

Influência da natureza do agregado grosso no comportamento do betão reforçado com fibras de aço

JOÃO CARLOS MARQUES BARBOSA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE
CONSTRUÇÃO**

Orientadora: Professora Ana Maria Quintela da Silva Proença Corrêa
de Queirós

Co-Orientador: Professor Doutor Afonso António de Serra Neves

OUTUBRO DE 2014

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014

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 - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.*

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 eletrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À minha Família

Querer o impossível é a melhor maneira de realizar o possível

Edgar Cardoso

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus orientadores, à Professora Doutora Ana Maria Quintela da Silva Proença Corrêa de Queirós bem como ao Professor Doutor Afonso António de Serra Neves, pela disponibilidade e apoio cedidos durante a realização da presente dissertação, os quais foram imprescindíveis para o sucesso da mesma. Um especial obrigado à Professora Ana Maria Proença pela oportunidade prestada em trabalhar neste tema e por todas as valiosas conversas e ensinamentos partilhados ao longo do corrente ano letivo.

Aos profissionais do Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção (LEMC) da FEUP – às Engenheiras Patrícia e Dora, Irene, Paulo, Gil, Cecília, Fernando, Manuel, Júlia e Paula – pelas facilidades e apoio criados na utilização dos equipamentos necessários e pela preciosa ajuda na parte experimental. Por fim, um agradecimento à Ana pela incansável disponibilidade que teve por todos nós.

Ao Engenheiro Erik Ulrix da BIU International, representante da N.V. BEKAERT S.A. em Portugal, pelas fibras disponibilizadas, ao Engenheiro Steven Pouillon pelos ensaios efectuados no *Concrete Laboratory* da Bekaert na Bélgica, ao Sr. Pedro Valter da SECIL S.A. pelo fornecimento do cimento, ao Sr. Arménio Soares SECIL-Britas S.A. pela disponibilização das britas, à SORGILA-Sociedade de Argilas S.A. por conceder as areias e à MC Bauchemie pelo adjuvante. A todas estas entidades e respetivos responsáveis um gentil agradecimento pelos materiais facultados, cruciais para o desenvolvimento do presente trabalho.

Aos meus amigos e colegas de curso, em especial aos colegas da opção, um obrigado por todo o apoio e partilha de informação bem como por todos os momentos de boa disposição proporcionados que tanto ajudaram a suplantar os momentos mais árduos. Agradeço a todos os meus restantes amigos que de forma direta ou indireta ajudaram na conclusão deste trabalho.

A todas as pessoas que pacientemente me ajudaram de forma cuidada e atenta na revisão da tese, contribuindo com os seus valiosos e importantes conhecimentos e opiniões.

Por último, mas não menos sentido, um muito obrigado à minha família pelo apoio e carinho concedidos ao longo de todo o meu percurso académico.

RESUMO

A durabilidade das estruturas de betão tem suscitado preocupação a nível mundial devido à degradação inesperada que estas têm vindo a apresentar. A deterioração do betão, será a principal causa desta degradação estrutural e, consequentemente, da diminuição da vida útil das estruturas.

O principal intento deste trabalho de investigação é o de aumentar o conhecimento atual relativamente ao uso e aplicação do BRFA (Betão Reforçado com Fibras de Aço), mais concretamente conhecer a influência que o uso de fibras metálicas (Dramix® 5D) tem na durabilidade de estruturas de betão reforçado com fibras de aço.

De forma a satisfazer os objetivos principais deste trabalho, procedeu-se à realização de ensaios de caracterização mecânica do betão simples e do betão reforçado com fibras de aço (ensaios de flexão, compressão e módulo de elasticidade) bem como ensaios indicadores de durabilidade (absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade e permeabilidade ao oxigénio). De modo a aumentar as variáveis, fez-se variar o tipo de agregado grosso base (britas e godos) bem como a dosagem de fibras empregues (sem fibras, 20 kg/m³, 40 kg/m³ e 60 kg/m³), tornando deste modo a presente investigação mais abrangente.

A comparação dos betões, um com brita e o outro com godo, com e sem fibras, é muito idêntica. Ambos contêm dosagens de cimento e quantidade adjuvante semelhantes, trabalhabilidade equivalente, e tensão de rotura à compressão do betão sem fibras também da mesma ordem. Os betões não apresentavam exsudação nem segregação. A adição de fibras não implicou o incremento da quantidade de água, mantendo os betões contudo trabalhabilidade idêntica à dos betões sem fibras.

Na primeira parte do trabalho é apresentada uma revisão dos conceitos fundamentais relativamente ao BRFA, suas propriedades e constituintes nomeadamente as fibras e os agregados. São ainda analisados fatores determinantes no desempenho das fibras de aço, assim como os fatores que influenciam a durabilidade do BRFA.

Finalmente, resultantes dos ensaios efetuados, são identificadas as principais conclusões e é apresentada uma breve síntese das linhas de investigação sugeridas para futuras investigações na área do BRFA.

PALAVRAS-CHAVE: betão reforçado com fibras de aço, fibras metálicas, durabilidade e agregados

ABSTRACT

The durability of concrete structures has sparked worldwide concern due to the unexpected degradation these structures have presented over time. The deterioration of the concrete is the main cause for this structural degradation and, consequently, for the decrease in the life span of the structures.

The main purpose of this research work is to increase the current knowledge regarding the use and application of SFRC (Fiber Reinforced Concrete Steel), specifically in determining the effect that the use of steel fibers (Dramix® 5D) has on the durability of concrete structures reinforced with steel fibers.

In order to meet the main aims of this work, mechanical characterization tests were conducted, both on plain concrete and reinforced concrete with steel fibers (bending tests, compression tests and modulus of elasticity). Durability indicator tests (water absorption through immersion, water absorption through capillary and permeability to oxygen) were also conducted on both types of concrete. In order to increase the variables in play, both the type of coarse aggregate base (crushed granite and natural round aggregate) and the dosage of fibers employed (no fibers, 20 kg/m³, 40 kg/m³ and 60 kg/m³) were made to vary, thus making this a more comprehensive investigation.

The comparison of concretes, one with crushed granite and the other with natural round aggregate, both with and without fiber, is very similar. All contain similar cement dosages and adjuvant, and present equivalent workability and compressive tensile strength of concrete without fibers. None of the concretes showed bleeding or segregation. The addition of fibers did not lead to the increase of the amount of water. The concretes with fiber maintained the same workability as those without fiber.

The first part of the work presents a review of the fundamental concepts related to SFRC, their properties and components, namely fibers and aggregates. Also analyzed in this part of the work are the determining factors in the performance of steel fibers, as well as factors that influence the durability of SFRC.

Finally, the main conclusions resulting from the tests performed are presented and a brief summary of the areas of research suggested for future investigation in the area SFRC is indicated.

KEYWORDS: steel fiber reinforced concrete, steel fibers, durability and aggregates

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	v
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2. ÂMBITO E OBJETIVO.....	1
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	1
2 BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO	3
2.1. INTRODUÇÃO.....	3
2.2. FIBRAS.....	4
2.2.1. TIPO DE FIBRAS	4
2.2.1.1. Modo de fabrico	5
2.2.2. FATORES QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO DAS FIBRAS	6
2.2.2.1. Forma	8
2.2.2.2. Comprimento	8
2.2.2.3. Diâmetro	10
2.2.2.4. Tensão de rotura	10
2.2.3. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM O SEU DESEMPENHO	10
2.2.3.1. Volume	10
2.2.3.2. Orientação e Distribuição das fibras.....	10
2.2.3.3. Propriedades do betão	11
2.2.3.4. Propriedades das fibras.....	12
2.2.4. PROPRIEDADES	13
2.2.4.1. Propriedades do betão fresco com fibras	13
2.2.4.2. Propriedades do betão endurecido com fibras.....	14
2.2.5. FRATURA DOS MATERIAIS COMPÓSITOS	17
2.2.6. INTERFACE FIBRA-MATRIZ	19
2.2.7. MECANISMOS DE REFORÇO PROPORCIONADOS PELAS FIBRAS DE AÇO.....	20
2.2.7.1. Deslizamento da fibra	20
2.2.7.2. Alongamento da fibra	20
2.2.7.3. Deslizamento e alongamento	21
2.3. REGULAMENTAÇÃO	21

2.4. APLICAÇÕES DE FIBRAS METÁLICAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	22
3 DURABILIDADE DO BETÃO	25
3.1. INTRODUÇÃO	25
3.2. FATORES QUE INFLUENCIAM A DURABILIDADE.....	26
3.3. CAUSAS DE DETERIORAÇÃO DO BETÃO	27
3.3.1. CAUSAS HUMANAS.....	27
3.3.1.1. Fase de conceção do projeto de estrutura e arquitetura	27
3.3.1.2. Fase de execução da obra	28
3.3.1.3. Fase de utilização da estrutura.....	28
3.3.2. CAUSAS NATURAIS	28
3.4. PARÂMETROS DE DESEMPENHO DA DURABILIDADE.....	29
3.4.1. POROSIDADE – ABSORÇÃO	29
3.4.2. ABSORÇÃO (CAPILARIDADE).....	30
3.4.3. PERMEABILIDADE	31
4 MATERIAIS UTILIZADOS, MÉTODOS SEGUIDOS E ENSAIOS REALIZADOS.33	
4.1. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	33
4.1.1. CIMENTO + CINZAS	33
4.1.2. ADJUVANTE	34
4.1.3. ÁGUA	34
4.1.4. FIBRAS	34
4.1.5. AGREGADOS.....	35
4.1.5.1. Classificação.....	35
4.1.5.2. Propriedades dos agregados.....	35
4.1.5.3. Ligação pasta de cimento/agregado.....	37
4.1.5.4. Agregados Finos.....	38
4.1.5.5. Agregado Grosso: Brita granítica e Godo rolado.....	39
4.1.5.6. Índice de Achatamento e Índice de Forma dos agregados grossos.....	41
4.2. MÉTODOS SEGUIDOS	42
4.2.1. PRODUÇÃO DO BETÃO.....	42
4.2.2. COLOCAÇÃO E COMPACTAÇÃO.....	48
4.2.3. CONDIÇÕES DE CURA	49
4.3. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS	50
4.3.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	50
4.3.2. FLEXÃO	50
4.3.3. MÓDULO DE ELASTICIDADE	51

4.3.4. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO À PRESSÃO ATMOSFÉRICA.....	51
4.3.5. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	53
4.3.6. PERMEABILIDADE AO OXIGÉNIO.....	54
5 BETÃO: RESULTADOS E ANÁLISE	57
5.1. INTRODUÇÃO.....	57
5.2. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	57
5.2.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (NP EN 12390-3:2009)	57
5.2.1.1. Resistência à compressão do betão com brita granítica obtida por ensaios de cubos (15x15x15 cm).....	58
5.2.1.2. Resistência à compressão do betão com godo rolado obtida por ensaios de cubos (15x15x15 cm).....	61
5.2.1.3. Resistência à compressão do betão com brita granítica obtida por ensaios de cilindros (ø15x30 cm)	64
5.2.1.4. Resistência à compressão do betão com godo rolado obtida por ensaios de cilindros (ø15x30 cm)	67
5.2.2. RESISTÊNCIA À FLEXÃO.....	69
5.2.2.1. Resistência à flexão do betão sem fibras contendo brita granítica com 35 dias à data de ensaio (NP EN 12390-5:2009)	69
5.2.2.2. Resistência à flexão do betão contendo brita granítica com 35 dias à data de ensaio (EN 14651:2005)	70
5.2.2.3. Resistência à flexão do betão sem fibras contendo godo rolado com 35 dias à data de ensaio (NP EN 1390-5:2009)	73
5.2.2.4. Resistência à flexão do betão contendo godo rolado com 35 dias à data de ensaio (EN 14651:2005)	73
5.2.2.5. Resistência à flexão do betão contendo brita granítica com 90 dias à data de ensaio (EN 14651:2005)	78
5.2.2.6. Resistência à flexão do betão contendo godo rolado com 90 dias à data de ensaio (EN 14651:2005)	81
5.2.3. MÓDULO DE ELASTICIDADE (DIN 1048-5:1991).....	84
5.2.3.1. Módulo de elasticidade do betão contendo brita granítica	84
5.2.3.2. Módulo de elasticidade do betão contendo godo rolado	86
5.2.3.3. Tensão de rotura dos cilindros utilizados na determinação do módulo de elasticidade produzidos com betão contendo brita granítica.....	88
5.2.3.4. Tensão de rotura dos cilindros utilizados na determinação do módulo de elasticidade produzidos com betão contendo godo rolado	90
5.2.4. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO (E 394-1993)	91
5.2.4.1. Absorção de água por imersão do betão contendo brita granítica e do betão contendo godo rolado com 35 dias de idade à data de ensaio	91
5.2.4.2. Absorção de água por imersão do betão contendo brita granítica com 90 dias de idade à data de ensaio	91

5.2.4.3. Absorção de água por imersão do betão contendo godo rolado com 90 dias de idade à data de ensaio	92
5.2.5. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE (RILEM TC 116-PCD).....	93
5.2.5.1. Absorção de água por capilaridade do betão contendo brita granítica com 35 dias de idade à data de ensaio.....	94
5.2.5.2. Absorção de água por capilaridade do betão contendo godo rolado com 35 dias de idade à data de ensaio.....	99
5.2.5.3. Absorção de água por capilaridade do betão contendo brita granítica com 90 dias de idade à data de ensaio.....	104
5.2.5.4. Absorção de água por capilaridade do betão contendo godo rolado com 90 dias de idade à data de ensaio.....	109
5.2.6. PERMEABILIDADE AO OXIGÉNIO (E 392-1993).....	114
5.2.6.1. Permeabilidade do betão com brita granítica	114
5.2.6.2. Permeabilidade do betão com godo rolado	114
5.3. COMPARAÇÃO DOS ENSAIOS E CORRELAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	115
5.3.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	115
5.3.1.1. Resistência à compressão de betões de brita granítica e godo rolado (cubos)	115
5.3.1.2. Resistência à compressão em cilindros (Ø15x30 cm) de brita granítica e godo rolado	117
5.3.2. RESISTÊNCIA À FLEXÃO	118
5.3.2.1. Resistência à flexão em betões de brita granítica e godo rolado com 35 dias de idade à data de ensaio (NP EN 12390-5:2009).....	118
5.3.2.2. Resistência à flexão em betões de brita granítica e godo rolado com 35 dias de idade à data de ensaio (EN 14651:2005)	118
5.3.2.3. Resistência à flexão em betões de brita granítica e godo rolado com 90 dias de idade à data de ensaio (EN 14651:2005)	119
5.3.3. MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	119
5.3.3.1. Módulos de elasticidade em betões de brita granítica e godo rolado.....	119
5.3.3.2. Tensões de rotura em betões de brita granítica e godo rolado	120
5.3.4. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO	120
5.3.4.1. Absorção de água por imersão em betões de brita granítica e godo rolado com 90 dias de idade à data de ensaio	120
5.3.5. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	121
5.3.5.1. Absorção de água por capilaridade em betões de brita granítica e godo rolado com 35 dias de idade à data de ensaio	121
5.3.5.2. Absorção de água por capilaridade em betões de brita granítica e godo rolado com 90 dias de idade à data de ensaio	122
6 CONCLUSÕES	123
6.1. APRECIACÕES GERAIS	123

6.2. ENSAIOS EXPERIMENTAIS	123
6.2.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	123
6.2.2. RESISTÊNCIA À FLEXÃO.....	124
6.2.3. MÓDULO DE ELASTICIDADE	124
6.2.4. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO	125
6.2.5. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	125
6.2.6. PERMEABILIDADE AO OXIGÉNIO	126
6.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Diferentes tipos de fibras metálicas existentes no mercado	5
Fig. 2.2 – Tipo de fibras de aço presentes no mercado. Adaptado de Naaman (2003)	6
Fig. 2.3 – Variação da resistência residual pós-fissuração com o aumento do nível de deslocamento. Adaptado de Figueiredo; Torneri (2006)	8
Fig. 2.4 – BRFA no qual existe compatibilidade dimensional entre as fibras e os agregados (A) e onde o mesmo não ocorre (B). Figueiredo (2000)	9
Fig. 2.5 – Efeito de fibras mais pequenas em microfissuras (A) e efeito de fibras maiores em macrofissuras (B). Adaptado de Mehta, P.K. e Monteiro, P.J.M.	9
Fig. 2.6 – Relação entre a resistência no betão e a resistência da fibra. Adaptado de Vitt (2011)	11
Fig. 2.7 – Relação entre vários parâmetros das fibras. Adaptado de Vitt (2011)	13
Fig. 2.8 – Distribuição de tensões em betão simples. Adaptado de Vitt (2011)	18
Fig. 2.9 – Pontes de tensão nas fibras de aço no betão. Adaptado de Vitt (2011)	18
Fig. 2.10 – Alongamento da fibra. S.S., N.V.B. (2012)	21
Fig. 4.1 – Cimento Tipo IV, 32,5 SR	33
Fig. 4.2 – Adjuvante P3140	34
Fig. 4.3 – Fibras Dramix® 5D 65/60 BG	34
Fig. 4.4 – Forma das partículas. Exemplo de uma classificação usada em petrografia. Adaptado de Coutinho (1999)	36
Fig. 4.5 – a) Areia 0/2 e b) Areia 0/4	38
Fig. 4.6 – Curvas granulométricas (série base + série 2) das areias	38
Fig. 4.7 – a) Brita 14/20, b) Brita 6/14 e c) Brita 4/8	39
Fig. 4.8 – Curvas granulométricas (série base + série 2) das britas graníticas	40
Fig. 4.9 – a) Godo 10/20 e b) Godo 4/12	40
Fig. 4.10 – Curvas granulométricas (série base + série 2) dos godos rolados	41
Fig. 4.11 – Processo de amassadura	43
Fig. 4.12 – Ensaio de teor em ar	49
Fig. 4.13 – Provetes mantidos no laboratório, cobertos por uma película de polietileno	50
Fig. 4.14 – Ensaio de compressão	50
Fig. 4.15 – Ensaio de flexão (LEMC)	51
Fig. 4.16 – Ensaio de módulo de elasticidade	51
Fig. 4.17 – Provetes parcialmente imersos em água	52
Fig. 4.18 – Selagem no topo dos provetes	54
Fig. 4.19 – Provete na câmara de ensaio	55
Fig. 5.1 – Resistência à compressão média do betão com brita granítica (cubos)	59
Fig. 5.2 – Resistência à compressão média do betão com godo rolado (cubo)	62
Fig. 5.3 – Modo de fratura do compósito BRFA com brita granítica (esq.) e godo rolado (dir.)	62
Fig. 5.4 – Resistência à compressão média do betão com brita granítica (cilindros)	65

Fig. 5.5 – Resistência à compressão médio do betão com godo rolado (cilindros)	68
Fig. 5.6 – Curvas da resistência à flexão de betão com brita granítica (20 kg/m ³)	70
Fig. 5.7 – Curvas da resistência à flexão de betão com brita granítica (40 kg/m ³)	71
Fig. 5.8 – Curvas da resistência à flexão de betão com brita granítica (60 kg/m ³)	72
Fig. 5.9 – Curvas da resistência à flexão de betão com godo rolado (20 kg/m ³)	74
Fig. 5.10 – Curvas da resistência à flexão de betão com godo rolado (40 kg/m ³)	75
Fig. 5.11 – Curvas da resistência à flexão de betão com godo rolado (60 kg/m ³)	76
Fig. 5.12 – Curvas da resistência à flexão de betão com brita granítica (20 kg/m ³)	78
Fig. 5.13 – Curvas da resistência à flexão de betão com brita granítica (40 kg/m ³)	79
Fig. 5.14 – Curvas da resistência à flexão de betão com brita granítica (60 kg/m ³)	80
Fig. 5.15 – Curvas da resistência à flexão de betão com godo rolado (20 kg/m ³)	81
Fig. 5.16 – Curvas da resistência à flexão de betão com godo rolado (40 kg/m ³)	82
Fig. 5.17 – Curvas da resistência à flexão de betão com godo rolado (60 kg/m ³)	83
Fig. 5.18 – Módulo de elasticidade médio do betão com brita granítica	85
Fig. 5.19 – Módulo de elasticidade médio do betão com godo rolado	87
Fig. 5.20 – Tensão de rotura média dos cilindros utilizados na obtenção do módulo de elasticidade produzidos com betão contendo brita granítica	89
Fig. 5.21 – Tensão de rotura média dos cilindros utilizados na obtenção do módulo de elasticidade produzidos com betão contendo godo rolado	91
Fig. 5.22 – Absorção média de água por imersão do betão com brita granítica	92
Fig. 5.23 – Absorção média de água por imersão do betão com godo rolado	93
Fig. 5.24 – Absorção média de água por capilaridade do betão com brita granítica (35 dias de idade)	98
Fig. 5.25 – Variação da absorção de água por capilaridade com o tempo (35 dias de idade)	98
Fig. 5.26 – Absorção média de água por capilaridade do betão com godo rolado (35 dias de idade)	103
Fig. 5.27 – Variação da absorção de água por capilaridade com o tempo (35 dias de idade)	103
Fig. 5.28 – Absorção média de água por capilaridade do betão com brita granítica (90 dias de idade)	108
Fig. 5.29 – Variação da absorção de água por capilaridade com o tempo (90 dias de idade)	108
Fig. 5.30 – Absorção média de água por capilaridade do betão com godo rolado (90 dias de idade)	113
Fig. 5.31 – Variação da absorção de água por capilaridade com o tempo (90 dias de idade)	113
Fig. 5.32 – Comparação de resistências à compressão médias entre betões de brita granítica e godo rolado (cubos)	116
Fig. 5.33 – Comparação de resistências à compressão médias entre betões de brita granítica e godo rolado (cilindros)	117
Fig. 5.34 – Variação de resistências à flexão entre betões de brita granítica e godo rolado	118
Fig. 5.35 – Comparação de módulos de elasticidade médios entre betões de brita granítica e godo rolado	119
Fig. 5.36 – Comparação de tensões de rotura médias entre betões de brita granítica e godo rolado	120

