete (SCC) a contribution to enchance SCC mixtures robustness, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**:** XXXVIII, 319.

Nunes, S., P. Oliveira, et al. (2011). "Rheological characterization of SCC mortars and pastes with changes induced by cement delivery." Cement and Concrete Composites **33**(1): 103-115.

Ozbay, E., M. Gesoglu, et al. (2008). "Empirical modeling of fresh and hardened properties of self-compacting concretes by genetic programming." Construction and Building Materials **22**(8): 1831-1840.

Petit, J., K. H. Khayat, et al. (2009). "Coupled effect of time and temperature on variations of plastic viscosity of highly flowable mortar." Cement and Concrete Research **39**(3): 165-170.

Ramge, P. and L. Lohaus (2010). Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete, RILEM Bookseries. **- 1**.

Rigueira, J. W., E. G. Taengua, et al. (2009). "Large-scale production of SCC: A new approach to robustness." Indian Concrete Journal **83**(8): 7-13.

Saak, A. (2000). Characterization and modeling of the rheology of cement paste: With applications toward self-flowing materials. H. Jennings and S. Shah. United States -- Illinois, Northwestern University**:** 256 p.

Schmidt, W., J. Brouwers, et al. (2010). Effects of Superplasticizer and Viscosity-Modifying Agent on Fresh Concrete Performance of SCC at Varied Ambient Temperatures. Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete. K. H. Khayat and D. Feys, Springer Netherlands. **1:** 65-77.

Sette, S. and L. Boullart (2001). "Genetic programming: Principles and applications." Engineering Applications of Artificial Intelligence **14**(6): 727-736.

Soroka, I. and D. Ravina (1998). "Hot weather concreting with admixtures." Cement and Concrete Composites **20**(2-3): 129-136.