Fig. 5.37 – Comparação da absorção média de água por imersão entre betões de brita granítica e godo rolado	121
Fig. 5.38 – Comparação da absorção média de água ao fim de 24h entre betões de brita granítica e godo rolado	121
Fig. 5.39 – Comparação da absorção média de água ao fim de 24h entre betões de brita granítica e godo rolado	122

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Métodos de obtenção de fibras.....	5
Quadro 2.2 – Efeito do comprimento e diâmetro no desempenho do BRFA.....	12
Quadro 2.3 – Relação entre a geometria da fibra e o desempenho desta. Adaptado de Vitt (2011) ...	12
Quadro 2.4 – Aplicações do BRFA e suas vantagens. Adaptado de Barros (1996).....	23
Quadro 3.1 – Gastos na construção, em alguns países da Europa, afetos às parcelas de construções novas e manutenção. Adaptado de Ueda & Takewaka (2007).....	26
Quadro 4.1 – Valores de índices de achatamento.....	41
Quadro 4.2 – Valores de índices de forma	42
Quadro 4.3 – Tipo e quantidade de provetes produzidos por amassadura e idade à data do ensaio (B0 e B20).....	44
Quadro 4.4 – Tipo e quantidade de provetes produzidos por amassadura e idade à data do ensaio (B40 e B60).....	45
Quadro 4.5 – Tipo e quantidade de provetes produzidos por amassadura e idade à data do ensaio (G0 e G20).....	46
Quadro 4.6 – Tipo e quantidade de provetes produzidos por amassadura e idade à data do ensaio (G40 e G60).....	47
Quadro 4.7 – Métodos de compactação utilizados em cada amassadura	48
Quadro 4.8 – Ensaio de caracterização do betão fresco	49
Quadro 5.1 – Resistências à compressão do betão com brita granítica (cubos).....	58
Quadro 5.2 – Variação das tensões entre o betão sem fibras e os betões com fibras (cubos).....	60
Quadro 5.3 – Resistências à compressão do betão com brita granítica (cubos).....	60
Quadro 5.4 – Resistências à compressão do betão com godo rolado (cubos)	61
Quadro 5.5 – Variação das tensões entre o betão sem fibras e os betões com fibras (cubos).....	63
Quadro 5.6 – Resistências à compressão do betão com godo (cubos)	63
Quadro 5.7 – Resistências à compressão do betão com brita granítica (cilindros).....	64
Quadro 5.8 – Variação das tensões entre o betão sem fibras e os betões com fibras (cilindros).....	66
Quadro 5.9 – Resistências à compressão do betão com godo rolado (cilindros).....	67
Quadro 5.10 – Variação das tensões entre o betão sem fibras e os betões com fibras (cilindros).....	68
Quadro 5.11 – Resistências à flexão do betão com brita granítica.....	69
Quadro 5.12 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do betão com fibras (20 kg/m ³ de fibras 5D). 70	
Quadro 5.13 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do betão com fibras (40 kg/m ³ de fibras 5D). 71	
Quadro 5.14 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do betão com fibras (60 kg/m ³ de fibras 5D). 72	
Quadro 5.15 – Resistências à flexão do betão com godo rolado	73
Quadro 5.16 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do betão com fibras (20 kg/m ³ de fibras 5D). 74	
Quadro 5.17 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do betão com fibras (40 kg/m ³ de fibras 5D). 75	
Quadro 5.18 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do betão com fibras (60 kg/m ³ de fibras 5D). 76	

Quadro 5.19 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do betão com fibras (20 kg/m ³ de fibras 5D) .	78
Quadro 5.20 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do betão com fibras (40 kg/m ³ de fibras 5D) .	79
Quadro 5.21 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do betão com fibras (60 kg/m ³ de fibras 5D) .	80
Quadro 5.22 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do betão com fibras (20 kg/m ³ de fibras 5D) .	81
Quadro 5.23 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do betão com fibras (40 kg/m ³ de fibras 5D) .	82
Quadro 5.24 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do betão com fibras (60 kg/m ³ de fibras 5D) .	83
Quadro 5.25 – Módulos de elasticidade do betão com brita granítica	84
Quadro 5.26 – Módulos de elasticidade do betão com godo rolado	86
Quadro 5.27 – Tensões de rotura do betão com brita granítica.....	88
Quadro 5.28 – Tensões de rotura do betão com godo rolado	90
Quadro 5.29 – Absorção de água do betão com brita granítica.....	92
Quadro 5.30 – Absorção de água do betão com godo rolado	93
Quadro 5.31 – Absorção de água do betão com brita granítica (B0).....	94
Quadro 5.32 – Absorção de água do betão com brita granítica (B20).....	95
Quadro 5.33 – Absorção de água do betão com brita granítica (B40).....	96
Quadro 5.34 – Absorção de água do betão com brita granítica (B60).....	97
Quadro 5.35 – Absorção de água do betão com godo rolado (G0)	99
Quadro 5.36 – Absorção de água do betão com godo rolado (G20)	100
Quadro 5.37 – Absorção de água do betão com godo rolado (G40)	101
Quadro 5.38 – Absorção de água do betão com godo rolado (G60)	102
Quadro 5.39 – Absorção de água do betão com brita granítica (B0).....	104
Quadro 5.40 – Absorção de água do betão com brita granítica (B20).....	105
Quadro 5.41 – Absorção de água do betão com brita granítica (B40).....	106
Quadro 5.42 – Absorção de água do betão com brita granítica (B60).....	107
Quadro 5.43 – Absorção de água do betão com godo rolado (G0)	109
Quadro 5.44 – Absorção de água do betão com godo rolado (G20)	110
Quadro 5.45 – Absorção de água do betão com godo rolado (G40)	111
Quadro 5.46 – Absorção de água do betão com godo rolado (G60)	112
Quadro 5.47 – Permeabilidade do betão com brita granítica.....	114
Quadro 5.48 – Permeabilidade do betão com godo rolado.....	115

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A – área do provete

A_i – absorção de água por imersão

BRF – betão reforçado com fibras

BRFA - betão reforçado com fibras de aço

d_f – diâmetro da fibra

EC2 – Eurocódigo 2

$f_{c,m}$ – resistência à compressão média do betão

f_L – limite de proporcionalidade

f_{R1} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 0,47 mm

f_{R2} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 1,32 mm

f_{R3} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 2,17 mm

f_{R4} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 3,02 mm

K – permeabilidade ao oxigénio

l – comprimento do provete

l_f – comprimento da fibra

w – absorção de água por capilaridade

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A durabilidade das estruturas de betão tem suscitado preocupação a nível mundial pois tem-se vindo a verificar uma degradação inesperada dessas estruturas, com tendência a aumentar. A deterioração do betão será a principal causadora desta degradação estrutural e da diminuição da vida útil das estruturas, que começa por afetar o recobrimento, seguindo-se a corrosão da armadura corrente.

A interação entre a camada superficial do betão e o meio ambiente é o principal fator responsável pelo início de diversos processos de degradação. O desencadear destes processos pode ter várias outras causas porém apenas um desfecho: a diminuição do valor patrimonial e/ou consequente aumento excessivo dos custos de reparação/manutenção. Prevê-se, por isso, que num futuro não muito distante, mais de metade do orçamento destinado a obras públicas, seja gasto na reabilitação ou reparação de estruturas degradadas.

Assim, por forma a assegurar uma apropriada durabilidade do betão, devem ser tidos em conta outros requisitos como a composição do betão, a colocação e condições de cura, evitando que o comportamento mecânico continue a ser o único critério de desempenho.

Existem pesquisas sobre as causas da deterioração de betões convencionais (sem fibras de aço), nas quais se realizaram ensaios que pretendiam simular os processos reais de deterioração dos mesmos. Porém, para betões reforçados com fibras de aço, a bibliografia é ainda parca no que toca a aspetos relacionados com a sua durabilidade.

1.2. ÂMBITO E OBJETIVO

A presente dissertação pretende ser um complemento, da escassa bibliografia até aqui publicada, sobre a influência que o uso de fibras metálicas (Dramix® 5D) tem na durabilidade de estruturas de betão reforçado com fibras de aço. Pretende-se assim aumentar os conhecimentos atuais relacionados ao uso e aplicação de BRF, fundamentalmente de BRFA.

Por forma a contribuir com mais elementos para esta temática, procedeu-se à realização de ensaios de caracterização mecânica do betão simples e do betão reforçado com fibras de aço (ensaios de flexão, compressão e módulo de elasticidade) bem como ensaios indicadores de durabilidade (absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade e permeabilidade ao oxigénio).

De modo a aumentar as variáveis, tornando assim a presente investigação mais abrangente, fez-se variar o tipo de agregado grosso base (britas e godos) bem como a dosagem de fibras empregues (sem fibras, 20 kg/m³, 40 kg/m³ e 60 kg/m³).

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

De maneira a alcançar os objetivos propostos, a presente dissertação foi estruturada em seis capítulos.

No primeiro e atual capítulo, justifica-se o interesse e pertinência do trabalho expondo-se os objetivos, as estratégias e a organização seguida.

O capítulo dois apresenta a informação existente sobre as fibras de aço e a sua aplicação no betão, sendo feito para isso um resumo do estado-de-arte sobre este tema. Este capítulo apresenta também os vários tipos de fibras, as suas principais propriedades assim como os fatores e parâmetros que influem no desempenho destas. Aspetos ligados à interação entre a fibra e a matriz que governam o comportamento do compósito são também aqui explicados. É igualmente feita uma breve abordagem à regulamentação e recomendações seguidas atualmente e por fim, descrevem-se as principais aplicações contemporâneas do BRFA.

No capítulo três é feita uma revisão dos principais fatores que afetam a durabilidade do betão. Os fatores que degradam o betão (causas humanas e naturais) bem como os parâmetros de desempenho da durabilidade (a porosidade, a absorção e a permeabilidade aos gases) são descritos e abordados neste capítulo.

Uma breve descrição dos materiais utilizados, da metodologia adotada e dos ensaios realizados para medição dos parâmetros supracitados, é efetuada no capítulo quatro. É também neste capítulo feita uma pequena explicação dos diferentes tipos de agregados que podem ser utilizados no fabrico de BRFA, tendo sido dada maior incidência aos agregados grossos (brita granítica e godo rolado) dado o aspeto primordial que estes apresentam na presente dissertação.

No capítulo cinco são apresentados os resultados experimentais seguindo-se uma análise e comparação de resultados.

Por fim, no capítulo seis tecem-se os comentários finais da dissertação, que pretendem apresentar as conclusões resultantes dos ensaios efetuados, assim como uma breve síntese das linhas de investigação sugeridas para futuras investigações na área do BRFA.

BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

2.1. INTRODUÇÃO

A relação entre o aço e o betão sempre foi considerada como uma grande impulsionadora da construção moderna. O betão é forte em compressão mas débil à tração e, frágil por natureza. Para compensar esta fragilidade, tem sido associado aço ao betão de forma a suportar a resistência à tração em carência. Um reforço metálico tradicional é capaz de distribuir as forças de tração responsáveis pelas fissuras e posterior rotura do betão. Embora este sistema tenha tido sucesso durante longos anos, o mesmo apresenta uma série de desvantagens associadas.

O aço é dispendioso, de difícil transporte e armazenamento. A sua colocação exige dispêndio de tempo e consequentemente elevados custos laborais. Impõe ainda, em locais de difícil acesso, grandes dificuldades de colocação. O principal inconveniente do uso do aço, prende-se com o facto deste ser altamente corrosível, provocando problemas na “saúde” do betão. Estes danos no reforço do betão podem conduzir à falha da estrutura. Quando o betão apresenta estes sintomas, a sua reparação torna-se demasiado dispendiosa, podendo haver necessidade de demolir a estrutura em causa.

Muitos engenheiros e projetistas acreditam que a solução para esses problemas poderá estar no recurso a alternativas ao reforço tradicional. Assim, é neste contexto que o uso de fibras poderá ser uma alternativa económica e tecnicamente viável.

Pertinente será referir que o uso de fibras para reforçar outros materiais tem vindo a ser usado desde a antiguidade. Tijolos cozidos ao sol eram vulgarmente reforçados com palha (Antigo Egito), esteiras de palha serviam como reforço nos primórdios da construção de habitações chinesas e japonesas, bem como crina de cavalo reforçava argamassa em tempos ancestrais.

Há quem creia que o amianto é um material recente, porém evidências indicam que as suas fibras já eram utilizadas para reforçar aplicações de barro há cerca de 4500 anos atrás. Todavia, foi apenas por volta da década de 1860, durante a revolução industrial, que se recorreu às fibras como alternativa moderna de reforço. Uma dessas fibras foram as de amianto, que passaram a ser utilizadas por grandes construtores civis, tendo o seu uso sido bastante banalizado. A descoberta, nos anos 60 do século passado, dos efeitos malignos para a saúde, resultantes da utilização de amianto nas construções, conduziu à necessidade de substituição deste tipo de fibras e consequente crescimento e desenvolvimento de outras menos nefastas e com propriedades de reforço semelhantes. (Proença, A.M., 2004)

A primeira utilização de fios, agulhas e chapas de aço para melhorar determinadas características do betão data de 1910. Porém apenas a partir de 1960, se realizaram as primeiras investigações, nos E.U.A, sobre as vantagens do uso das fibras metálicas. As fibras poliméricas surgiram para uso comercial em finais dos anos 70, enquanto que a difusão das fibras de vidro remonta aos anos 80 e as fibras de carbono, atraíram muita atenção por volta dos anos 90. Atualmente, tanto fibras sintéticas, metálicas bem como naturais são utilizadas. (Li, V.C., 2000)

Em relação ao mercado europeu, as fibras de aço para reforço de betão foram introduzidas comercialmente na segunda metade dos anos 70 do século passado. Nenhuma norma ou recomendação estava disponível à época, o que causou um grande obstáculo na difusão e aceitação desta nova tecnologia. Inicialmente, as fibras metálicas eram na sua generalidade usadas como substitutas de

armaduras secundárias ou como meio de controlo de fissuras em zonas menos críticas das estruturas. Contudo, hoje em dia, o uso de fibras metálicas abrange outros âmbitos, sendo bastante comum a sua aplicação como principal e único reforço para lajes de pisos industriais, betão projetado e produção de produtos em betão pré-fabricado. São também consideradas com propósito de reforços estruturais em lajes sobre estacas, total substituição do reforço padrão utilizado em segmentos de túneis, caves em betão, lajes de fundação e reforço ao corte em elementos pré-esforçados. (MIPENZ, A.R.)

A evolução para aplicações estruturais foi o maior e mais natural resultado do progresso feito nas tecnologias usadas em BRFA. Existe atualmente uma vasta gama de fibras metálicas disponíveis no mercado. Um determinado comportamento pode ser alcançado de diferentes modos alterando para isso diferentes aspetos como o tipo de fibras, a dosagem e a resistência do betão. Esse mesmo comportamento é baseado em ensaios normalizados em vigas e painéis. (MIPENZ, A.R.)

Deste modo, recorrendo ao correto emprego de fibras metálicas em composições de matriz cimentícia, consegue-se alcançar melhorias em termos de absorção de energia, ductilidade, comportamento sob fendilhação e resistência a ações dinâmicas e estáticas.

Importa, no entanto, ressaltar que as fibras metálicas, com exceção das inoxidáveis, sofrem do mesmo problema do aço tradicional, ou seja, são passíveis de sofrer corrosão. No entanto, atendendo ao pequeno diâmetro da fibra, o produto de oxidação tem um volume diminuto incapaz de provocar fissuração do betão. O fato das fibras estarem isoladas também impede que a corrosão de uma fibra se propague à outra. É desta forma crucial compreender o efeito que as fibras de aço têm na durabilidade do betão. É assim neste ponto que se insere a pertinência dos ensaios experimentais levados a cabo ao longo da corrente dissertação, os quais pretendem dar resposta a estas indagações.

Assegurar o comportamento de fibras metálicas em BRFA é um tópico complexo, por isso, especificar o desempenho e durabilidade requerido por esse material de modo a alcançar na estrutura final o comportamento que foi assumido na fase de dimensionamento torna-se assim o maior desafio enfrentado pelos engenheiros aquando da elaboração do projeto.

2.2. FIBRAS

2.2.1. TIPO DE FIBRAS

Como é sabido, atualmente existe uma panóplia de fibras no mercado. Cada um dos diferentes tipos existentes pretende dar resposta a vários requisitos, consoante a função e desempenho que se pretende para cada uma dessas fibras, sendo por isso um vasto leque delas usado no betão. Para cada aplicação é preciso determinar qual o tipo de fibra que melhor satisfaz uma aplicação “ótima” do betão. Os diferentes tipos de fibras usados podem ser separados em três grandes grupos: as fibras sintéticas, as fibras naturais e as fibras metálicas. Por forma a não apresentar uma lista demasiado exaustiva, até porque não é esse o intuito do presente trabalho, pode-se enumerar os seguintes tipos de fibras:

- Sintéticas – polipropileno, nylon, polietileno, poliéster, carbono e vidro;
- Naturais – madeira, côco, juta, bambu, sisal, amianto, entre outras;
- Metálicas – fibras de aço.

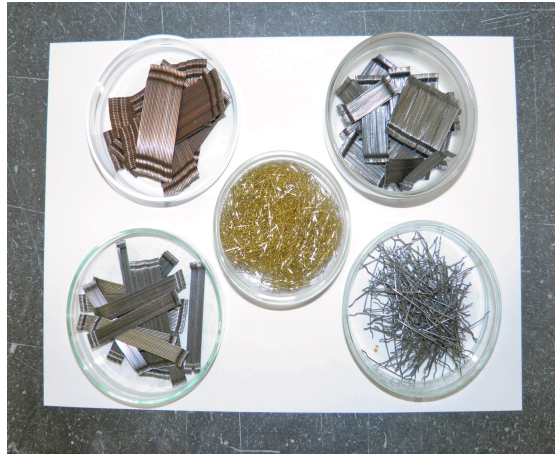


Fig. 2.1 – Diferentes tipos de fibras metálicas existentes no mercado

Embora normalmente aceite, é erradamente comum assumir-se que todos estes diferentes tipos de fibras atuam da mesma maneira e que a substituição entre fibras é possível sem causar prejuízo. Deve-se sempre ter em conta que desígnios e desempenhos se pretende obter e daí proceder a uma cautelosa escolha do tipo de fibra.

2.2.1.1. Modo de fabrico

Tendo por base a NP EN 14889:2008, podem definir-se os seguintes métodos de obtenção e fabrico de fibras:

Quadro 2.1 – Métodos de obtenção de fibras

Parte 1: Fibras de aço	Grupos	I. Fio estirado a frio
		II. Cortado de chapa
		III. Extraído a quente
		IV. Fio estirado a frio por aplainamento
		V. Extraído de blocos de aço por fresagem
Parte 2: Fibras Poliméricas	Classe I: Micro Fibras	Diâmetro < 0,3mm
	Classe II: Macro Fibras	Diâmetro > 0,3mm

Como a presente dissertação trata de fibras de aço (Parte 1), doravante apenas será dada atenção a esse tipo de fibras. Sempre que for feita referência a fibras, estas implicitamente serão de aço, caso indicação em contrário.

Posto isto, as fibras produzidas segundo os métodos dos Grupos II e IV utilizam-se consideravelmente, no entanto, atualmente as fibras mais usadas são as pertencentes ao Grupo I. Tal facto se deve ao desempenho que o tipo de fibras assim fabricado proporciona ao betão quando comparado com os

restantes métodos de fabrico. Fazem parte deste mesmo grupo as fibras usadas no presente trabalho experimental.

Por seu lado, as fibras dos Grupos III e V apresentam pouca relevância devido às suas características e consequente pouca utilização sendo por isso desvalorizadas. (Vitt, G., 2011)

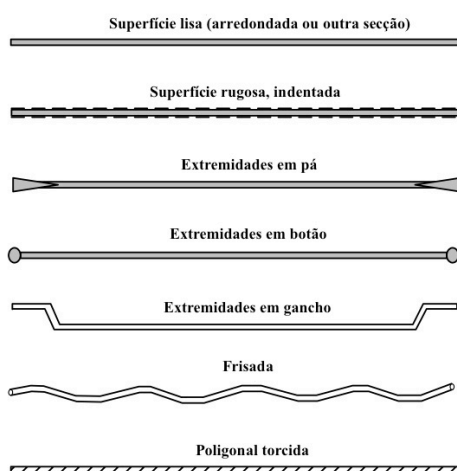
Acrescenta-se ainda que o aço das fibras de textura macia ou dura pode apresentar um revestimento (galvanização) funcionando este como uma proteção anticorrosiva. As fibras podem apresentar-se de uma de duas formas: isoladas ou em bandas, aglutinadas por uma cola que na presença de água permite que as fibras se soltem facilmente. Esta banda pretende evitar a formação de ouriços entre as fibras.

2.2.2. FATORES QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO DAS FIBRAS

As propriedades mecânicas do BRFA são influenciadas por diversos parâmetros, incluindo aqueles que se relacionam com a dosagem de fibras, com a sua geometria, nomeadamente: forma, comprimento e diâmetro, assim como as características do aço.

Nos últimos trinta anos, foram introduzidas no mercado, por vários fabricantes, fibras com geometria melhorada. Estas oferecem melhores desempenhos comparativamente às fibras lisas. Hoje em dia as fibras adicionadas a uma matriz cimentícia possuem, em geral, uma ancoragem mecânica. Não obstante, graças aos diferentes processos de fabrico e diferentes materiais usados na sua produção, as propriedades mecânicas das fibras como a eficiência da ancoragem mecânica e a resistência à tração, diferem entre os vários fabricantes, mesmo considerando fibras visivelmente semelhantes. Estas diferenças influem no comportamento ao arrancamento de uma fibra e, por conseguinte, no comportamento mecânico de um material compósito reforçado com fibras.

Fig. 2.2 – Tipo de fibras de aço presentes no mercado.
Adaptado de Naaman (2003)



2.2.2.1. Forma

Além das características do aço utilizado na produção da fibra, importa também ter em conta a sua forma pois esta irá afetar diretamente o modo como ela interage com a matriz envolvente. Assim, quanto ao fator forma, as fibras podem diferenciar-se quanto à secção, corpo e extremidades.

A secção pode apresentar-se circular, semicircular, retangular ou totalmente irregular. Quanto ao corpo, este ou é liso ou, com a finalidade de aumentar a aderência, rugoso.

Ainda dentro do aspeto forma, mas no que respeita às extremidades, estas podem ser lisas ou possuir ancoragens de variados tipos, como por exemplo em gancho. Segundo Figueiredo e Torneri (2006), observa-se que as fibras com ancoragens, apresentam uma resistência residual maior para os menores níveis de deformação, sendo que por outro lado, fibras sem qualquer tipo de ancoragem nas extremidades, exibem uma maior resistência residual para as maiores deflexões. Esta afirmação não pode ser generalizada, pois a tensão de rotura do betão e as características do aço das fibras alteram completamente a conclusão apresentada por Figueiredo e Torneri.

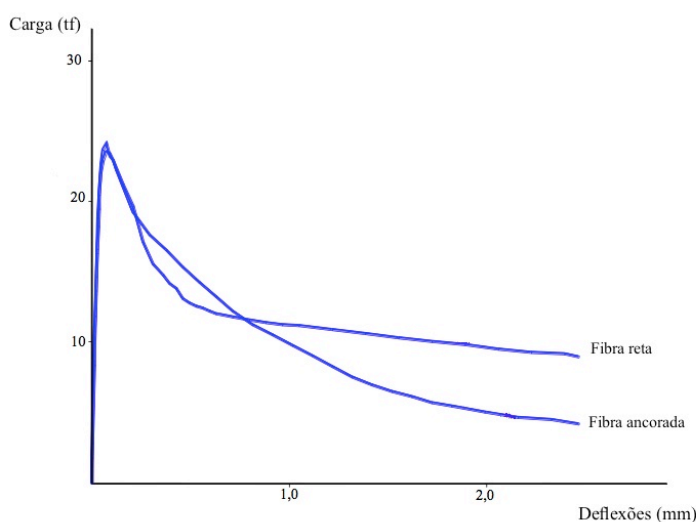


Fig. 2.3 – Variação da resistência residual pós-fissuração com o aumento do nível de deslocamento. Adaptado de Figueiredo; Torneri (2006)

Desta maneira se infere que, as distintas formas atribuídas às fibras de aço associam um mecanismo singular de ligação entre as fibras e a matriz.

Contudo, para o mesmo tipo de ancoragem, o desempenho da fibra é também ele determinado pelo seu comprimento e diâmetro.

2.2.2.2. Comprimento

Sem prejuízo do exposto no ponto anterior, comprovou-se estatisticamente que o fator forma não pode ser considerado como o único e exclusivo parâmetro geométrico a definir o comportamento do compósito. Tal como referido anteriormente, o fator comprimento deverá também ser tido em conta como variável que influencia o comportamento do betão. (Figueiredo, A.D.d., 2011)

Em primeira instância, deve-se sempre garantir uma compatibilidade dimensional entre os agregados e as fibras para desta forma assegurar que as últimas intercetem com maior regularidade a fissura gerada

no compósito, caso esta ocorra. Por outras palavras, devem ser utilizadas fibras que possuam comprimentos iguais ou superiores ao dobro da maior dimensão do agregado empregue no fabrico do betão (normalmente o comprimento das fibras varia entre valores de 30 mm a 60 mm). (Maidl, B. apud Figueiredo, A.D.d., 2011, p.46) Com isto se pretende que as fibras possam unir o intervalo entre dois agregados, local onde geralmente se iniciam as fendas. (Vandewalle, M., 2005) Por outro lado, quanto menor o comprimento da fibra em relação à dimensão máxima do agregado, maior irá ser a inclinação da fibra influenciada pelo agregado, em relação à superfície de fratura. Assim, a eficiência da fibra como ponte de transferência de tensões será menor.

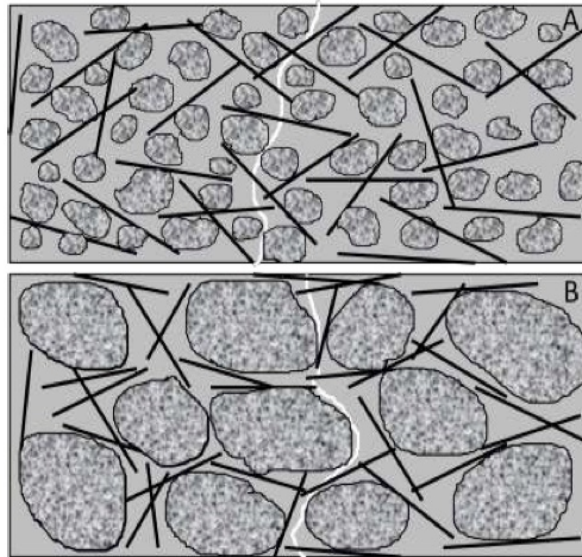


Fig. 2.4 – BRFA no qual existe compatibilidade dimensional entre as fibras e os agregados (A) e onde o mesmo não ocorre (B).
Figueiredo (2000)

Conclui-se desta forma que, quando se pretende unir um grande número de microfissuras numa zona de carga e de modo a evitar tensões localizadas, é necessário ter um grande número de fibras pequenas pois a distribuição uniforme de fibras de pequenas dimensões pode aumentar a força e ductilidade do compósito. Embora as fibras longas sejam necessárias para unir fissuras descontínuas de maiores dimensões sujeitas a cargas mais elevadas, o seu volume deve ser inferior ao volume de fibras pequenas.

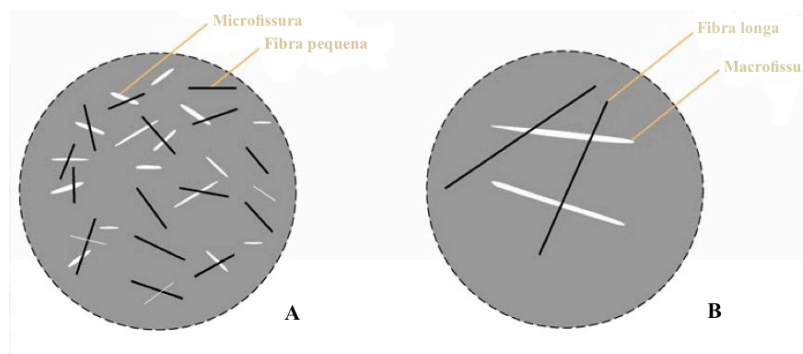


Fig. 2.5 – Efeito de fibras mais pequenas em microfissuras (A) e efeito de fibras maiores em microfissuras (B). Adaptado de Mehta, P.K. e Monteiro, P.J.M.

2.2.2.3. Diâmetro

No que respeita à seção transversal das fibras, habitualmente, os valores do diâmetro variam entre 0,4 mm e um máximo de 1,3 mm. Por sua vez, nas fibras de seção retangular, a menor dimensão varia entre 0,15 e 0,64 mm e a maior entre 0,25 e 2,03 mm.

Quanto menor for o diâmetro, menor será a área de contato da fibra com a matriz envolvente, o que conduzirá a uma menor carga que a fibra será capaz de suportar durante o seu arrancamento.

De referir ainda que, o desempenho das fibras aumenta com o aumento de comprimento da fibra e diminuição do seu diâmetro. As razões para tal fenómeno prendem-se com o facto de um maior comprimento proporcionar uma melhor ancoragem e um diâmetro reduzido permitir um número maior de fibras por kg. (Vitt, G., 2011)

2.2.2.4. Tensão de rotura

Outro aspeto importante no desempenho das fibras é a correta escolha da sua tensão de rotura. Isto é devido à forma como as fibras reforçam o betão: há fibras que necessitam de ser lentamente retiradas da matriz cimentícia. O sistema de ancoragem, normalmente ganchos na extremidade, devem-se deformar e fornecer resistência suficiente para serem retirados corretamente. Como a resistência da fibra é relativamente baixa, deve-se evitar a sua rotura. Caso contrário, a força de rotura e consequentemente a ductilidade do compósito reduz-se muito precocemente. Por outro lado, com betões de alta resistência e fibras de aço de alta resistência e deformabilidade, a deformação do gancho é praticamente nula (caso das fibras Dramix® 5D). (Vitt, G., 2011)

2.2.3. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM O SEU DESEMPENHO

2.2.3.1. Volume

Os mecanismos de resistência residual são reforçados com base na quantidade de fibras que atravessam as fendas. O número destas últimas aumenta conforme aumenta a quantidade de fibras presentes na composição do betão, embora as suas dimensões sejam mais reduzidas. Contudo, há que ter em conta que a partir de uma determinada percentagem de fibras existe uma maior propensão para uma aglomeração das mesmas, comprometendo assim a trabalhabilidade da mistura e, inevitavelmente, as propriedades mecânicas do BRFA endurecido.

Em situações correntes de amassadura, a utilização de um volume de fibras de aço superior a 2% torna a amassadura árdua, podendo ainda levar à aglomeração das fibras, segregação do betão e dificuldade em misturar os constituintes da composição. (Naaman, A.E., 2003)

Existe porém, um volume mínimo de fibras que deve estar presente na composição do BRFA de modo a ser assegurado um reforço homogéneo.

2.2.3.2. Orientação e Distribuição das fibras

A posição que as fibras ocupam na matriz, bem como a orientação das mesmas, influi na eficiência e propriedades mecânicas do BRFA. Estes argumentos são atestados por estudos realizados por (Gysel apud Gomes, J., 2013, p.15) nos quais comprovou que, quanto mais alinhadas estiverem as fibras na direção das tensões de tração, mais eficazes são.

Aumentos na inclinação das fibras em relação à orientação perpendicular à superfície da fenda criam um efeito de resistência suplementar ao arrancamento. Este efeito ocorre graças à predisposição da fibra em orientar-se segundo a direção da carga durante o processo de arrancamento, instigando uma pressão adicional na matriz cimentícia. (Robins, P. apud Gomes, J., 2013, p.16)

Constata-se que, na grande maioria dos casos, a orientação e dispersão das fibras são influenciadas pela colocação e compactação do BRFA, bem como pela geometria dos moldes e pelo tipo de fibras empregues. Assim, as fibras têm propensão a orientarem-se paralelamente às faces dos moldes podendo a vibração do betão causar a rotação e alinhamento das fibras segundo uma direção específica. (Edgington and Hannant apud Gomes, J., 2013, p.18)

2.2.3.3. Propriedades do betão

Com o exposto até este ponto, torna-se intuitivo perceber que, o fabrico de betão reforçado com fibras é um processo mais intrincado e rigoroso que a simples adição de fibras ao betão. Quando não são cumpridos todos os preceitos devidos, corre-se o risco de não se tirar partido de todos os benefícios que determinadas fibras podem oferecer. Por isso, consoante o tipo e volume de fibras empregues, pode haver uma necessidade de se procederem a acertes na composição da mistura. (Vitt, G., 2011)

Torna-se assim fulcral adaptar a resistência do betão ao tipo de fibras e respetivo mecanismo de resistência proporcionado por estas. Deste modo, quando o mecanismo resistente consiste no deslizamento da fibra (conceito desenvolvido no ponto 2.2.7.1. do presente capítulo) a classe de resistência do betão necessita ser restringida de maneira a possibilitar o escorregamento da fibra em relação à matriz que a envolve. Assim se percebe que, sempre que a classe de resistência for excessivamente elevada induzirá, por conseguinte, a uma ligação entre o betão e as fibras também ela forte, implicando inusitadamente uma rotura precoce das fibras, conforme representado na Fig. 2.6.

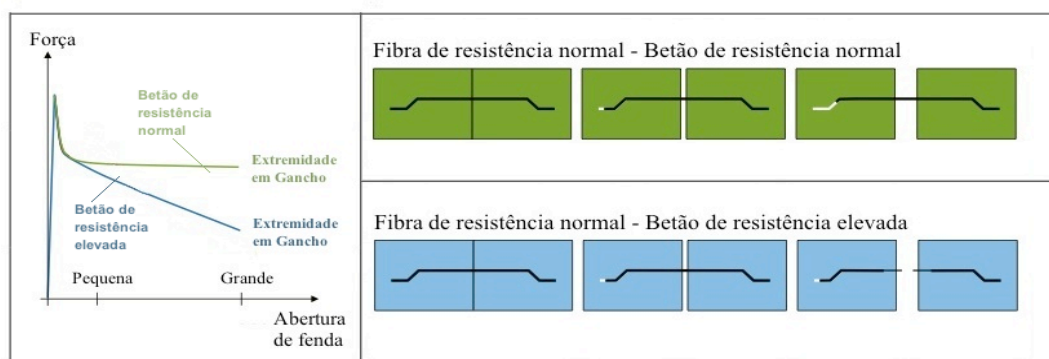


Fig. 2.6 – Relação entre a resistência no betão e a resistência da fibra. Adaptado de Vitt (2011)

Por outro lado, quando o mecanismo resistente consiste no alongamento da fibra até à rotura (conceito desenvolvido no ponto 2.2.7.2. do presente capítulo), a ligação mecânica entre a matriz cimentícia e as fibras, provocada pelos ganchos destas, provoca no betão uma pressão localizada bastante elevada nas extremidades das fibras, sendo por isso recomendável a utilização de betões de elevada resistência. É assim evitada a rotura nas zonas de ancoragem bem como se aproveita ao máximo a capacidade das fibras.

Quanto à adesão química entre o betão e as fibras em mecanismos resistentes que recorrem ao alongamento da fibra, esta não é tão relevante.

2.2.3.4. Propriedades das fibras

Com todas as características das fibras expostas até agora, importa neste ponto cruzar a informação retida relativamente ao seu comprimento e diâmetro e chegar a um conceito não explorado até aqui. Este parâmetro da fibra conhecido como esbelteza, tem um carácter geométrico e expressa a relação entre o comprimento e o diâmetro (l_f/d_f). Este atributo das fibras é bastante importante pois representa um indicador indispensável caso se pretenda inferir sobre o desempenho que determinada fibra irá proporcionar.

Assim, do exposto nos pontos 2.2.2.2. e 2.2.2.3. se depreende que:

Quadro 2.2 – Efeito do comprimento e diâmetro no desempenho do BRFA

Parâmetro		Desempenho	Justificação
Comprimento	Aumenta	Aumenta	melhor ancoragem
Diâmetro	Diminui		maior nº de fibras por kg

A título meramente exemplificativo, apresentam-se de seguida as relações l_f/d_f de alguns tipos de fibras da gama Dramix® e os seus respetivos desempenhos:

Quadro 2.3 – Relação entre a geometria da fibra e o desempenho desta. Adaptado de Vitt (2011)

Tipo de fibra	Comprimento l (mm)	Diâmetro d (mm)	Razão l/d (-)	Desempenho
50/1,3	50	1,30	38	Mais baixo
RL-45/50-BN	50	1,05	45	
ZC 610	60	1,05	60	
RC-65/60-BN	60	0,90	65	
RC-80/60-BN	60	0,75	80	Mais alto

Posto isto, se infere que a performance das fibras melhora para razões l_f/d_f mais elevadas. Esta relação, bem como a de outros parâmetros mencionados anteriormente, pode ser observada na Fig. 2.7. Ressalva-se contudo que, quanto maior for a esbelteza das fibras maior será a probabilidade destas se aglomerarem e formarem ouriços razão pela qual só devem ser usadas fibras em banda, ligadas por meio de uma cola dissolúvel na água da amassadura.

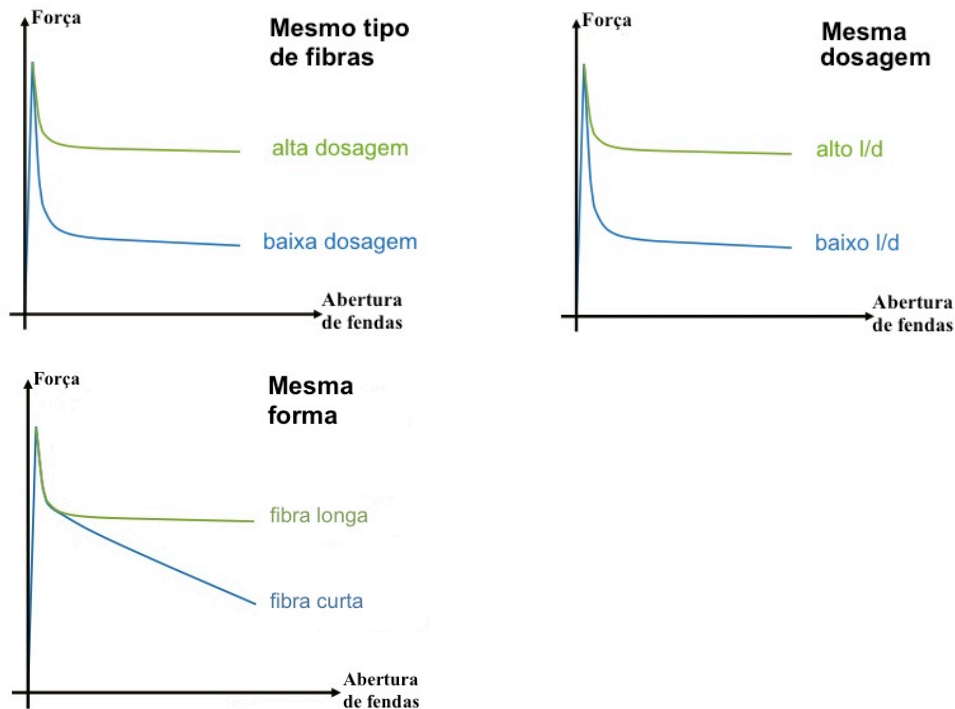


Fig. 2.7 – Relação entre vários parâmetros das fibras. Adaptado de Vitt (2011)

2.2.4. PROPRIEDADES

2.2.4.1. Propriedades do betão fresco com fibras

As propriedades do betão fresco reforçado com fibras depende de:

- Quantidade de fibras;
- Esbelteza das fibras;
- Geometria das fibras;
- Composição do betão.

Sob o ponto de vista da trabalhabilidade, o desempenho do betão com fibras, se a composição do betão for adequada, é análogo ao do betão sem fibras, todavia, aquando da sua colocação e compactação, é preciso um cuidado redobrado pois as fibras tendem a orientar-se segundo direções preferenciais que resultam da proximidade da cofragem, da intensidade de vibração, da altura da queda do betão, etc. Importa no entanto ressaltar que, transmitindo as fibras uma estabilidade considerável ao betão fresco, o teste de *slump* não é um bom indicador da trabalhabilidade do betão reforçado com fibras.

Quando se inserem fibras no betão, dá-se igualmente outra alteração no habitual comportamento do betão fresco. A presença de fibras neste cria uma perturbação na normal distribuição dos agregados grossos e das areias, ocorrendo deste modo um rearranjo nestas partículas da mistura. Verifica-se com isto uma maior concentração da matriz cimentícia em torno das fibras de modo a preencher os espaços gerados (efeito parede). (Dupont, D., 2003)

2.2.4.2. Propriedades do betão endurecido com fibras

Quanto às propriedades do betão endurecido, serão de seguida enumeradas as mais relevantes, não sendo contudo, feita uma abordagem muito extensa nem pormenorizada. Estas propriedades dependem do próprio betão bem como da orientação e percentagem de fibras, das características das fibras e da sua compatibilidade com a resistência do betão.

Sob a ação de uma carga estática

Quando sob a ação de uma carga e após a rotura, as fibras têm como função transferirem ao betão uma determinada ductilidade. Quanto maior a dosagem de fibras e a aderência destas, maior será a ductilidade transmitida. (Proença, A.M., 2004)

Ductilidade

Como referido no ponto anterior, quanto mais resistente for a matriz, maior terá que ser a resistência do aço e a deformabilidade da fibra para se garantir determinada ductilidade.

Como o aumento da ductilidade ocasionado pelo reforço das fibras resulta também das propriedades da matriz, a quantidade de fibras necessárias para se assegurar uma determinada ductilidade será tanto maior quanto mais resistente for a matriz em questão.

Assim se conclui que, o BRFA permite conjugar a capacidade de carga com a capacidade de deformação.