## ANEXO A

Apresenta-se de seguida o *script* desenvolvido em Matlab® desenvolvido no âmbito do capítulo 3.

```
clear all;
tic;
tstart=tic;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                             Input                             %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
deltax = xlsread('livro1.xlsx','Input','ad27:am1026'); %matriz desvios
len=length(deltax); %número de desvios

n_resamples=xlsread('livro1.xlsx','Input','ac22');  %número de sub-amostras
(number of resamples)
samplesize=xlsread('livro1.xlsx','Input','ac23');   %tamanho das sub-
amostras (sample size)

[rell,rel,relll] = xlsread('livro1.xlsx','Input','ac2:al2'); %rel é o
vector absoluto/relativo para correcção de limites Ri
rsup = xlsread('livro1.xlsx','Input','ac3:al3'); %vector
rinf = xlsread('livro1.xlsx','Input','ac4:al4'); %vector


xi0 = xlsread('livro1.xlsx','Input','ac18:al18');  %vector
x0=[xi0(ones(samplesize,1),:)]; %matriz em que cada linha é igual a xi0,
número de linhas iguais à dimensão da sub-amostra

e = xlsread('livro1.xlsx','Input','ac9:al9'); %Vector de correcção de
modelos (expoente)
bb =  xlsread('livro1.xlsx','Input','ac8:al8'); %Vector de correcção de
modelos (+b)
[mm,log_correction,pp] = xlsread('livro1.xlsx','Input','ac10:al10');%Vector
com s/n para teste if de verdadeiro ou falso
[mm,ln_correction,pp] = xlsread('livro1.xlsx','Input','ac11:al11');%Vector
com s/n para teste if de verdadeiro ou falso

errmed =  xlsread('livro1.xlsx','Input','ac14:al14'); %vector média do erro
(todos os elementos devem ser 0 salvo excepções)
errsig =  xlsread('livro1.xlsx','Input','ac15:al15'); %Desvio padrão do
erro

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                             Input models                      %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
nmodelos=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','c1'); %número de modelos
[ww,C,zz]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','a4:a14'); %Vector C -
variáveis por ordem x1, x2, ...

if nmodelos>=1
    independent=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','c5'); %termo
independente do modelo
    [D]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','c6:c43'); %termos
dependentes do modelo
```

```
    [w,E,z]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','d6:d43');% E - nome das
variáveis da primeira coluna
    [t,F,r]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','e6:e43');% F - nome das
variáveis da segunda coluna // t - número de elementos do modelo com uma só
variável(matriz de uns)


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%
    %                Inportar o vector b da função inp_model
%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%
    b =inp_model(independent, D, w, z, E, t, r, F, C);
    if sum([independent D'])~=sum(b)
        disp('ERRO - O somatório dos vectores importados não coincidem com
os vectores de origem em Excel')
        sum([independent D'])
        sum(b)
    end

    B=b;

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                              Input models2                            %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if nmodelos>=2
    independent=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','g5'); %matrix
    [D]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','g6:g43'); %matrix
    [w,E,z]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','h6:h43');
    [t,F,r]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','i6:i43');

    b =inp_model(independent, D, w, z, E, t, r, F, C);
    if sum([independent D'])~=sum(b)
        disp('ERRO - O somatório dos vectores importados não coincidem com
os vectores de origem em Excel')
        sum([independent D'])
        sum(b)
    end
    B=[B b];

end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                              Input models3                           %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if nmodelos>=3
    independent=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','k5'); %matrix
    [D]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','k6:k43'); %matrix
    [w,E,z]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','l6:l43');
    [t,F,r]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','m6:m43');

    b =inp_model(independent, D, w, z, E, t, r, F, C);
    if sum([independent D'])~=sum(b)
```

```
        disp('ERRO - O somatório dos vectores importados não coincidem com
os vectores de origem em Excel')
        sum([independent D'])
        sum(b)
    end
    B=[B b];

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                             Input models4                      %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if nmodelos>=4
    independent=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','o5'); %matrix
    [D]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','o6:o43'); %matrix
    [w,E,z]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','p6:p43');
    [t,F,r]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','q6:q43');

    b =inp_model(independent, D, w, z, E, t, r, F, C);
    if sum([independent D'])~=sum(b)
        disp('ERRO - O somatório dos vectores importados não coincidem com
os vectores de origem em Excel')
        sum([independent D'])
        sum(b)
    end
    B=[B b];

end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                             Input models4                      %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if nmodelos>=5
    independent=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','s5'); %matrix
    [D]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','s6:s43'); %matrix
    [w,E,z]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','t6:t43');
    [t,F,r]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','u6:u43');

    b =inp_model(independent, D, w, z, E, t, r, F, C);
    if sum([independent D'])~=sum(b)
        disp('ERRO - O somatório dos vectores importados não coincidem com
os vectores de origem em Excel')
        sum([independent D'])
        sum(b)
    end
    B=[B b];

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                             Input models6                      %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if nmodelos>=6
    independent=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','w5'); %matrix
    [D]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','w6:w43'); %matrix
    [w,E,z]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','x6:x43');
    [t,F,r]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','y6:y43');
```

```
    b =inp_model(independent, D, w, z, E, t, r, F, C);
    if sum([independent D'])~=sum(b)
        disp('ERRO - O somatório dos vectores importados não coincidem com
os vectores de origem em Excel')
        sum([independent D'])
        sum(b)
    end
    B=[B b];

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                             Input models7                      %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if nmodelos>=7
    independent=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','aa5'); %matrix
    [D]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','aa6:aa43'); %matrix
    [w,E,z]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','ab6:ab43');
    [t,F,r]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','ac6:ac43');

     b =inp_model(independent, D, w, z, E, t, r, F, C);
    if sum([independent D'])~=sum(b)
        disp('ERRO - O somatório dos vectores importados não coincidem com
os vectores de origem em Excel')
        sum([independent D'])
        sum(b)
    end

    B=[B b];

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                             Input models8                      %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if nmodelos>=8
    independent=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','ae5'); %matrix
    [D]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','ae6:ae43'); %matrix
    [w,E,z]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','af6:af43');
    [t,F,r]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','ag6:ag43');

    b =inp_model(independent, D, w, z, E, t, r, F, C);
    if sum([independent D'])~=sum(b)
        disp('ERRO - O somatório dos vectores importados não coincidem com
os vectores de origem em Excel')
        sum([independent D'])
        sum(b)
    end

    B=[B b];

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                             Input models9                      %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if nmodelos>=9
```

```
    independent=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','ai5'); %matrix
    [D]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','ai6:ai43'); %matrix
    [w,E,z]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','aj6:aj43');
    [t,F,r]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','ak6:ak43');

    b =inp_model(independent, D, w, z, E, t, r, F, C);
    if sum([independent D'])~=sum(b)
        disp('ERRO - O somatório dos vectores importados não coincidem com
os vectores de origem em Excel')
        sum([independent D'])
        sum(b)
    end

    B=[B b];

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                            Input models10                      %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if nmodelos>=10
    independent=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','am5'); %matrix
    [D]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','am6:am43'); %matrix
    [w,E,z]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','an6:an43');
    [t,F,r]=xlsread('livro1.xlsx','Input modelos','ao6:ao43');

    b =inp_model(independent, D, w, z, E, t, r, F, C);
    if sum([independent D'])~=sum(b)
        disp('ERRO - O somatório dos vectores importados não coincidem com
os vectores de origem em Excel')
        sum([independent D'])
        sum(b)
    end

    B=[B b];

end



%No caso de ser necessário aumentar o número de modelos a importar, copiar
%linhas 389 a 426 corrigindo as células a importar das variáveis
%independent, D, E, F
%E ainda é necessário corrigir input de
%rsup,rinf,e,b,log_correction,ln_correction,errmed,errsig no início linhas
%21 a 27

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%          Cálculo de y_0 para correcção de R                   %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
xxi04int=xi0;

    for i=1:length(C)
    for j=i:length(C)
        xxi04int=[xxi04int xi0(:,i).*xi0(:,j)];
    end
```

```
    end
    xi04int=[1 xxi04int];
    y_0_ex = xi04int*B;

    %correcção de variável
    for u=1:nmodelos
        if char(log_correction(u))=='s'
            y_0(u) = 10.^(y_0_ex(u)).^(1/(e(u)))-bb(u);
        elseif char(ln_correction(u))=='s'
            y_0(u) = exp(1).^(y_0_ex(u).^(1/(e(u)))-bb(u));
        elseif char(log_correction(u))~='s' & char(ln_correction(u))~='s'
            y_0(u) = y_0_ex(u).^(1/(e(u)))-bb(u);
        end
    end



    %Correcção de R apenas nos casos em que rel=relativo
    for p=1:nmodelos

        if
sum(native2unicode(char(rel(p))))==sum(native2unicode('relativo'))

        rinf1(p) = y_0(p)-1*rinf(p);
        rsup1(p) = y_0(p)+1*rsup(p);
        rinf2(p) = y_0(p)-2*rinf(p);
        rsup2(p) = y_0(p)+2*rsup(p);
        rinf3(p) = y_0(p)-3*rinf(p);
        rsup3(p) = y_0(p)+3*rsup(p);
        end
    end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%     Cálculo de fi (nº de linhas=n_resamples ; nºcolunas = Xi)  %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    for i=1:n_resamples
    %recolha aleatória dos desvios
    deltax_bs = bootstrp(samplesize, @(x) [x(1,:)], deltax);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   Cálculo de x=[1 X1 ... Xn X1*X2 ... XnXn]                       %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    x=x0+deltax_bs;
    xx=x;
    for ii=1:length(C)
        for j=ii:length(C)
            xx=[xx x(:,ii).*x(:,j)];
        end
    end
    x=[ones(samplesize,1) xx];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                        Yi Interpolation                           %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    y_ex = x*B;
    %Correcção da variável
    for u=1:nmodelos
```

```
        if char(log_correction(u))=='s'
            y(:,u) = [10.^(y_ex(:,u).^(1/(e(u)))-bb(u))];
        elseif char(ln_correction(u))=='s'
            y(:,u) = exp(1).^(y_ex(:,u).^(1/(e(u)))-bb(u));
        else
            y(:,u) = [y_ex(:,u).^(1/(e(u)))-bb(u)];
        end
    end


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                      cálculo dos f                            %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    for uu=1:nmodelos
        counter1(:,uu) = y(:,uu)<rsup1(uu) & y(:,uu)>rinf1(uu);
        counter2(:,uu) = y(:,uu)<rsup2(uu) & y(:,uu)>rinf2(uu);
        counter3(:,uu) = y(:,uu)<rsup3(uu) & y(:,uu)>rinf3(uu);
    end

    fi1(i,:) = sum(counter1)/samplesize;
    f1(i,:) = sum(sum(counter1,2)==nmodelos)/samplesize;
    fi2(i,:) = sum(counter2)/samplesize;
    f2(i,:) = sum(sum(counter2,2)==nmodelos)/samplesize;
    fi3(i,:) = sum(counter3)/samplesize;
    f3(i,:) = sum(sum(counter3,2)==nmodelos)/samplesize;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                            Output                             %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%



for desvio=1:3
    if desvio == 1
        fi=fi1;
        f=f1;
        output=[mean(fi); median(fi); mode(fi); 2*sqrt(mean(fi).*(1-
mean(fi))/n_resamples); min(fi); max(fi); std(fi); prctile(fi,2.5);
prctile(fi,97.5)];
        xlswrite('livro1.xlsx',output,'Output','b4');
        outputp=[mean(f); median(f); mode(f); 2*sqrt(mean(f).*(1-
mean(f))/n_resamples); min(f); max(f); std(f); prctile(f,2.5);
prctile(f,97.5)];
        xlswrite('livro1.xlsx',outputp,'Output','l4');

    elseif desvio == 2
        fi=fi2;
        f=f2;
        output=[mean(fi); median(fi); mode(fi); 2*sqrt(mean(fi).*(1-
mean(fi))/n_resamples); min(fi); max(fi); std(fi); prctile(fi,2.5);
prctile(fi,97.5)];
        outputp=[mean(f); median(f); mode(f); 2*sqrt(mean(f).*(1-
mean(f))/n_resamples); min(f); max(f); std(f); prctile(f,2.5);
prctile(f,97.5)];
        xlswrite('livro1.xlsx',outputp,'Output','l14');
```

```
        xlswrite('livro1.xlsx',output,'Output','b14');
    elseif desvio == 3
        fi=fi3;
        f=f3;
        output=[mean(fi); median(fi); mode(fi); 2*sqrt(mean(fi).*(1-
mean(fi))/n_resamples); min(fi); max(fi); std(fi); prctile(fi,2.5);
prctile(fi,97.5)];
        xlswrite('livro1.xlsx',output,'Output','b24');
        outputp=[mean(f); median(f); mode(f); 2*sqrt(mean(f).*(1-
mean(f))/n_resamples); min(f); max(f); std(f); prctile(f,2.5);
prctile(f,97.5)];
        xlswrite('livro1.xlsx',outputp,'Output','l24');
        xlswrite('livro1.xlsx',fi,'fi','b3');
    end
end

telapsed=toc(tstart)
```