Compressão

Usualmente, a resistência à compressão aumenta tenuemente com a dosagem e esbelteza das fibras, embora este aumento seja mais significativo com a percentagem de fibras empregues do que com a esbelteza destas.

Existem, no entanto, relatos da diminuição da resistência à compressão do betão com fibras (Ozcan et al. apud Lima, R., 2012, p.13), embora os valores dessa diminuição não sejam muito significativos. A causa poderá ser a deficiente composição do betão que exige maior dosagem de água resultado da adição das fibras.

Contudo, em ambos os casos, o acréscimo ou decréscimo da resistência, caso exista, é muito pequeno, assemelhando-se, a tensão de rotura do BRFA à do betão sem fibras.

Quanto ao modo de fratura, a presença de fibras tem também influência. Uma vez atingida a carga máxima, verifica-se uma deformação maior sob essa carga constante. De ressaltar ainda que, no betão com fibras a relação entre a tensão de rotura no cilindro e no cubo pode ser distinta da previamente convencionada para betão sem fibras. (Committee, A.C.I., 2002)

Flexão

Dependendo da dosagem e aderência das fibras, estas alteram a distribuição de tensões na seção sujeita a flexão, alterando a posição do eixo neutro para a zona comprimida. Verifica-se porém que, habitualmente, o aumento da resistência à flexão só é significativo com dosagens de fibras acima dos 60 kg/m³. A aplicação de fibras em tais quantidades só é economicamente justificável em zonas de elevada concentração de esforços, como por exemplo, os nós de pórticos. Depois de ocorrer fendilhação, o comportamento do BFRA é diferente no betão sem fibras devido ao aumento da ductilidade. (Proença, A.M., 2004)

Tração Uniaxial

O aumento da resistência à tração pode ser alcançado recorrendo a um aumento da dosagem de fibras, da esbelteza destas, assim como da composição do betão que, implicitamente afetará a fixação das fibras à matriz cimentícia. A resistência à tração depende igualmente do método de fabrico do betão. Assim, quanto mais eficaz for este procedimento de disposição das fibras segundo a direção das tensões de tração, maior será o aumento da resistência à tração. (Proença, A.M., 2004)

Corte

Os resultados obtidos em ensaios de acréscimo da tensão de rotura (apenas por corte puro) dependem de: (Proença, A.M., 2004)

- Posição das fibras na zona de rotura por corte;
- Técnica de ensaio;
- Percentagem de fibras;
- Características das fibras.

Fadiga

A resistência à fadiga é determinada pela dosagem de fibras. A adição de fibras ao betão aumenta a resistência à fadiga e faz diminuir a abertura de fendas sob a ação de cargas. Para além da quantidade de fibras, parâmetros como a geometria da fibra e suas características mecânicas têm também influência na resistência à fadiga, pois afetam igualmente o seu desempenho. (Proença, A.M., 2004)

Fluência e Retração

Propriedade pouco relevante para o BRFA pois apenas em dosagens de fibras superiores a 1% se verificam efeitos na fluência e retração do betão de cimento de Portland. (Committee, A.C.I., 2002)

Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson

A inclusão de fibras metálicas no aço (<2% em volume) tem pouca influência no módulo de elasticidade bem como no coeficiente de Poisson, assemelhando-se estes parâmetros ao de betões com a mesma composição, porém sem fibras. (Committee, A.C.I., 2002)

Absorção de energia

Sempre que o betão se encontra sujeito a cargas quer dinâmicas quer estáticas, parâmetros como a composição do betão, tipo de fibras e dosagens destas devem ser analisados com cuidado pois têm influência direta no comportamento do betão. Assim, as fibras fazem com que, em situações de cargas estáticas, estas originem fendas locais sem afetar o restante betão. Por outro lado, sempre que atingida a carga máxima em situações de cargas estáticas, a integridade do betão é mantida mesmo que este se apresente fendilhado ou com deformações consideráveis. Esta situação não ocorreria se o mesmo não contivesse fibras, pois fragmentar-se-ia logo após a primeira fissura, depois de atingida a carga máxima. Importa ainda referir que, em casos em que a absorção de energia desempenha um papel preponderante para a estrutura (betão projetado em túneis), o uso de fibras traz vantagens importantes como o aumento de ductilidade. (Proença, A.M., 2004)

Condutibilidade Térmica

Apesar de o betão não ser combustível, nem sempre se comporta como tal na presença do fogo. A humidade presente no betão deve sair da matriz sob a forma de vapor de água. Se o vapor de água se formar mais rapidamente do que é expulso da matriz, é provável a ocorrência de uma fragmentação

explosiva. Mesmo no caso de fragmentação superficial, a armadura corre o risco de rapidamente ficar exposta em contacto direto com o fogo. Com o aumento da temperatura, a resistência à tração do aço diminui, reduzindo-se assim a capacidade de carga da estrutura podendo conduzir ao colapso desta.

Quando adicionadas em quantidades normais, as fibras de aço não aumentam significativamente a condutibilidade térmica do betão. Contrariamente ao que sucede com os varões de aço, estas são distribuídas amplamente por toda a seção em causa. Assim, as fibras como elementos descontínuos que são, não ficam concentradas numa fina camada perto da superfície nem, por conseguinte, perto da fonte de calor. Deste modo, o risco de todas as fibras perderem simultaneamente a sua capacidade de carga é limitado.

Contudo, as fibras de aço não conseguem proteger o betão da deterioração térmica. Há indicações que mostram que a inclusão de fibras reduz a fragmentação devido ao choque térmico e ao gradiente térmico. As fibras devem apenas ser vistas como uma medida adicional que facilita a saída do vapor de água contido na matriz cimentícia. No caso de a resistência a incêndios ser requerida, a adição de fibras de polipropileno conjugada com uma cuidada escolha de agregados e uma correta composição do betão, revela-se a solução mais indicada a adotar. (Vitt, G., 2011)

Resistência à abrasão

Nas situações em que a abrasão é desencadeada por detritos transportados por água circulando a baixa velocidade, as fibras não atribuem melhorias ao betão. No entanto, caso a água ou fenómenos de cavitação ocorram a grande velocidade, as fibras previnem a desintegração do betão. (Proença, A.M., 2004)

Durabilidade

Quando se recorre ao uso de fibras para melhorar, por exemplo, características como a fissuração, a fadiga e o impacto, implicitamente essas irão trazer também benefícios em termos de durabilidade. (Vitt, G., 2011)

Se por um lado o uso de materiais de origem metálica na construção aumenta significativamente os riscos de corrosão, também é verdade que, quando comparado com os varões de aço tradicionalmente utilizados na construção, as fibras de aço do Grupo I (2.2.1.1) apresentam variadas vantagens em termos de corrosão como: (Vitt, G., 2011)

- Em dosagens normais/adequadas, não têm influência na resistividade elétrica do betão;
- Proporcionam um reforço descontínuo;
- Apresentam uma superfície densa e suave;
- Possuem pequenas dimensões;
- Potencial eletroquímico relativamente baixo;
- Não provoca fragmentação do betão.

Dadas estas características, as fibras pertencentes ao Grupo I apresentam normalmente mais alta resistência à corrosão do que os varões de aço tradicionais.

Importa no entanto distinguir duas situações: (Vitt, G., 2011)

- **Betão não fissurado:** mesmo em ambientes marítimos, as fibras do Grupo I são menos sensíveis à corrosão do que varões de aço tradicionais. Apenas as fibras situadas à superfície da peça apresentarão corrosão não penetrando, no entanto no betão nem provocando a fragmentação do mesmo, sendo apenas tratado como um problema estético.

- **Betão fissurado:** nestas situações, a corrosão parece estar relacionada com a dimensão da fissura assim como com o tipo de exposição. Similarmente aos varões de aço, a carbonatação é menos gravosa que a presença de sais marítimos. Enquanto fissuras na ordem dos 0,5 mm não aparentam trazer problemas de carbonatação, esses mesmos valores diminuem para 0,2 mm em ambientes com forte presença de cloretos.

De modo a prevenir a ocorrência de problemas de corrosão, pode-se adotar o uso de fibras em aço inox ou galvanizadas.

Importa por isso ter em conta que, aquando do dimensionamento, uma das seguintes condições seja garantida de modo a que as estruturas apresentem um melhor desempenho em termos de durabilidade. São elas:

- Condições ambientais adequadas;
- Largura de fendas diminuta.

Fissuração resultante da retração

Recordando o exposto anteriormente, as fibras são incapazes de impedir ou reduzir a retração, no entanto, têm a capacidade de distribuir a fissuração, e embora aumentem o número de fissuras, diminuem a abertura de cada uma delas. (Proença, A.M., 2004)

Impacto

A resistência a impactos é largamente ampliada pela adição de fibras de aço. Estes impactos podem ser causados por ondas de choques, balas ou pela queda de blocos. Em qualquer um destes casos, a adição de fibras aumenta significativamente a resistência do betão quando devidamente seleccionado o tipo de fibra mais adequado a usar em cada caso. (Vitt, G., 2011)

Os benefícios da adição de fibras de aço ao betão com o intuito de aumentar a resistência ao impacto são: (Vitt, G., 2011)

- Redução da fragmentação dos painéis;
- Aumento da absorção de energia;
- Aumento do número de impactos até à primeira fenda;
- Aumento do número de impactos até à rotura;
- Aumento da resistência à cavitação.

Condutibilidade elétrica e Resistividade

Adicionar fibras ao betão não altera nem a sua condutibilidade elétrica nem a resistividade, uma vez que as fibras são elementos descontínuos e se espalham tridimensionalmente por todo o betão.

Os parâmetros condutibilidade elétrica e resistividade, como resultado, não se aplicam à presença de fibras. (Vitt, G., 2011)

2.2.5. FRATURA DOS MATERIAIS COMPÓSITOS

No betão simples (representado na Fig. 2.8), uma fissura tende a gerar uma barreira à propagação de tensões de tração. Esse desvio nas linhas de tensão implica uma concentração de tensões nas extremidades da fissura e, caso essa tensão suplante a tensão crítica, dar-se-á a rotura abrupta do material, apresentando este um comportamento caracteristicamente frágil. Assim, não se pode ter em

conta qualquer tipo de capacidade resistente residual à tração do betão fissurado. (Figueiredo, A.D.d., 2011)

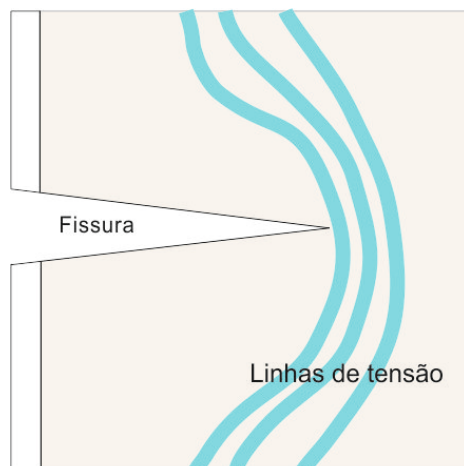


Fig. 2.8 – Distribuição de tensões em betão simples. Adaptado de Vitt (2011)

Em contra ponto, quando adicionadas à matriz cimentícia fibras de resistência e módulo de elasticidade adequados e numa quantidade apropriada, o betão deixa de apresentar um carácter distintivamente frágil. Tal se deve ao facto de as fibras funcionarem como uma ponte de transferência de tensões através das fissuras, sendo assim minimizadas concentrações de tensões nas extremidades das fissuras. Tal mecanismo pode ser observado na Fig. 2.9.

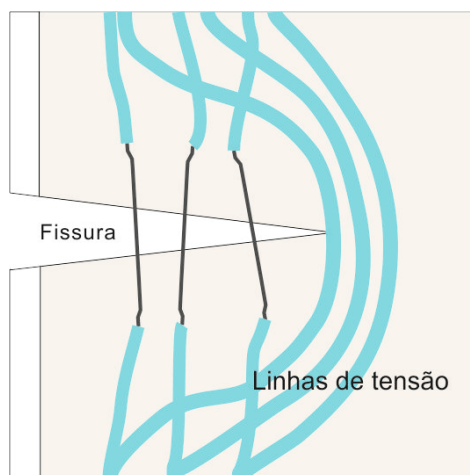


Fig. 2.9 – Pontes de tensão nas fibras de aço no betão. Adaptado de Vitt (2011)

O betão passa assim a apresentar certa capacidade de resistência pós-fissuração, ocasionada pela redução da velocidade de propagação das fissuras no compósito, começando desta forma a manifestar

um comportamento pseudo-dúctil. Deste modo, devido ao emprego de fibras, será reduzido o grau de fissuração no betão. (Figueiredo, A.D.d., 2011)

O facto de as fibras se distribuírem aleatoriamente no betão, vai permitir que estas reforcem a peça na sua totalidade, contrariamente ao que ocorre com o reforço que recorre a armaduras convencionais, em que estas reforçam apenas uma determinada zona pré-definida.

Para um correto funcionamento do mecanismo acabado de descrever apraz-se deduzir certos aspetos fundamentais. O primeiro deles prende-se com o facto de a capacidade de reforço que as fibras apresentam estar diretamente dependente do volume de fibras utilizado, como aliás foi comprovado pelo modelo de Aveston. (Aveston et al. apud Figueiredo, A.D.d., 2011, p.32)

Perante o exposto, quanto maior a dosagem de fibras maior será o número destas a atuar como ponte de transferência de tensões ao longo da fissura, aumentando deste modo o reforço pós-fissuração do betão. Assim, quanto mais fibras estiverem presentes na zona de fissuração maior será a carga a suportar, conduzindo por isso a uma maior capacidade de resistência do compósito. Pode desta forma considerar-se este aspeto como o principal e mais importante parâmetro caracterizador do comportamento do compósito sendo por isso uma das variáveis testadas na campanha de ensaios experimentais efetuados.

Outro parâmetro a ter em consideração é o comprimento da fibra. Tal como em relação ao volume de fibras, quanto maior for o comprimento das fibras melhor estas atuarão como ponte sendo por isso melhor a união das fissuras. Para além do comprimento das fibras, outros fatores podem ser mencionados como facilitadores na criação de pontes de tensão, sendo eles: (Vitt, G., 2011)

- O tipo de ancoragem;
- A orientação das fibras;
- A matriz e resistência do betão;
- A resistência à tração do betão vs. a resistência à tração da fibra.

2.2.6. INTERFACE FIBRA-MATRIZ

De um ponto de vista material e estrutural, deverá existir um equilíbrio na otimização da ligação entre as fibras e a matriz cimentícia. A resistência, a deformação e o modo de rotura dos compósitos reforçados com fibras resulta da qualidade da ligação entre a fibra e a pasta de cimento. Se as fibras tiverem uma ligação fraca com a matriz, estas podem deslizar para zonas de carga reduzidas e deste modo não contribuir como expectável para a união das fissuras. Nestas situações, as fibras não aumentam a ductilidade do sistema. No entanto, se a ligação da fibra à matriz cimentícia for demasiado forte, muitas das fibras podem quebrar antes ainda de dissiparem energia através do seu deslizamento. Nesta situação, as fibras atuam como inclusões não ativas originando apenas melhoramentos mínimos nas propriedades mecânicas. (Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M.)

Quando se pretende aumentar a área de contato entre a fibra e a matriz envolvente, de modo a aumentar o atrito em fase de arrancamento, devem-se considerar os seguintes processos: (Ulrix, E. and Ferreira, N., 2011)

- Aumento da rugosidade da fibra;
- Torção da fibra ao longo do seu comprimento;

- Deformação da fibra de modo a alcançar amarração mecânica nas extremidades (zona de ancoragem);
- Deformação ao longo do comprimento, como por exemplo, indentação;
- Tratamento micro mecânico da superfície (cauterização química, tratamento por plasma).

Quanto maior for a resistência do betão, implicitamente maior será a adesão fibra-matriz que induzirá a um aumento na capacidade de carga das fibras. (Ferreira, N., 2008)

Para terminar, importa ainda referir que o comprimento das fibras influencia igualmente a interação entre a fibra e a pasta de cimento. Um aumento no comprimento destas implica uma maior área de contato com o betão, melhorando assim a aderência entre ambos. Por seu lado, um diâmetro menor proporciona também uma melhor união devido ao acréscimo da superfície específica.

É assim fundamental proceder a uma correta seleção das fibras e da matriz envolvente na produção de estruturas duráveis.

2.2.7. MECANISMOS DE REFORÇO PROPORCIONADOS PELAS FIBRAS DE AÇO

Como já foi mencionado anteriormente, é através de parâmetros como a composição do betão, da superfície, forma e resistência das fibras que se alcança o processo de ligação entre a fibra e a matriz. (Ferreira, N., 2008) Deste modo, a resistência à tração do BRFA após a fendilhação deriva do atrito e aderência presentes entre as fibras e a matriz cimentícia, bem como da distorção das extremidades devido à deformação elástica das fibras e/ou, caso exista, ao efeito de ancoragem.

Posto isto, podem-se expor essencialmente três mecanismos de reforço originados pelas fibras de aço: deslizamento da fibra em relação ao betão (Dramix® 3D), alongamento da fibra, no qual é impedido o arrancamento das suas extremidades (Dramix® 5D) e um mecanismo misto (Dramix® 4D).

2.2.7.1. Deslizamento da fibra

O atrito e a aderência criados entre a fibra e a matriz cimentícia desempenham um papel crucial. Na Fig. 2.6 está representada a situação de funcionamento da fibra por deslizamento “fibra de resistência normal e betão de resistência normal”, caraterístico das fibras Dramix® 3D da Bekaert. A ancoragem foi especialmente desenhada para permitir este tipo de funcionamento. Verifica-se que fibras visualmente semelhantes exibem comportamento nitidamente pior devido à forma diferente do gancho. (Ferreira, N., 2008)

2.2.7.2. Alongamento da fibra

O alongamento é conseguido por uma ligação mecânica da fibra com a matriz envolvente que impossibilita o arrancamento das extremidades das fibras, e implica um betão com tensão de rotura elevada (>70MPa).

No caso das fibras Dramix® 5D, usadas nos ensaios experimentais da presente dissertação, e ao contrário do princípio de deslizamento seguido pelas fibras de gancho convencionais, fomentam no BRFA um sistema resistente diferente, dependendo este diretamente da ductilidade e tensão de rotura da própria fibra. Como o gancho das fibras Dramix® 5D é não deformável, o processo de deslizamento da fibra é permutado pelo alongamento desta, devido à ancoragem perfeita promovida pelas extremidades que mantém as fibras firmes no betão. Para este processo acontecer com sucesso, a

rotura precoce da fibra é evitada devido à elevada resistência à tração e ductilidade deste tipo de fibras, como se pode observar na Fig. 2.10. (S.A., N.V.B., 2012)

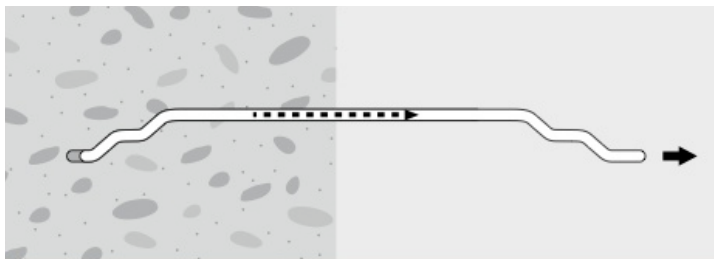


Fig. 2.10 – Alongamento da fibra. S.S., N.V.B. (2012)

Conquanto, fatores como a composição do betão, volume, comprimento e esbelteza das fibras influam na ductilidade e resistência residual à tração do BRFA, a conjugação do tipo de gancho com as propriedades mecânicas do aço presente nas fibras Dramix® 5D permite alcançar níveis de performance em estado limite último que não são exequíveis com fibras de gancho deformável.

2.2.7.3. Deslizamento e alongamento

Este processo misto obtém-se com as fibras Dramix® 4D da Bekaert que se adequa a um betão de resistência média (da ordem dos 50-70 MPa). As fibras até determinada carga comportam-se como as Dramix® 5D e a partir daí como as Dramix® 3D.

Expostos estes três mecanismos de reforço, assim se pode concluir que caso se pretenda aumentar a resistência do compósito deve-se recorrer à aplicação de fibras de elevada resistência e esbelteza de maneira a que a rotura do compósito ocorra por cedência das fibras. É no entanto conveniente adequar a composição do compósito à esbelteza e percentagem de fibras presentes na amassadura de modo a que as propriedades do compósito não sejam desvantajosamente afetadas pela diminuição da trabalhabilidade da mistura, muito comum quando se aumenta o valor dessas características das fibras. Atentando ainda que ocorrendo uma rotura do compósito por cedência da fibra, esta perde a capacidade de absorver a energia do material, atributo primordial do reforço com fibras.

2.3. REGULAMENTAÇÃO

Apesar de nas últimas décadas um grande número de estudos ter sido efetuado de maneira a se tentar perceber as propriedades mecânicas do BRFA, a escassez até ao início dos anos 2000 de códigos e diretrizes internacionais para o dimensionamento de elementos de betão reforçado com fibras, impediu a sua difusão como uma solução estrutural competitiva. Contudo, nos últimos 10 anos, estes pressupostos têm vindo a mudar, resultado da publicação de recomendações e códigos de dimensionamento.

Relativamente a normas e diretrizes internacionais, pode mencionar-se a norma europeia EN 14889-1:2008 como atualmente sendo a única relativa ao controlo de qualidade, tendo em conta o modo de fabrico das fibras metálicas. Torna-se assim obrigatório em todos os estados membros que as fibras metálicas usadas na construção estejam em conformidade com esta norma. Desta forma, é garantido um nível mínimo de qualidade e desempenho das fibras, bem como que dosagem deve ser assegurada para se alcançar uma resistência à flexão pós-fissuração requerida para um determinado betão. O conhecimento e cumprimento desta norma permite assim uma completa transparência sempre que há

necessidade de se proceder à comparação de fibras de diferentes tipos. Como o comportamento de elementos em BRFA é mais crítico do que as propriedades das fibras em si, a certificação da EN 14889-1:2008 apresenta portanto um papel crucial. É deste modo possível atingir determinados valores residuais de resistência à flexão, exigindo para isso aos fabricantes que declarem uma dosagem mínima de fibras a ser aplicada. (MIPENZ, A.R.)

Para o cálculo de estruturas recorrendo ao uso de fibras metálicas, a regulamentação é ainda parca e não consensual, onde o EC 2 representa um papel quase nulo. Portanto, havendo necessidade de se recorrer a modelos de cálculo que contemplem a resistência residual pós-fendilhação promovida pelas fibras ter-se-á que recorrer, por exemplo, a regulamentos como o RILEM TC 162-TDF 2003, FIB Model Code 2010 ou EHE 2008.

Assim, possuir um vasto legado de informação e registos de resultados derivados do uso de fibras na construção, aliado ao aparecimento destes códigos de dimensionamento e publicações de normas, irá não só ajudar na preparação de mais e melhores especificações bem como auxiliar os projetistas a tirar o máximo proveito das propriedades deste material e usá-lo de maneira mais vantajosa e económica. Possibilitará também aos produtores otimizar os seus processos para que as suas fibras deem respostas às exigências do mercado. Com isto é dado um maior número de possibilidades aos projetistas no dimensionamento de BRFA, manifestando-se deste modo numa maior eficiência deste material.

2.4. APLICAÇÕES DE FIBRAS METÁLICAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O uso do BRFA na construção tem vindo a aumentar nas últimas décadas devido principalmente a vantagens de ordem económica, sobretudo no que diz respeito à mão-de-obra e material. Assim, o BRFA é recomendado em todos os tipos de betões que requerem um aumento das suas características de tenacidade, de resistência intrínseca à fissuração e uma melhoria na estanqueidade.

No Quadro 2.4, apresentam-se algumas das principais aplicações de BRFA na construção bem como as vantagens que lhes estão associadas e que justificam a sua utilização.

Quadro 2.4 – Aplicações do BRFA e suas vantagens. Adaptado de Barros (1996)

Áreas de Aplicação	Atributos
Pavimentos: de edifícios industriais; estações de abastecimento de combustíveis; piscinas	Aumento da resistência às ações de fadiga e impacto; diminuir o número de juntas de dilatação devido à capacidade de absorção de energia e controlo de fendilhação
Estruturas Hidráulicas: barragens; canais, condutas; pilares submersos; estruturas offshore; elementos que servem de proteção de estruturas marítimas	Maior resistência à cavitação, erosão e impacto
Estruturas de Betão Projetado: estabilização de taludes rochosos; estruturas subterrâneas; reparação e reabilitação de estruturas; construção de cascas delgadas; painéis de fachadas; reservatórios	Economia de mão-de-obra e material; menor tempo de execução; execução de peças de geometria complexa
Estruturas de Betão Refratário: portas e paredes de fornos; compartimentos submetidos a elevadas temperaturas ou a altos gradientes térmicos	Maior resistência às tensões de origem térmica, ao choque térmico e às ações térmicas cíclicas
Elementos Pré-Fabricado: coberturas; canalizações; depósitos; fundações e estruturas de suporte de máquinas; paredes divisórias; lajes; muros de cerca ou vedação; varandas; estruturas resistentes de estufas e de pequenas arrecadações	Manuseabilidade; facilidade de substituição; qualidade do acabamento; propriedades mecânicas e físicas; economia
Componentes Estruturais: nós de ligação viga-pilar; consolas curtas; vigas altas; zonas de amarração de cabos de pré-esforço; estruturas offshore; portas resistentes a ações explosivas; elementos estruturais em regiões de considerável atividade sísmica; componentes estruturais de instalações da indústria de energia nuclear	Diminuição do congestionamento de armaduras convencionais; decréscimo do espaçamento e abertura das fendas; aumento da ductilidade do modo de rotura; maior resistência às ações cíclicas e de impacto
Reparação e Reforço de Estruturas: grande diversidade de elementos estruturais	Economia de tempo, mão-de-obra e material

Existem, no entanto, aplicações em que as fibras são mais eficientes, como é o caso de:

- Materiais/estruturas muito esbeltas nas quais os varões de aço não possam ser usados;
- Estruturas com elevadas cargas e deformações locais (por exemplo: revestimento de túneis e estruturas resistentes a explosões);
- Lajes ou pavimentos para controlo da fendilhação induzida por humidade ou diferenças de temperatura.

O valor económico gerado pela durabilidade das estruturas, embora difícil de quantificar, representa um claro incentivo ao uso crescente de fibras na construção, justificando a atual necessidade de se criarem estruturas duráveis. (Li, V.C., 2000)

Prevê-se por isso que nos próximos anos o BRF, com ductilidade semelhante à dos metais, seja explorado comercialmente numa maior e mais vasta gama de aplicações.

3

DURABILIDADE DO BETÃO

3.1. INTRODUÇÃO

Quando o betão começou a ser empregue em construções (início do século XX) e até à década de 80 desse mesmo século, a sua produção (composição) e emprego eram extremamente cuidados, comandados apenas pelo bom senso e experiência do profissional, sendo a durabilidade claramente subjetiva, assegurada exclusivamente através de exigências pré-estabelecidas. Este tipo de comportamento devia-se ao facto do betão ser um material novo, ainda sem “respostas” a longo prazo.

Com o decorrer do tempo, alcançaram-se avanços na construção, através da pesquisa de composições mais económicas e de materiais mais eficazes, porém a qualificação da mão-de-obra nem sempre conseguiu acompanhar estes progressos, sendo o aspeto da produção descurado. E, apesar de todos os cuidados a ter com a composição e cura do betão, é preciso também estar ciente que este envelhece com o decorrer do tempo, quando exposto a ações agressivas.

Em função dos crescentes problemas de degradação precoce e imprevistos observados nas estruturas, das novas necessidades competitivas e das contínuas exigências de sustentabilidade no sector da construção civil, tem vindo a observar-se nas últimas décadas uma tendência a nível mundial no sentido de privilegiar os aspetos de projeto direccionados para a durabilidade e extensão da vida útil das estruturas de betão armado. (Clifton apud Medeiros, M. [et al.], 2011, p.1)

Diversos documentos normativos internacionais e artigos de especialistas nesta área, entre outros, têm contribuído para a inclusão e consolidação de novas noções em prol da durabilidade e do aumento da vida útil das estruturas de betão. Inclusive, a durabilidade tornou-se um critério de dimensionamento nos novos regulamentos de países como o Japão, Austrália e Comunidade Europeia. (Sampaio apud Ferreira, R.M., 2000, p.2.14)

Passa assim a ser exequível a avaliação da vida útil expressa em número de anos e não mais em critérios apenas qualitativos de adequação da estrutura a um certo grau de exposição. Segundo o *fib Model Code for Service Life Design* (2006), (fib apud Medeiros, M. [et al.], 2011, p.1) a abordagem à vida útil da estrutura deve assentar sobre três aspetos fundamentais:

- Métodos de averiguação da vida útil do projeto;
- Procedimentos de execução e controlo de qualidade;
- Procedimentos de utilização, operação e manutenção.

Porém, o princípio básico não se modificou. Existe por um lado a necessidade de avaliar e qualificar o grau de agressividade do meio ambiente e por outro, a de conhecer o betão e a geometria da estrutura, estabelecendo a relação entre ambos, ou seja, a agressividade do meio vs. a durabilidade da estrutura. (Helene, P., 1983)

A partir de vários trabalhos de pesquisa, tem-se demonstrado o peso económico referente à durabilidade, exaltando as importâncias gastas com a manutenção e reparo de estruturas em alguns países da Europa (Ueda and Takewaka apud Medeiros, M. [et al.], 2011, p.3), conforme comprova o Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Gastos na construção, em alguns países da Europa, afetos às parcelas de construções novas e manutenção. Adaptado de Ueda & Takewaka (2007)

País	Gastos com construções novas	Gastos com manutenção e reparo	Gastos totais com construção
França	85,6 milhares de milhões de euros (52%)	79,6 milhares de milhões de euros (48%)	165,2 milhares de milhões de euros (100%)
Alemanha	99,7 milhares de milhões de euros (50%)	99,0 milhares de milhões de euros (50%)	198,7 milhares de milhões de euros (100%)
Itália	58,6 milhares de milhões de euros (43%)	76,8 milhares de milhões de euros (57%)	135,4 milhares de milhões de euros (100%)
Reino Unido	60,7 milhares de milhões de euros (50%)	61,2 milhares de milhões de euros (50%)	121,9 milhares de milhões de euros (100%)

Nota: dados referentes ao ano de 2004, exceto no caso da Itália, que reporta ao ano de 2002

Prevê-se assim que a abordagem dos anos vindouros seja mais focalizada no aspeto da reparação e reabilitação de obras públicas, vindo o orçamento desta parcela a ascender a mais de metade do orçamento total. (Ferreira, R.M., 2000)

Como se pode constatar com o exposto até aqui, no que concerne a betões convencionais, sem inserção de fibras, a bibliografia existente parece já possuir um *background* considerável com algumas décadas de pesquisas e alguns indicadores de durabilidade de uso recorrente. Porém, o mesmo não pode ser dito em relação ao BRFA. Os estudos existentes neste ramo são ainda escassos e um pouco limitados, não havendo por isso consenso sobre quais os indicadores mais apropriados para avaliar as características da durabilidade do BRFA.

Sabe-se, por exemplo, que a camada superficial do betão é por norma a primeira a ter contato com os agentes de degradação e, por isso, a primeira a ser afetada por estes. Portanto, o recobrimento das armaduras em betões convencionais tem uma importância fundamental no que concerne à vida útil das estruturas, assim como os procedimentos construtivos têm consequências preponderantes na qualidade desta camada. Que influência terá o tipo de agregados utilizado na composição do BRFA em termos de durabilidade da estrutura? Com este tipo de questões em mente, partiu-se para a campanha de ensaios experimentais previstos na presente dissertação. Pretende-se desta forma melhor entender o comportamento do BRFA em termos de durabilidade.

3.2. FATORES QUE INFLUENCIAM A DURABILIDADE

O material considerado ideal para as construções é aquele que alia as qualidades de resistência (desempenho) com a durabilidade. Talvez por isso, no passado, um dos grandes causadores da degradação do betão tenha sido a excessiva relevância atribuída ao desempenho mecânico da estrutura, como é o caso da resistência à compressão, descurando-se a influência dos fatores ambientais na durabilidade. Pode-se assim concluir que, para se obter uma estrutura de betão durável, devem-se ter em conta os seguintes fatores:

- Agressividade do ambiente;
- Características do betão.

3.3. CAUSAS DE DETERIORAÇÃO DO BETÃO

Até há algum tempo e crendo em dadas características do betão como bastante duradouras, este tornou-se muito utilizado em todo o mundo. No entanto, diversos agentes naturais atuam sobre o mesmo provocando o seu envelhecimento, ou seja, a perda gradual de desempenho estético, funcional e estrutural.

As causas da deterioração provêm de diversas origens como ações mecânicas, físicas, químicas e biológicas. Estas ações podem ocorrer isoladamente ou na maioria das vezes, de forma simultânea e progressiva, sendo que a velocidade a que estas sucedem depende do meio onde se insere. (Andrade, T., 2005)

A água geralmente está presente na maioria dos casos de deterioração de estruturas de betão dada a facilidade com que penetra na rede porosa, determinando assim a taxa de deterioração. Por este motivo, foi dado maior ênfase na campanha experimental a ensaios que retratassem situações envolvendo o efeito da água na durabilidade do betão.

3.3.1. CAUSAS HUMANAS

O desempenho do betão representa a sua capacidade em satisfazer os preceitos para os quais foi designado, quer sob o ponto de vista estético e de segurança bem como em termos funcionais. Assim, para se alcançar um desempenho apropriado do betão dever-se-á intervir em três etapas basilares:

3.3.1.1. Fase de conceção do projeto de estrutura e arquitetura

Na conceção do projeto, é indispensável que se atendam a todas as solicitações a que a estrutura será submetida durante a vida útil. Questões como o desempenho e durabilidade devem ser criteriosamente dissecadas, levando-se em consideração o ambiente ao qual a estrutura estará sujeita, bem como quais as características que os materiais a usar deverão possuir.

Souza e Ripper (Souza, V.C.M.d. and Ripper, T., 1998) descreveram quais as principais falhas originadas na fase de estudos preliminares ou anteprojetos e que por conseguinte, acarretaram mais encargos no processo construtivo ou causaram prejuízo na fase de utilização da obra. Assim, as falhas causadas na fase de conceção do projeto final podem advir de fatores como:

- Falta de compatibilização de projetos (arquitetónicos, estruturais, hidráulicos, elétricos...);
- Inadequação ao ambiente;
- Detalhamento incorreto ou insuficiente;
- Má conceção estrutural ou erros de dimensionamento;
- Deficiente quantificação das ações;
- Má especificação dos materiais.

3.3.1.2. Fase de execução da obra

Outra das principais causas do desempenho deficiente das estruturas prende-se com a realização do projeto de execução e a carência de formação especializada, tanto na fase de projeto como na de execução. A abordagem, relativa à parcela da durabilidade, por parte do projetista, é por vezes simplista e supérflua, descurando-se aspetos fundamentais das boas práticas de construção. Por outro lado, o facto de as obras serem executadas, na sua maioria de forma artesanal, com prazos e orçamentos curtos, aumenta a probabilidade de ocorrerem erros ou de haver uma certa negligência na execução.

Na fase de execução várias são as falhas que podem pôr em risco o desempenho e durabilidade do BRFA, muitas delas prendem-se com más práticas, outras têm um carácter mais economicista.

O BRFA é uma mistura de vários elementos cuja preparação deve considerar requisitos específicos. Quanto mais elevados forem estes requisitos, implicitamente mais delicados serão os cuidados a ter na sua fabricação. Os componentes principais são o cimento, as fibras, os agregados, a água e os adjuvantes. Mesmo tendo à disposição os melhores produtos do mercado, se estes forem utilizados de forma incorreta, quer por desconhecimento quer por serem misturados entre si com relações de todo erradas, implicará o mesmo que empregar materiais de piores qualidades. Torna-se assim fulcral garantir não só a qualidade dos materiais como a correta mistura entre eles.

Mudanças ocorridas no processo de fabricação de cimentos, permitiram que se atingissem altas resistências com menores quantidades de cimento. Geralmente as especificações dos betões são em função da resistência à compressão. Por erro muitas vezes, utilizam-se betões com grandes quantidades de água, gerando maior porosidade e elevada permeabilidade, sendo deste modo, facilitada a entrada de humidade e de agentes agressivos no interior do betão.

Por isto, as construções atualmente, tendem a ser menos duráveis do que em épocas anteriores.

Conclui-se assim que a durabilidade de uma estrutura depende não só da qualidade do projeto de conceção e dos materiais empregues mas também da qualificação técnica das pessoas afetas à obra. Desde engenheiros a técnicos e passando pelos operários, é fundamental que haja conhecimento de causa e experiência na execução das tarefas e nos procedimentos, pois a falta de qualificação, a falta de fiscalização, o emprego de materiais não adequados e de qualidade dúbia associados frequentemente a condições ambientais adversas, poderão refletir-se na durabilidade da mesma.

3.3.1.3. Fase de utilização da estrutura

Observa-se que, a ausência e inadequação de manutenção e de conhecimento por parte dos usuários sobre elementos agressivos e sobre a estrutura de betão, podem comprometer todos os cuidados tidos até aqui nas fases anteriores. A exposição prolongada a fenómenos de humidade, a sujeição da estrutura a ações excessivas relativamente às previstas bem como a aplicação de produtos agressivos ao betão, podem gerar graves problemas no desempenho e durabilidade da estrutura.

Torna-se assim vital a realização de um bom programa de manutenção por forma a reduzir grande parte dos custos de futuras reparações.

3.3.2. CAUSAS NATURAIS

Entende-se por causas naturais aquelas que são inerentes ao próprio material e à sua sensibilidade ao ambiente e a esforços solicitantes, não resultando de falhas humanas nem de equipamento.

As ações naturais, podem ser divididas em quatro tipos:

- Ações mecânicas;
- Ações físicas;
- Ações químicas;
- Ações biológicas.

3.4. PARÂMETROS DE DESEMPENHO DA DURABILIDADE

O tipo de agregados utilizados, assim como as propriedades da microestrutura e da pasta de cimento endurecido, têm relação direta com os parâmetros de desempenho da durabilidade. (Kropp, J. and Hilsdorf, H.K., 1995)

A entrada de gases, água ou iões em solução aquosa ocorre através dos poros na matriz da pasta de cimento ou através de micro-fendas. Na grande maioria dos casos, o betão, na qualidade de material penetrável, não se comporta como um inerte sólido e estável com poros uniformes, podendo os mesmos apresentar uma grande oscilação de dimensão. Tendo em conta essa oscilação de dimensão e que a variação da concentração de humidade no betão é influenciada pela exposição climática, verifica-se que o transporte dos agentes nocivos no betão não ocorre apenas devido a um único mecanismo mas, na maior parte das vezes, devido à atuação de vários concomitantemente. (Ferreira, R.M., 2000)

Disto advêm grandes limitações para investigações experimentais no estudo das características de transporte do betão. (Buenfeld apud Ferreira, R.M., 2000, p.4.3)

Apesar de correntemente existirem vários métodos de testes para avaliação das propriedades do BRFA, não existe qualquer entendimento sobre qual é o melhor ou mais indicado para uma aplicação específica. Praticamente nenhuma das pesquisas, realizadas até à data, sobre durabilidade em BRFA, teve em conta os distintos mecanismos de transporte de fluidos no betão: a permeabilidade, a capilaridade e a difusão.

Como no trabalho experimental não foi estudado transporte por difusão, não será dada atenção a este mecanismo.

3.4.1. POROSIDADE – ABSORÇÃO

O transporte de água, gases e iões químicos no betão ocorre devido à sua estrutura porosa ou às suas microfissuras, podendo este transporte conter ou não substâncias em suspensão. Embora existam muitos tipos de mecanismos químicos ou físicos que controlam o transporte de agentes de degradação pelo betão, o mecanismo de transporte baseia-se fortemente nas diferentes condições ambientais, nas características da solução, no grau de saturação do betão, na temperatura bem como na distribuição do tamanho dos poros.

Aspetos como a permeabilidade e a capilaridade derivam da estrutura porosa do betão. Daqui resulta outra valência fundamental de todo o material de construção, a sua durabilidade. Tal como referido anteriormente, esta depende da intensidade dos fatores ambientais aos quais está sujeito bem como do grau de porosidade que o material em causa possui. (Ferreira, R.M., 2000)

A estrutura porosa do betão, deve-se principalmente ao: (Porto, F.d.E.d.U.d.)

- Excesso de água presente na amassadura para além da indispensável para a hidratação. Ao sair por evaporação deixa vazios no seu lugar;
- Ar emulsionado com os componentes aquando a amassadura, que fica retido no seu interior, mesmo após a compactação;
- Tipo de agregados dada a diferente porosidade que estes podem apresentar;
- Tipo de cura do betão (deve ser evitada a secagem prematura).

A porosidade caracteriza-se pela relação entre o volume de vazios e o volume total de um material. Podem-se distinguir dois tipos de porosidade:

- Porosidade aberta (ou acessível), quando os vazios comunicam entre si por canais capilares de seção variável;
- Porosidade fechada, quando os vazios não comunicam entre si.

Com isto se percebe que o diâmetro dos poros tem influência na durabilidade da estrutura. Assim, quanto mais reduzidos forem os poros mais forte será a capilaridade do material, apresentando este porém baixa permeabilidade e, inversamente, quanto maiores os diâmetros menor será a capilaridade e maior a permeabilidade.

A soma da permeabilidade e porosidade permite obter a porosidade absoluta. Geralmente, a porosidade mensurada é a porosidade aberta (maioritariamente designada por absorção). Assim, torna-se crucial efetuar ensaios de absorção pois permitem elucidar sobre o tipo de resistência que o betão oferece à ação do gelo sobre o betão. A água quando congela sofre um aumento de volume, necessitando por isso de um certo espaço livre de forma a que seja permitida a expansão do gelo sem causar danos na estrutura. (Ferreira, R.M., 2000)

A medição da porosidade à pressão atmosférica (por imersão) está normalizada segunda a especificação LNEC E 394 e o seu procedimento encontra-se descrito no ponto 4.3.4.. Estes ensaios são influenciados pelo grau de humidade do betão pelo que, em obra, existe a carência de manter o betão da superfície com um certo grau de humidade constante.

3.4.2. ABSORÇÃO (CAPILARIDADE)

A capilaridade é caracterizada pela penetração de um líquido no betão por ação da tensão superficial que atua nos seus poros capilares.

Como grande parte das estruturas de betão se encontram sujeitos a fenómenos cíclicos de exposição a água (sobretudo das chuvas), o estudo de fenómenos de absorção de água por capilaridade torna-se deste modo determinante.