## ANEXO B

Este anexo contém a *função* 'inp_model' à qual o script descrito no anexo A recorre para importar os vectores modelos [M].

```
function b = inp_model(independent, D, w, z, E, t, r, F, C)


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                        Contadores                             %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
s=1;
n=2;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%               Input de elementos de primeira ordem            %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
B=independent;

for d=1:length(C)
    for j=1:length(t)

        if sum(unicode2native(char(E(j))))==sum(unicode2native(char(C(d))))
            B(n) = D(j);
            check1(s)=C(d);
            s=s+1;
        end

    end
    n = n+1;
end

n=n-1;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%               Input de elementos de Segunda ordem             %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for c=1:length(C)
    for v=(c):length(C)
        n=n+1;
        for a=1:(length(E)-length(t)) %length(t) exclui os elementos de
primeira ordem

            if
sum(unicode2native(char(C(c))))==sum(unicode2native(char(E(a+length(t)))))
& sum(unicode2native(char(C(v))))==sum(unicode2native(char(F(a))))

                B(n)=D(a+length(t));
                check1(s)=C(c);
                check2(s)=C(v);
                s=s+1;

            else if
sum(unicode2native(char(C(c))))==sum(unicode2native(char(F(a)))) &
sum(unicode2native(char(C(v))))==sum(unicode2native(char(E(a+length(t)))))%
```

```
Este else if comtempla situações que não estão contempladas no if anterior,
a ordem das variáveis neste caso encontra-se ao contrário

                B(n)=D(a+length(t));
                check1(s)=C(c);
                check2(s)=C(v);
                s=s+1;
                end
            end
        end
    end
end


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%    Acerto do tamanho da matriz caso seja necessário           %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if length(B)~=n
    B(n)=0;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%          Escreve matriz de verificação de modelo              %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
checkcomb=[check1; check2]'
b=B'


%CLEARVARS -EXCEPT b
clear independent D w z E t r F C s n B d j check1 check2 v c a checkcomb
```