Embora ainda não suficientemente bem entendida, em parte devido à dificuldade em ser definida e medida, os ensaios de caracterização desta propriedade, apesar de simples, permitem quantificar com alguma precisão as aptidões e características do betão, permitindo assim conhecer melhor a sua qualidade.

A absorção capilar é influenciada por fatores como a finura do cimento, a relação A/C, a idade do betão, a duração da cura húmida e a compactidade. (L'Hermite apud Ferreira, R.M., 2000, p.4.11)

A absorção de água é caracterizada pela entrada de água na rede porosa do betão devido a forças capilares. Quando os poros do betão, que normalmente apresentam grande variação de dimensões, entram em contacto com um líquido, este é absorvido. Este mecanismo resulta das diferenças de pressão existentes entre a superfície livre da água no exterior do betão e a sua superfície nos poros capilares. Sendo a força capilar local inversamente proporcional ao diâmetro dos poros, verifica-se que os poros de menores dimensões exercem uma maior força capilar, embora a velocidade de absorção nestes seja inferior à verificada nos poros maiores. (Ferreira, R.M., 2000)

Vários são os métodos usados para simular as diversas situações em que a absorção pode ocorrer, sendo os mais usuais, os que recorrem à medição do aumento de massa por unidade de área em contacto com a água, em intervalos de tempo determinados. Ou noutras situações, aqueles que recorrem à medição da altura da ascensão capilar. O método usado nos ensaios experimentais encontra-se descrito em 4.3.5..

Depreende-se assim que quanto menor a absorção do material, mais protegida estará a estrutura.

3.4.3. PERMEABILIDADE

A permeabilidade é caracterizada pela propriedade de um meio poroso se deixar atravessar por um fluido sob ação de uma diferença de pressão, pelo que a permeabilidade do betão é um fator condicionante para o desenvolvimento das reações responsáveis pelo seu deterioramento.

A velocidade e o efeito do transporte de gases, de água ou de agentes agressivos dissolvidos são amplamente influenciados pela estrutura porosa, pelas fissuras e pelo meio ambiente que circunda a superfície do betão, sendo que a distribuição do tamanho dos poros influencia especialmente a velocidade de transporte. São precisamente estes poros (capilares) que influenciam a durabilidade da estrutura.

Por fim, e como já referido no ponto 3.4.1., a velocidade de penetração de fluidos no betão por permeabilidade é diretamente proporcional ao tamanho dos poros.

Conclui-se assim que a permeabilidade é um dos principais aspetos relacionado com a durabilidade do betão, dependendo a maior ou menor facilidade de transporte de agentes agressivos dissolvidos na água, fundamentalmente, da porosidade e distribuição dos poros do betão. Essa porosidade depende, por sua vez, da granulometria dos agregados, da relação A/C e da compactação e cura do betão.

Nos ensaios experimentais realizados foi medida a permeabilidade do betão ao oxigénio e o procedimento seguido encontra-se indicado em 4.3.6..

4

MATERIAIS UTILIZADOS, MÉTODOS SEGUIDOS E ENSAIOS REALIZADOS

4.1. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

O presente capítulo pretende descrever os materiais empregues nos trabalhos experimentais assim como os procedimentos seguidos quer na preparação das amassaduras como na realização dos ensaios.

No decorrer de todo o projeto de investigação tentou adotar-se métodos constantes e o mais rigorosos possíveis para desta maneira não adicionar novas variáveis às já em estudo, eliminando assim qualquer tipo de interferência na leitura dos resultados obtidos.

4.1.1. CIMENTO + CINZAS

O cimento Portland utilizado na presente investigação foi do Tipo IV (Pozolânico), de Classe 32,5 SR, encontrando-se este em conformidade com o exposto na NP EN 197-1. O cimento foi facultado pela SECIL Companhia Geral de Cal e Cimentos, S.A., em sacos estanques de modo a minimizar a sua deterioração ao longo do tempo.

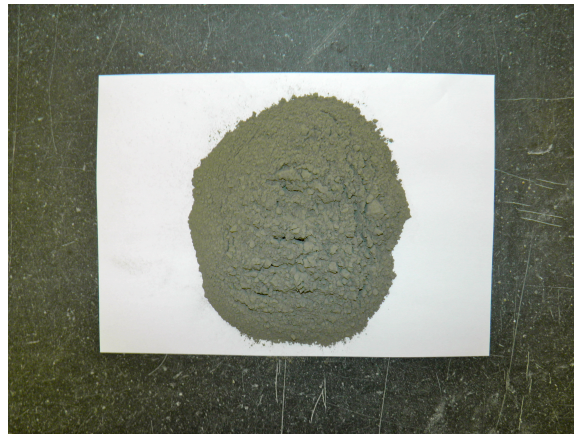


Fig. 4.1 – Cimento Tipo IV, 32,5 SR

4.1.2. ADJUVANTE

O adjuvante empregue foi o Powerflow P3140 (reductor de água) da MC Bauchmie, de acordo com a norma EN 934-2.



Fig. 4.2 – Adjuvante P3140

4.1.3. ÁGUA

A água utilizada foi obtida da rede pública de abastecimento da cidade do Porto, em conformidade com o exposto na NP EN 206 e na norma EN 1008.

4.1.4. FIBRAS

No presente trabalho experimental as fibras de aço utilizadas tinham a designação comercial de Dramix® 5D 65/60 BG, tendo sido cedidas pela Bekaert. Na denominação referida, 5D 65/60 BG, o valor 60 corresponde ao comprimento da fibra ($l_f=60$ mm), o valor 65 refere-se à sua esbelteza (l_f/d_f), no qual d_f é o diâmetro da fibra, neste caso, este é de aproximadamente 0,90 mm; 5D refere-se à família da fibra e define o tipo de ancoragem proporcionada por esta, bem como a qualidade do aço; “B” designa o tipo de acabamento da superfície da fibra, nesta situação um acabamento brilhante; por fim, “G” indica que as fibras vêm aglomeradas em banda, ocorrendo a sua dispersão após contacto com a água da amassadura. As fibras respeitavam o exposto na norma NP EN 14889-1:2008.

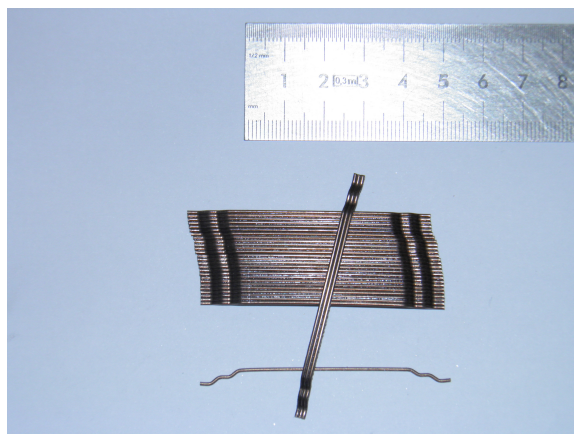


Fig. 4.3 – Fibras Dramix® 5D 65/60 BG

4.1.5. AGREGADOS

A resistência e durabilidade do betão dependem da proporção dos materiais que o constituem. Embora todos eles desempenhem um papel relevante, os ensaios realizados visaram comparar o desempenho e durabilidade dos betões com dosagem de cimento e adjuvante, relação água/cimento, resistência e trabalhabilidade idênticas. A diferença consistiu no tipo de agregado grosso: brita granítica e godo rolado. Com cada tipo de agregado grosso foram usadas 4 dosagens de fibras (0, 20, 40 e 60 kg/m³).

Uma vez que, geralmente, $\frac{3}{4}$ do volume do betão é constituído por agregados, a qualidade deste deve ser de considerável importância. Agregados que possuam propriedades indesejáveis podem não só ter influência na resistência do betão, produzindo assim um betão pouco resistente, como também podem comprometer a durabilidade e desempenho da estrutura. (Neville apud Martins, P., 2008, p.10)

Os agregados têm influência sobre as propriedades dos betões, tanto no estado fresco como no estado endurecido:

- **Estado fresco:** teor de ar ou a massa específica, composição granulométrica, permeabilidade, forma e textura superficial dos agregados.
- **Estado endurecido:** características elásticas e mecânicas e durabilidade.

Para além da resistência do agregado, existem contudo outras características que influem na resistência do betão. As principais propriedades que um certo agregado deve possuir para produzir betão são de origem geométrica, física e química e devem apresentar:

- Adequada forma e dimensões proporcionadas (granulometria), segundo determinadas regras;
- Adequada resistência mecânica;
- Adequadas propriedades térmicas;
- Adequadas propriedades químicas relativamente ao ligante e às ações exteriores;
- Isenção de substâncias prejudiciais.

4.1.5.1. Classificação

Quanto à sua origem, os agregados podem ser classificados como artificiais ou naturais. Os artificiais compreendem as areias e britas provenientes da britagem das rochas bem como as partículas obtidas por reciclagem de determinados materiais. Nesta categoria inserem-se ainda os agregados que são obtidos industrialmente com vista à produção do betão com certas propriedades, como é o caso da argila ou xisto expandidos. Quanto aos agregados naturais, podem ser referidas as areias extraídas de rios e mares bem como os seixos rolados, vulgarmente chamados de godos, obtidos dos leitos dos rios.

4.1.5.2. Propriedades dos agregados

As propriedades dos agregados com maior impacto no comportamento quer do betão fresco como endurecido, são as seguintes:

- Granulometria;
- Forma e textura das partículas;
- Porosidade;
- Absorção;

- Módulo de elasticidade;
- Resistência mecânica.

Seguidamente serão explicadas as duas primeiras propriedades uma vez que apenas estas foram analisadas no presente estudo.

Granulometria

Entende-se por granulometria a distribuição das partículas dos materiais granulares por várias dimensões. A amostra de um agregado é separada em frações, cada uma contendo partículas com dimensões entre limites correspondentes às aberturas dos correspondentes peneiros. Usualmente é expressa em termos de percentagens acumuladas. Em geral, quanto maior a dimensão máxima do agregado, menor será a área superficial por unidade de volume, que deverá ser coberta pela pasta de cimento, para determinada relação A/C. (Mehta and Monteiro apud Martins, P., 2008, p.13)

O resultado de uma análise granulométrica é de muito fácil interpretação e leitura, quando representado graficamente, pois a leitura de uma curva granulométrica permite de uma forma rápida verificar se determinada granulometria de uma amostra se enquadra numa especificação, isto é, se é muito grossa ou muito fina ou se deficiente em determinado tamanho. Desta forma, a granulometria tem elevada relevância sobre a qualidade dos betões, atuando na compacidade e resistência destes.

Forma e textura das partículas

A forma corresponde às características geométricas, tais como arredondadas, angulosas ou achatadas. Partículas geradas por atrito tendem a ser arredondadas, dada a perda de vértices e arestas, como por exemplo areias de depósitos eólicos, areias e pedregulhos de zonas marítimas ou de leitos de rios. Por seu lado, agregados originados de rochas intrusivas britadas possuem vértices e arestas bem definidos e são chamados de angulosos.

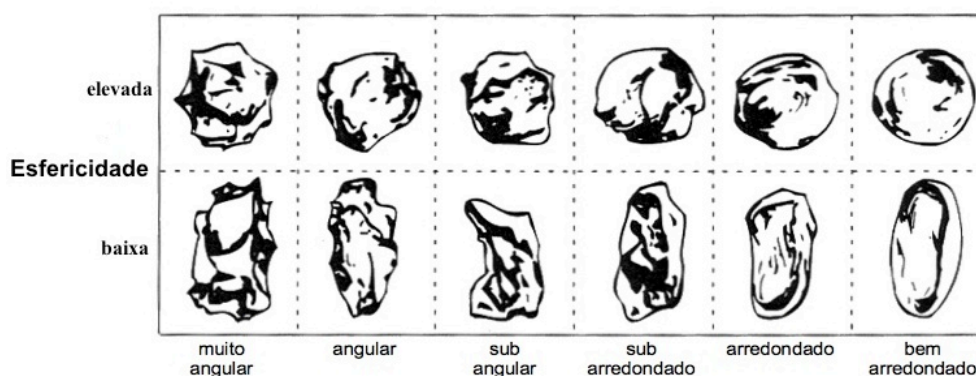


Fig. 4.4 – Forma das partículas. Exemplo de uma classificação usada em petrografia. Adaptado de Coutinho (1999)

Simplificando a classificação exposta na Fig. 4.4, podem-se considerar como partículas achatadas (cuja espessura é relativamente pequena em relação a outras dimensões) ou partículas alongadas (cujo comprimento é consideravelmente maior do que as outras duas dimensões) as que possuem baixa esfericidade. Pode-se assim considerar que as partículas mais indesejáveis para o fabrico de betão são aquelas que são simultaneamente achatadas e alongadas. Por forma a avaliar a forma das partículas,

pode-se recorrer a medições de maneira a determinar parâmetros como o índice de achatamento, o índice de forma ou o índice volumétrico.

Quando postas em comparação com as partículas lisas e arredondadas, as partículas de textura áspera, angulosas e alongadas requerem mais pasta de cimento para produzir misturas trabalháveis, aumentado com isto o custo do betão em si. (Mehta and Monteiro apud Martins, P., 2008, p.15)

Segundo Maia (apud Martins, P., 2008, p.15), existem evidências de que, pelo menos nas primeiras idades, a resistência do betão, em especial a resistência à flexão, pode ser afetada pela textura do agregado. Assim, uma textura mais áspera parece favorecer a formação de uma aderência mecânica entre a pasta de cimento e o agregado. Já em idades avançadas, com o desenvolvimento de uma forte aderência química entre a pasta e o agregado, esse efeito pode não ser tão importante.

Para além dos fatores já referidos, o tamanho do agregado influencia também na quantidade de água que a amassadura irá requerer para obter uma dada consistência. (Mehta and Monteiro apud Martins, P., 2008, p.15)

Os agregados grossos e finos devem, de modo geral, ser bem graduados, não devendo existir prevalência de determinada fração a outra. Granulometrias descontínuas, nas quais a fração intermédia não esteja presente, requerem especial atenção e análise por forma a averiguar se se encontram de acordo com as condições de aplicação às quais se destinam. Assim, se a granulometria for contínua e as partículas tenham formas adequadas, é possível obter betões muito compactos e resistentes para dosagens mínimas de cimento, reduzindo também o risco de segregação. (Lea apud Coutinho, J., 1999, p.12)

Influência da forma na trabalhabilidade do betão

Como é de fácil perceção, existe uma diferença nítida entre uma partícula britada e uma partícula rolada. Enquanto a primeira apresenta superfícies planas e arestas vivas, a segunda tem as superfícies arredondadas e as arestas desaparecem. Desta forma, o ângulo de atrito interno do betão fabricado com agregado rolado é menor, possibilitando muitas vezes uma maior trabalhabilidade do betão.

4.1.5.3. Ligação pasta de cimento/agregado

A aderência entre o agregado e a pasta de cimento representa um importante fator na resistência do betão, com especial influência na resistência à flexão, mas também na tensão de rotura, permeabilidade, capilaridade, entre outros. Porém, a natureza deste tipo de ligação ainda não é totalmente conhecida. (Coutinho and Neville apud Coutinho, J., 1999, p.56) A resistência e integridade da ligação pasta cimento/agregado deriva de características da superfície das partículas do agregado e da natureza da matriz cimentícia na interface entre os dois materiais. (Concrete Petrography apud Coutinho, J., 1999, p.56)

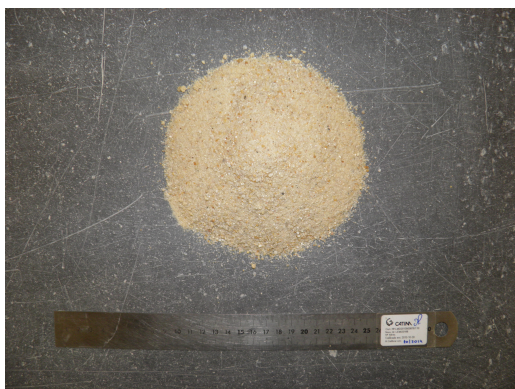
Uma das causas responsável pela perda de aderência entre a pasta de cimento e o agregado prende-se com a presença de pó à superfície das partículas de agregado. (Concrete Petrography apud Coutinho, J., 1999, p.58)

Usualmente, quando a aderência entre a matriz cimentícia e o agregado é elevada, uma amostra de betão quando levada à rotura e seguidamente esmagada, deve apresentar algumas partículas de agregado partidas para além das inúmeras partículas inteiras que se soltam da matriz envolvente. Caso se verifique um elevado número de partículas que fraturam, pode-se concluir que não será possível obter resistências mais elevadas com o agregado em causa. A aderência depende da resistência da

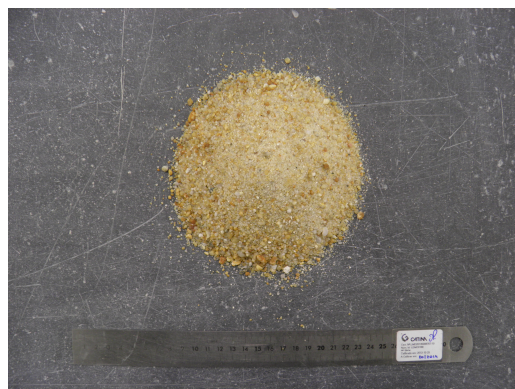
matriz cimentícia e das propriedades do agregado, sendo que esta propriedade pode aumentar com a idade do betão.

4.1.5.4. Agregados Finos

Foram utilizados dois tipos de agregados finos: uma areia de denominação 0/2 e uma outra areia 0/4. As areias empregues, respeitavam o exposto na norma NP EN 12620.



a)



b)

Fig. 4.5 – a) Areia 0/2 e b) Areia 0/4

O resultado da análise da granulometria dos agregados finos, efetuada de acordo com a NP 933-1, está representada pela curva granulométrica na Fig. 4.6.

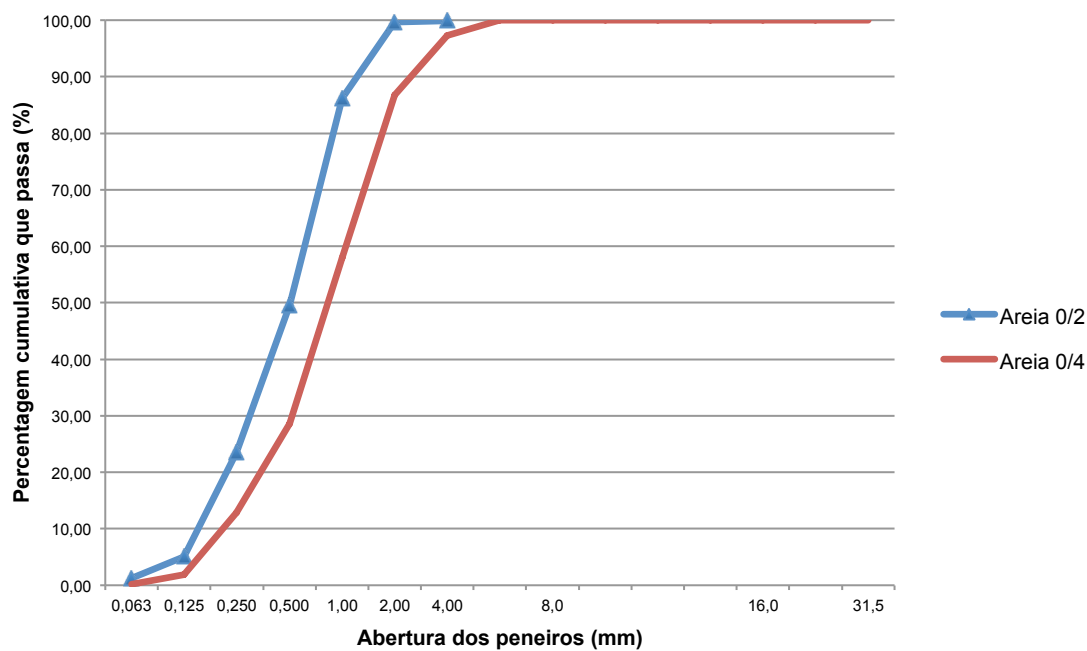


Fig. 4.6 – Curvas granulométricas (série base + série 2) das areias

4.1.5.5. Agregado Grosso: Brita granítica e Godo rolado

Para o agregado grosso foram utilizados dois tipos distintos de agregados: britas e godos, que serviram como um dos fatores diferenciadores e de comparação ao longo do presente trabalho experimental. Os agregados empregues respeitavam o exposto na norma NP EN 12620:2004.

Brita granítica

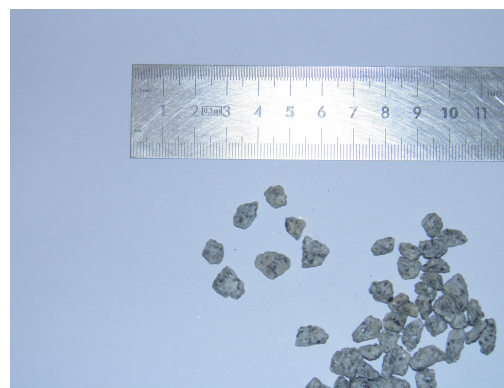
Utilizaram-se três britas graníticas referenciadas como 4/8, 6/14 e 14/20.



a)



b)



c)

Fig. 4.7 – a) Brita 14/20, b) Brita 6/14 e c) Brita 4/8

O resultado da análise da granulometria das britas, efetuada de acordo com a NP 933-1, está representada pelas curvas granulométricas na Fig. 4.8.

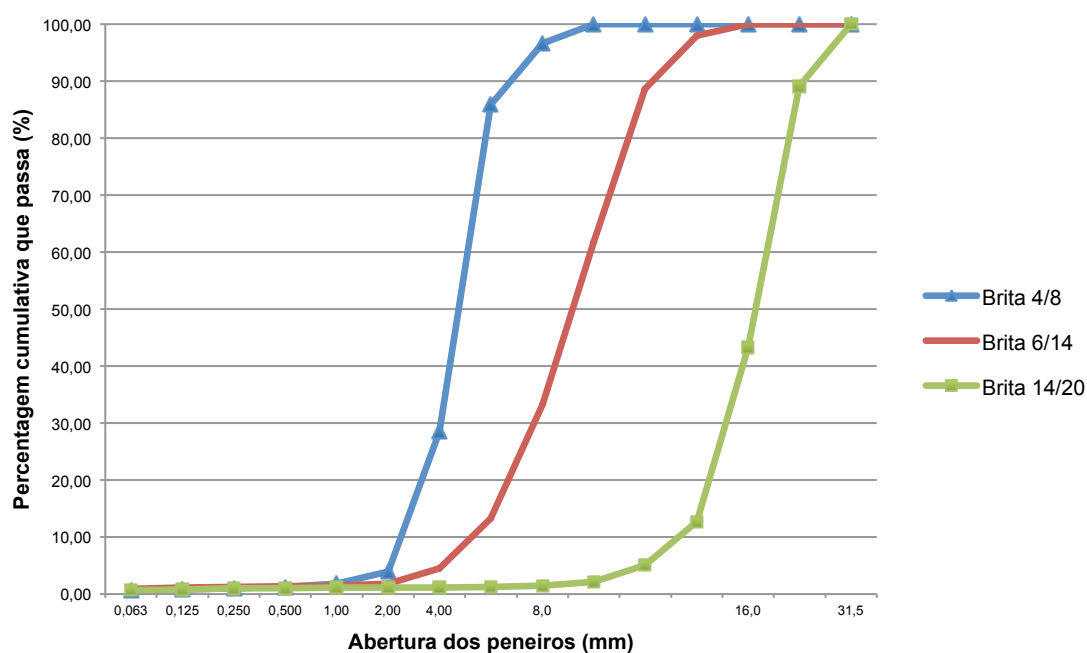


Fig. 4.8 – Curvas granulométricas (série base + série 2) das britas graníticas

Godo rolado

Utilizaram-se dois tipos godos rolados (4/12 e 10/20).



a)



b)

Fig. 4.9 – a) Godo 10/20 e b) Godo 4/12

O resultado da análise da granulometria dos godos, efetuada de acordo com a NP 933-1, está representada pela curva granulométrica na Fig. 4.10.

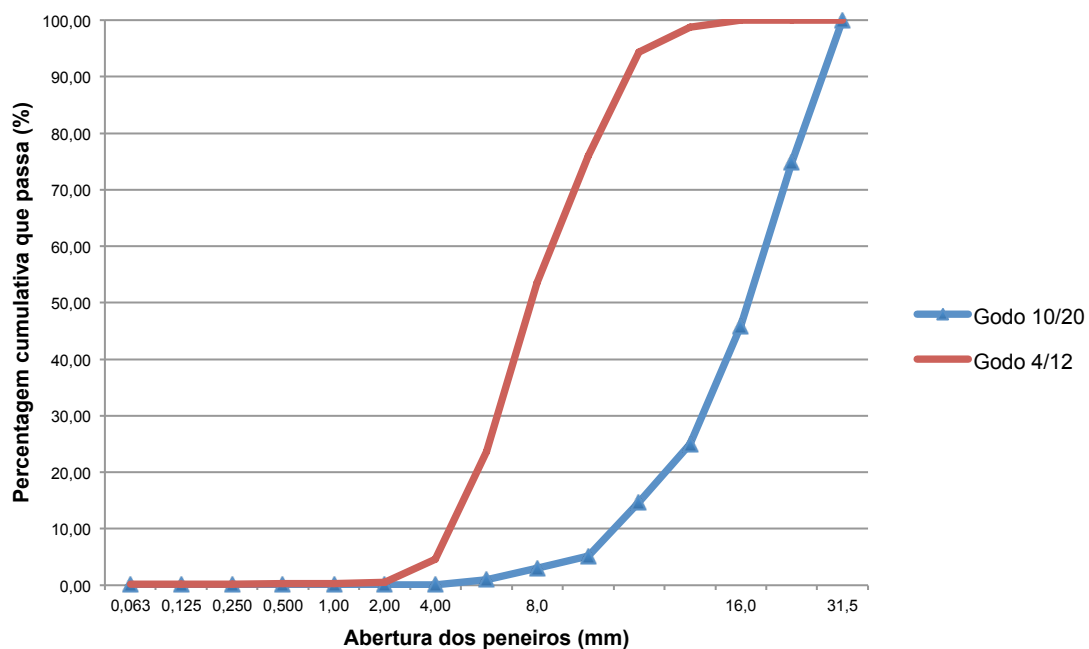


Fig. 4.10 – Curvas granulométricas (série base + série 2) dos godos rolados

4.1.5.6. Índice de Achatamento e Índice de Forma dos agregados grossos

Foram realizados ensaios para avaliação do Índice de Achatamento e de Forma, de acordo com a EN 933-3:2012 e a NP EN 933-4:2008, respetivamente. Estes ensaios visaram obter uma melhor caracterização do tipo de agregados utilizados.

- **Índice de Achatamento**

Através do índice de achatamento é possível inferir sobre a forma da partícula, distinguindo estas entre formas mais arredondadas (valores próximos de 0) e formas mais achatadas (valores próximos de 100).

No Quadro 4.1, estão expressos os valores obtidos dos índices de achatamento de cada tipo de agregado utilizado.

Quadro 4.1 – Valores de Índices de achatamento

Tipo de Agregado	Índice de Achatamento (%)
Brita 14/20	4
Brita 6/14	11
Brita 4/8	6
Godo 10/20	10
Godo 4/12	6

Depreende-se desta forma que, ambos os agregados utilizados na produção do betão (britas e godos), apresentam um valor relativamente baixo de índice de achatamento o que leva a concluir que têm uma forma mais arredondada do que achatada, diminuindo assim o risco da criação de planos privilegiados de rotura.

- **Índice de Forma**

Quando uma partícula apresenta uma relação entre o seu comprimento e espessura (menor dimensão) superior a 3 é considerada não cúbica.

No Quadro 4.2, expõem-se os valores obtidos dos índices de forma de cada tipo de agregado utilizado.

Quadro 4.2 – Valores de índices de forma

Tipo de Agregado	Índice de Forma (%)
Brita 14/20	4
Brita 6/14	15
Brita 4/8	6
Godo 10/20	7
Godo 4/12	8

Pode-se assim deste modo concluir que, de maneira geral, tanto as britas como os godos apresentam partículas com predominância para uma forma cúbica em oposição a uma forma não cúbica.

4.2. MÉTODOS SEGUIDOS

4.2.1. PRODUÇÃO DO BETÃO

Para a produção do betão, recorreu-se a uma betoneira de eixo vertical de capacidade máxima de 270 litros. Os materiais foram adicionados sucessivamente no tambor, começando-se pelo agregado mais grosso até ao mais fino, seguido do cimento. Os materiais até aqui vertidos na betoneira foram primeiramente misturados a seco durante cerca de um minuto. Por fim, acrescentou-se a água, o adjuvante e as fibras, no caso do betão com fibras, por esta ordem, prosseguindo a mistura dos constituintes até homogeneização da mistura.

Os betões em que o agregado grosso é brita granítica foram designados pela letra B tendo sido a letra G destinada a betões em que o agregado grosso é o godo. O número a seguir a cada uma destas letras corresponde à dosagem de fibras, expressas em kg/m³.

Foram realizadas 4 amassaduras em que o agregado grosso é brita e com dosagens de fibras de 0, 20, 40 e 60 kg/m³. Com o godo como agregado grosso foram realizadas igualmente 4 amassaduras, também estas com as mesmas dosagens de fibras.

Como anteriormente mencionado, as duas composições de betão – composição de betão com britas e composição de betão com godos – têm idêntica quantidade de cimento, de adjuvante e de água; a

tensão de rotura à compressão é também ela semelhante. A diferença fundamental está no tipo de agregado grosso – brita ou godo.



Fig. 4.11 – Processo de amassadura

Os Quadros 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 expõem os ensaios que foram realizados, as normas usadas e a quantidade de provetes produzida por cada dosagem de fibras. Importa ainda mencionar que, ao contrário do vulgarmente convencionado, os ensaios dos 28 e 56 dias não se realizaram nessas idades, passando a serem realizados aos 35 e 63 dias, respetivamente. Este atraso deveu-se a um problema de logística no transporte dos prismas para o *Concrete Laboratory* da Bekaert na Bélgica. Como se tratam de ensaios comparativos, é essencial que todos os provetes tenham a mesma idade, daí este adiamento nas datas de ensaio.

Quadro 4.3 – Tipo e quantidade de provetes produzidos por amassadura e idade à data do ensaio (B0 e B20)

Ensaio		Provete		Nº de provetes por ensaio e idade (dias) à data de ensaio			
		Tipo	Medida (cm)	7	35	63	90
B0	Resistência à compressão (NP EN 12390-3:2009)	Cubo	15x15x15	3	3	-	3
		Cilindro	Ø15x30	3	3	-	3
	Flexão LEMC (NP EN 12390-5:2009)	Prisma	15x15x60	-	2	-	-
		Bekaert (EN 14651:2005)	Prisma	15x15x60	-	-	-
	Módulo de elasticidade (DIN 1048-5:1991)	Cilindro	Ø15x30	3	3	-	3
	Absorção de água à pressão atmosférica (E 394-1993)	Cubo	15x15x15	-	3	-	3
	Absorção de água por capilaridade (RILEM TC 116-PCD)	Patela	Ø15x5	-	3	-	3
B20	Permeabilidade ao oxigénio (E 392-1993)	Patela	Ø15x5	-	-	3	-
	Resistência à compressão (NP EN 12390-3:2009)	Cubo	15x15x15	3	3	-	3
		Cilindro	Ø15x30	3	3	-	3
	Flexão LEMC (NP EN 12390-5:2009)	Prisma	15x15x60	-	-	-	-
		Bekaert (EN 14651:2005)	Prisma	15x15x60	-	9	5
	Módulo de elasticidade (DIN 1048-5:1991)	Cilindro	Ø15x30	3	3	-	3
	Absorção de água à pressão atmosférica (E 394-1993)	Cubo	15x15x15	-	3	-	3
	Absorção de água por capilaridade (RILEM TC 116-PCD)	Patela	Ø15x5	-	3	-	3
	Permeabilidade ao oxigénio (E 392-1993)	Patela	Ø15x5	-	-	3	-

Quadro 4.4 – Tipo e quantidade de provetes produzidos por amassadura e idade à data do ensaio (B40 e B60)

Ensaio		Provete		Nº de provetes por ensaio e idade (dias) à data de ensaio			
		Tipo	Medida (cm)	7	35	63	90
B40	Resistência à compressão (NP EN 12390-3:2009)	Cubo	15x15x15	3	3	-	3
		Cilindro	Ø15x30	3	3	-	3
	Flexão LEMC (NP EN 12390-5:2009) Bekaert (EN 14651:2005)	Prisma	15x15x60	-	-	-	-
		Prisma	15x15x60	-	9	-	5
	Módulo de elasticidade (DIN 1048-5:1991)	Cilindro	Ø15x30	3	3	-	3
	Absorção de água à pressão atmosférica (E 394-1993)	Cubo	15x15x15	-	3	-	3
	Absorção de água por capilaridade (RILEM TC 116-PCD)	Patela	Ø15x5	-	3	-	3
	Permeabilidade ao oxigénio (E 392-1993)	Patela	Ø15x5	-	-	3	-
B60	Resistência à compressão (NP EN 12390-3:2009)	Cubo	15x15x15	3	3	-	3
		Cilindro	Ø15x30	3	3	-	3
	Flexão LEMC (NP EN 12390-5:2009) Bekaert (EN 14651:2005)	Prisma	15x15x60	-	-	-	-
		Prisma	15x15x60	-	9	-	5
	Módulo de elasticidade (DIN 1048-5:1991)	Cilindro	Ø15x30	3	3	-	3
	Absorção de água à pressão atmosférica (E 394-1993)	Cubo	15x15x15	-	3	-	3
	Absorção de água por capilaridade (RILEM TC 116-PCD)	Patela	Ø15x5	-	3	-	3
	Permeabilidade ao oxigénio (E 392-1993)	Patela	Ø15x5	-	-	3	-

Quadro 4.5 – Tipo e quantidade de provetes produzidos por amassadura e idade à data do ensaio (G0 e G20)

Ensaio		Provete		Nº de provetes por ensaio e idade (dias) à data de ensaio			
		Tipo	Medida (cm)	7	35	63	90
G0	Resistência à compressão (NP EN 12390-3:2009)	Cubo	15x15x15	3	3	-	3
		Cilindro	Ø15x30	3	3	-	3
	Flexão LEMC (NP EN 12390-5:2009) Bekaert (EN 14651:2005)	Prisma	15x15x60	-	2	-	-
		Prisma	15x15x60	-	-	-	-
	Módulo de elasticidade (DIN 1048-5:1991)	Cilindro	Ø15x30	3	3	-	3
	Absorção de água à pressão atmosférica (E 394-1993)	Cubo	15x15x15	-	3	-	3
	Absorção de água por capilaridade (RILEM TC 116-PCD)	Patela	Ø15x5	-	3	-	3
G20	Permeabilidade ao oxigénio (E 392-1993)	Patela	Ø15x5	-	-	3	-
	Resistência à compressão (NP EN 12390-3:2009)	Cubo	15x15x15	3	3	-	3
		Cilindro	Ø15x30	3	3	-	3
	Flexão LEMC (NP EN 12390-5:2009) Bekaert (EN 14651:2005)	Prisma	15x15x60	-	-	-	-
		Prisma	15x15x60	-	9	-	5
	Módulo de elasticidade (DIN 1048-5:1991)	Cilindro	Ø15x30	3	3	-	3
	Absorção de água à pressão atmosférica (E 394-1993)	Cubo	15x15x15	-	3	-	3
	Absorção de água por capilaridade (RILEM TC 116-PCD)	Patela	Ø15x5	-	3	-	3
	Permeabilidade ao oxigénio (E 392-1993)	Patela	Ø15x5	-	-	3	-

Quadro 4.6 – Tipo e quantidade de provetes produzidos por amassadura e idade à data do ensaio (G40 e G60)

Ensaio		Provete		Nº de provetes por ensaio e idade (dias) à data de ensaio			
		Tipo	Medida (cm)	7	35	63	90
G40	Resistência à compressão (NP EN 12390-3:2009)	Cubo	15x15x15	3	3	-	3
		Cilindro	Ø15x30	3	3	-	3
	Flexão (NP EN 12390-5:2009)	Prisma	15x15x60	-	-	-	-
		Bekaert (EN 14651:2005)	Prisma	15x15x60	-	9	-
	Módulo de elasticidade (DIN 1048-5:1991)	Cilindro	Ø15x30	3	3	-	3
	Absorção de água à pressão atmosférica (E 394-1993)	Cubo	15x15x15	-	3	-	3
	Absorção de água por capilaridade (RILEM TC 116-PCD)	Patela	Ø15x5	-	3	-	3
	Permeabilidade ao oxigénio (E 392-1993)	Patela	Ø15x5	-	-	3	-
G60	Resistência à compressão (NP EN 12390-3:2009)	Cubo	15x15x15	3	3	-	3
		Cilindro	Ø15x30	3	3	-	3
	Flexão (NP EN 12390-5:2009)	Prisma	15x15x60	-	-	-	-
		Bekaert (EN 14651:2005)	Prisma	15x15x60	-	9	-
	Módulo de elasticidade (DIN 1048-5:1991)	Cilindro	Ø15x30	3	3	-	3
	Absorção de água à pressão atmosférica (E 394-1993)	Cubo	15x15x15	-	3	-	3
	Absorção de água por capilaridade (RILEM TC 116-PCD)	Patela	Ø15x5	-	3	-	3
	Permeabilidade ao oxigénio (E 392-1993)	Patela	Ø15x5	-	-	3	-

4.2.2. COLOCAÇÃO E COMPACTAÇÃO

As etapas de colocação e compactação são, juntamente com a cura, de extrema importância em termos de qualidade de produto final. A compactação tem como objetivo retirar o ar excedente no betão e deve ser efetuado de modo a não produzir a segregação do betão.

Procedimento Seguido

Para a compactação, o betão foi manualmente disposto com recurso a pás, nos respetivos moldes (oleados previamente), com o cuidado de o mesmo ser depositado o mais próximo possível da sua posição final, evitando assim a segregação. Quase em simultâneo à etapa de colocação o betão era vibrado, maioritariamente, recorrendo a um vibrador de agulha. Assim que se entendia ter sido libertado o máximo de ar possível contido na amassadura, interrompia-se o procedimento de modo a não comprometer a homogeneidade da composição. No Quadro 4.7 apresentam-se os métodos de compactação utilizados para cada amassadura.

Quadro 4.7 – Métodos de compactação utilizados em cada amassadura

	B0	B20	B40	B60
	Vibrador de agulha	Vibrador de agulha	Mesa vibratória/ Vibrador de agulha	Vibrador de agulha
Método de compactação	G0	G20	G40	G60
	Vibrador de agulha	Vibrador de agulha	Vibrador de agulha	Vibrador de agulha

Para cada amassadura produzida e de modo a caracterizar o comportamento do betão fresco, foram realizados os ensaios de Massa Volúmica e Teor em Ar do betão fresco (Fig. 4.12), segundo as normas NP EN 12350-6:2009 e NP EN 12350-7:2009, respetivamente. Os resultados dos ensaios encontram-se sintetizados no Quadro 4.8. Sempre que a amassadura em causa não possuía fibras, o teste de *slump* era realizado pois, sempre que aplicável, este ensaio consegue indicar valores adequados para os quais a colocação e vibração do betão é realizada com facilidade (indicador de trabalhabilidade).

A avaliação da trabalhabilidade do betão com fibras não pode ser realizada através do ensaio de *slump*; existe para o efeito um ensaio adequado – medidor de trabalhabilidade do betão (NF P18 – 452). No caso presente, a adição de fibras não modificou o aspeto do betão, continuando o seu comportamento, enquanto betão fresco, a ser idêntico ao do betão sem fibras.



Fig. 4.12 – Ensaio de teor em ar

Quadro 4.8 – Ensaios de caracterização do betão fresco

Ensaio caracterização betão fresco	B0	B20	B40	B60	G0	G20	G40	G60
Teor em ar (%)	2,3	1,4	1,5	1,3	2,4	1,5	1,7	1,7
Massa Volúmica (kg/m ³)	2356	2408	2416	2437	2374	2406	2429	2432
Teste de <i>slump</i> (mm)	220	-	-	-	210	-	-	-

4.2.3. CONDIÇÕES DE CURA

Após realizada a moldagem, os provetes foram mantidos no laboratório e à temperatura ambiente por um período de 24 horas, contudo cobertos por uma película plástica (filme de polietileno) de maneira a impedir a evaporação da água do betão. Posteriormente desmoldados, foram transportados para a câmara de cura onde permaneceram até aos respetivos ensaios. A câmara de cura está a uma temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2$ e uma humidade relativa superior a 95%.

Todo este processo de cura decorreu conforme o exposto na norma NP EN 12390-2:2009.



Fig. 4.13 – Provetes mantidos no laboratório, cobertos por uma película de polietileno

4.3. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

4.3.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os ensaios de compressão foram executados segundo o procedimento descrito na norma NP EN 12390-3:2009. Os provetes cúbicos apresentavam 150 mm de aresta e os provetes cilíndricos 150 mm de diâmetro, com 300 mm de altura. Ambos os provetes foram moldados por forma a satisfazer os requisitos expostos em EN 12390-1:2009 e curados segundo o procedimento descrito em 4.2.3..

Na Fig. 4.14 pode ser observada a prensa utilizada na realização do ensaio de compressão.



Fig. 4.14 – Ensaio de compressão

4.3.2. FLEXÃO

Quanto aos ensaios de flexão, estes podem ser divididos em duas partes, em que uma porção deles foi ensaiada no LEMC (betão sem fibras) e os restantes enviados para o *Concrete Laboratory* da Bekaert, na Bélgica (betão com fibras). Todos os provetes ensaiados foram moldados de modo a satisfazer as dimensões expostas na NP EN 12390-1:2003 e curados segundo o procedimento descrito em 4.2.3.. Tratavam-se de provetes prismáticos de secção 150 x 150 x 600 mm.

Os provetes ensaiados no LEMC tiveram como orientação a norma NP EN 12390-5:2009.

Por seu lado, os provetes ensaiados na Bekaert seguiram o procedimento descrito na norma EN 14651:2005.

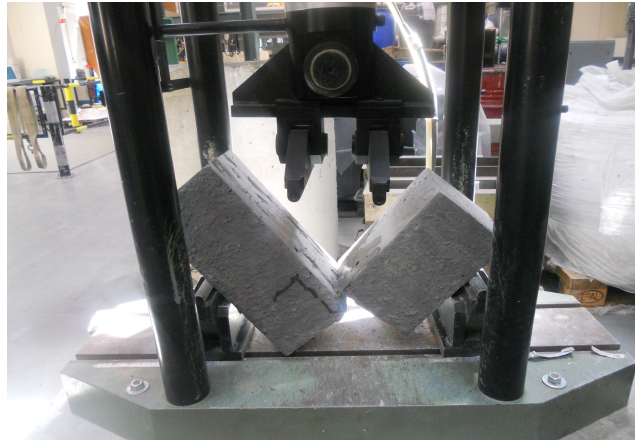


Fig. 4.15 – Ensaio de flexão (LEMC)

4.3.3. MÓDULO DE ELASTICIDADE

A determinação do módulo de elasticidade foi baseado no procedimento descrito na norma alemã DIN 1048-5:1991. Os provetes cilíndricos apresentavam 300 mm de altura e 150 mm de diâmetro. Os provetes foram moldados por forma a satisfazer os requisitos expostos em EN 12390-1:2009 e curados segundo o procedimento descrito em 4.2.3..

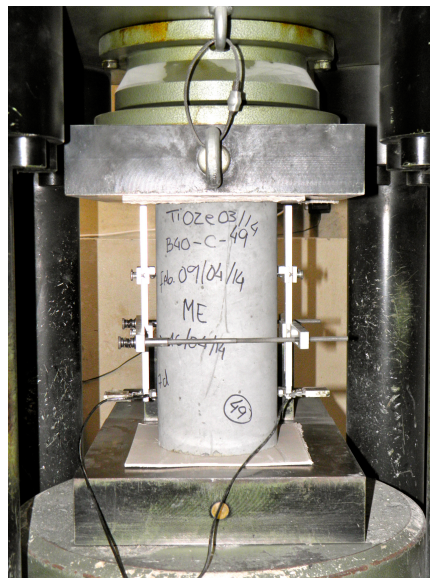


Fig. 4.16 – Ensaio de módulo de elasticidade

4.3.4. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO À PRESSÃO ATMOSFÉRICA

O ensaio de absorção de água à pressão atmosférica executou-se segundo o procedimento descrito na especificação LNEC E 394-1993. No ensaio foram utilizados provetes cúbicos com 150 mm de aresta.

Os provetes foram moldados por forma a satisfazer os requisitos expostos em EN 12390-1:2009 e curados segundo o procedimento descrito em 4.2.3..

A absorção de água por imersão é obtida pela diferença entre a massa do provete imerso em água e a massa do mesmo provete quando seco.

Retirados os provetes da água, as superfícies foram limpas com um pano húmido de modo a absorver a água em excesso, sendo de seguida pesados. A massa dos provetes saturados, m_1 , foi alcançada após imersão destes em água até ser obtida massa constante, em duas pesagens consecutivas intervaladas de pelo menos 24 horas. Assim que alcançada a massa constante, efetuou-se uma pesagem hidrostática, m_2 . Procedeu-se à secagem dos provetes em estufa à temperatura de 105 ± 5 °C, tendo-se tido cuidado o cuidado de, antes de colocar os provetes em estufa, os secar por forma a retirar toda a água à superfície, bem como a água retida nos poros superficiais dos provetes. Mais uma vez, considerou-se a massa constante quando, a diferença entre as massas obtidas em duas pesagens consecutivas, intercaladas de pelo menos 24 horas, era inferior a 0,1% da média das duas leituras, alcançando-se assim m_3 , massa do provete seco.

A Fig. 4.17 mostra os provetes parcialmente imersos em água.

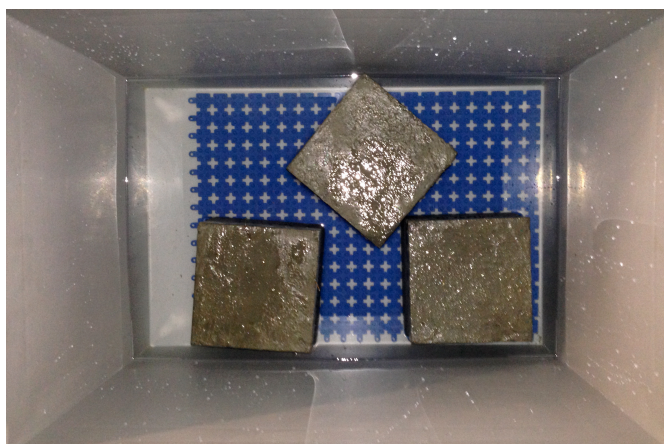


Fig. 4.17 – Provetes parcialmente imersos em água

O valor da absorção de água por imersão, expressa em percentagem, é calculada através da seguinte expressão:

$$A_i = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100 \quad (4.1)$$

na qual:

m_1 – massa do provete saturado no ar, expressa em gramas;

m_2 – massa hidrostática do provete saturado, expressa em gramas;

m_3 – massa do provete seco, expressa em gramas.

4.3.5. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

A obtenção do valor de absorção de água por capilaridade teve por base a recomendação RILEM TC 116-PCD. No entanto, ressalva-se que esta recomendação não foi seguida na íntegra, tendo-se realizado pequenas alterações tidas como necessárias por forma a ser possível realizar os ensaios no tempo disponível. Alterações essas que passarão a ser descritas de seguida. Os provetes ensaiados apresentavam a forma de patela, obtidas por corte, com dimensões de 150 mm de diâmetro e 50 mm de altura. Os provetes foram moldados por forma a satisfazer os requisitos expostos em EN 12390-1:2009 e curados segundo o procedimento descrito em 4.2.3..

Pré-secagem

Depois de cumpridos os tempos de cura estipulados (35 e 90 dias), os provetes foram transportados até à estufa onde permaneceram durante 7 dias à temperatura de $40^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Findo o período de pré-secagem dos provetes em estufa, estes foram retirados da mesma. Posteriormente, os provetes eram deixados a arrefecer no laboratório, à temperatura ambiente, até ao dia seguinte de manhã, havendo o cuidado de os cobrir com uma película de modo a evitar que a humidade ambiente pudesse interferir negativamente na variação da massa destes. Note-se ainda que, tanto no momento em que os provetes saíam da estufa como no dia seguinte de manhã, se procedia à pesagem dos provetes. Este procedimento pretendia analisar valores em termos meramente comparativos. Estipulou-se que a pré-secagem findaria assim que, após duas pesagens consecutivas espaçadas de pelo menos 24 horas, a variação de peso fosse inferior a 0,5 gramas. Como tal situação nunca se verificou, a pré-secagem teve sempre a duração de sete dias.

Preparação dos provetes

Segundo a recomendação RILEM TC 116-PCD, os provetes necessitariam de ser selados na sua superfície lateral com fita-cola, parafina ou algum tipo de tinta epóxi. Porém, dada a experiência adquirida pelo LEMC e pela orientadora do presente trabalho, bem como pela leitura de alguma bibliografia sobre a matéria em causa, considerou-se mais sensato ignorar este passo e não selar lateralmente os provetes.

Desta etapa em diante, todos os procedimentos seguidos cumprem o sugerido pela RILEM TC 116-PCD.

Segundo mostra a Fig. 4.18, a superfície do topo dos provetes foi coberta e selada por uma proteção de plástico impermeável e flexível. Após realizada esta selagem, os provetes foram novamente pesados.

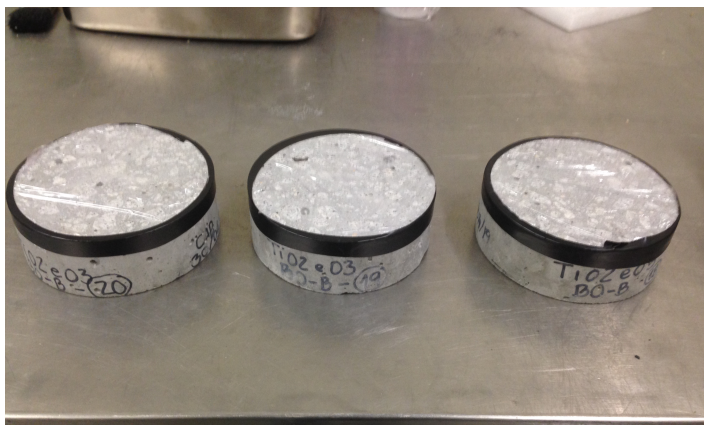


Fig. 4.18 – Selagem no topo dos provetes

Procedimento do ensaio:

- Tanto os provetes como o reservatório de água encontravam-se à temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$;
- A massa dos provetes foi medida imediatamente antes de se realizar o ensaio (com uma precisão de 0,1 g);
- A face moldada correspondia à face que ficou submersa, tendo ficado a água a um nível de, no máximo, 3 mm acima da base;
- As medidas foram realizadas em intervalos de 10 min (até perfazerem uma 1 h), 1 h, 4 h e 24 h. Antes de se realizar as pesagens, a superfície em contacto com a água foi previamente limpa com um pano húmido, não absorvente, de modo a retirar a água em excesso, mantendo-se no entanto a mesma húmida.

O valor da absorção de água por capilaridade, expressa em g/m^2 , é calculada para cada provete e respetivo tempo de leitura, através da seguinte expressão:

$$w(t) = \frac{m(t) - m_0}{A} \quad (4.2)$$

na qual:

$m(t)$ – massa do provete em cada intervalo de tempo, expressa em gramas;

m_0 – massa do provete depois de coberto o seu topo com película e antes da colocação em contacto com a água, expressa em gramas;

A – área do provete em contacto com a água, expressa em m^2 .

4.3.6. PERMEABILIDADE AO OXIGÉNIO

Para medir a permeabilidade ao oxigénio dos provetes de betão teve-se como base a Especificação do LNEC E 392-1993. Os provetes foram moldados por forma a satisfazer os requisitos expostos em EN 12390-1:2009 e curados segundo o procedimento descrito na Especificação do LNEC E 392-1993.

Os provetes cilíndricos ensaiados com 150 mm de diâmetro e 50 mm de altura foram obtidos por corte dos cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura.

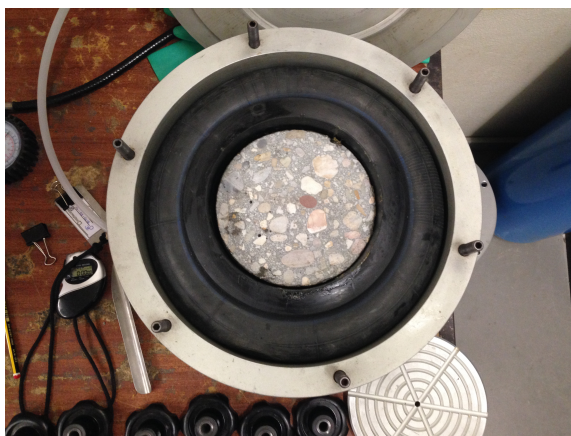


Fig. 4.19 – Provede na câmara de ensaio

5

BETÃO: RESULTADOS E ANÁLISE

5.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo são expostos e interpretados os resultados dos ensaios de caracterização do betão realizados com o objetivo de perceber a influência que diversas dosagens de fibras de aço (gama Dramix® 5D 60/65 BG) conjugado com dois tipos distintos de agregado grosso (britas e godos) têm no comportamento do betão com especial foco nos aspetos da durabilidade da estrutura.

5.2. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

5.2.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (NP EN 12390-3:2009)

Os ensaios de resistência à compressão foram concretizados segundo o procedimento descrito em 4.3.2..

5.2.1.1. Resistência à compressão do betão com brita granítica obtida por ensaios de cubos (15x15x15 cm)

No Quadro 5.1 estão expostos os resultados do ensaio de compressão do betão com britas.

Quadro 5.1 – Resistências à compressão do betão com brita granítica (cubos)

Amassadura	Idade (dias)	Tensão de rotura Valores individuais (MPa)	Tensão de rotura Valor médio (MPa)
B0	7	63,0	64,7
		66,4	
		64,6	
	35	76,1	77,4
		77,4	
		78,8	
	90	84,5	85,2
		85,4	
		85,8	
B20	7	72,0	72,2
		72,1	
		72,5	
	35	90,2	89,2
		87,6	
		89,8	
	90	98,3	99,6
		101,5	
		99,0	
B40	7	71,3	72,5
		73,3	
		72,8	
	35	90,5	89,7
		89,1	
		89,6	
	90	101,0	102,1
		101,5	
		103,8	
B60	7	72,6	73,3
		73,1	
		74,2	
	35	92,3	91,4
		90,6	
		91,4	
	90	-	-
		-	
		-	

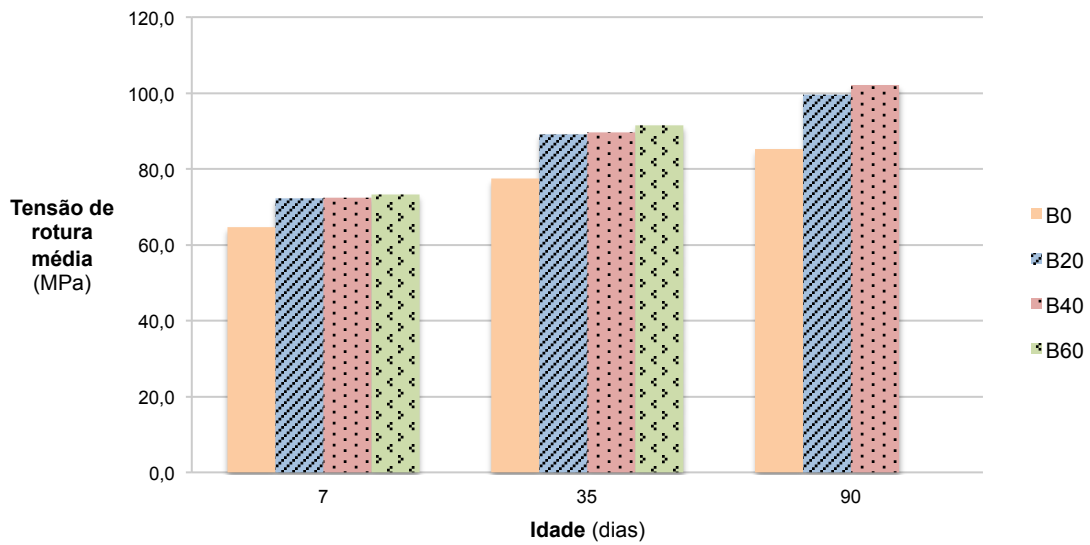


Fig. 5.1 – Resistência à compressão média do betão com brita granítica (cubos)

Pelo exposto no gráfico da Fig. 5.1 é possível observar que existe um aumento gradual no valor das tensões com o aumento da idade do provete à data do ensaio que era expectável atendendo a que o cimento é do tipo CEM IV 32,5 R-SR. Os provetes sem fibras apresentam valores menores de resistência à compressão do que aquelas verificadas em provetes de igual idade embora contendo fibras na sua composição. Este aumento na tensão de rotura (verificável no Quadro 5.1) permite constatar que existe um contributo favorável na resistência à compressão proporcionado pelo uso de fibras. É ainda possível verificar o aumento das tensões com o aumento da dosagem de fibras.

Ressalva-se ainda que, por lapso, os provetes cúbicos de brita contendo 60 kg/m^3 à idade de 90 dias, foram trocados e ensaiados numa data errada à prevista, motivo pelo qual não se procedeu ao ensaio.

No Quadro 5.2 estão indicadas as variações entre as tensões das amassaduras do betão com fibras e o betão de referência, sem fibras.

Quadro 5.2 – Variação das tensões entre o betão sem fibras e os betões com fibras (cubos)

Amassadura	Idade (dias)	Tensão de rotura Valor médio (MPa)	Variação da tensão (relativa a B0)	
			(MPa)	(%)
B0	7	64,7	Valores de referência	
	35	77,4		
	90	85,2		
B20	7	72,2	7,5	11,6
	35	89,2	11,8	15,2
	90	99,6	14,4	16,9
B40	7	72,5	7,8	12,1
	35	89,7	12,3	15,9
	90	102,1	16,9	19,8
B60	7	73,3	8,6	13,3
	35	91,4	14,0	18,1
	90	-	-	-

Pela análise do Quadro 5.2 verifica-se a melhoria proporcional ao aumento da quantidade de fibras e à idade do betão. Para betões com 60 kg/m^3 atingem-se benefícios de 18% ainda aos 35 dias.

O Quadro 5.3 apresenta os resultados das resistências à compressão obtidas por ensaios a cubos extraídos dos primas ensaiados à flexão (Bekaert). Estes cubos, foram também eles ensaiados no *Concrete Laboratory* da Bekaert.

Quadro 5.3 – Resistências à compressão do betão com brita granítica (cubos)

Amassadura	Provete	Idade (dias)	$f_{c,m}$ (MPa)
B20	DR2043-A-1	39	97,8
	DR2043-A-2	102	93,3
B40	DR2043-B-1	37	92,2
	DR2043-B-2	100	106,7
B60	DR2043-C-1	39	92,4
	DR2043-C-2	95	106,2

Pela análise dos Quadros 5.2 e 5.3 é possível verificar uma grande diferença na amassadura B20 entre os valores de compressão em betão (cubos) dos ensaios realizados no LEMC e na Bekaert.

5.2.1.2. Resistência à compressão do betão com godo rolado obtida por ensaios de cubos (15x15x15 cm)

No Quadro 5.4 estão expostos os resultados do ensaio de compressão do betão com godos.

Quadro 5.4 – Resistências à compressão do betão com godo rolado (cubos)

Amassadura	Idade (dias)	Tensão de rotura Valores individuais (MPa)	Tensão de rotura Valor médio (MPa)
G0	7	68,6	67,7
		67,7	
		66,9	
	35	86,3	83,6
		81,4	
		83,1	
	90	90,7	92,9
		95,6	
		92,4	
G20	7	70,6	70,9
		71,4	
		70,6	
	35	82,1	83,4
		83,2	
		85,0	
	90	91,4	93,8
		94,2	
		95,7	
G40	7	68,6	69,4
		69,5	
		70,2	
	35	83,6	83,1
		82,5	
		83,3	
	90	87,8	89,0
		87,3	
		91,8	
G60	7	76,0	75,5
		74,8	
		75,7	
	35	88,9	88,9
		87,2	
		90,5	
	90	98,2	100,8
		102,6	
		101,6	

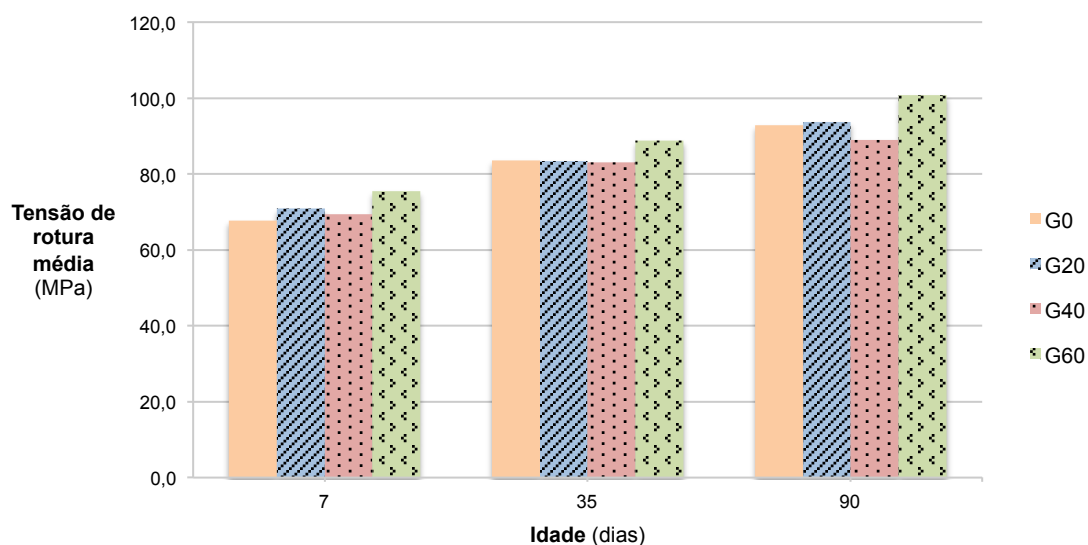


Fig. 5.2 – Resistência à compressão média do betão com godo rolado (cubo)

Constata-se que existe uma evolução gradual no valor das tensões com o aumento da idade dos provetes à data de ensaio (Fig. 5.2) fato que seria expectável atendendo a que o cimento é do tipo CEM IV 32,5 R-SR. À exceção da amassadura G60, comprova-se que os restantes betões apresentam entre si tensões da mesma ordem de grandeza, apenas com subtis diferenças. Destaca-se ainda que a amassadura G40 apresenta valores ligeiramente inferiores para a idade de 90 dias.

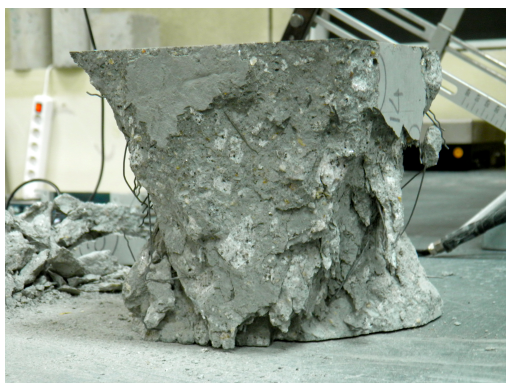


Fig. 5.3 – Modo de fratura do compósito BRFA com brita granítica (esq.) e godo rolado (dir.)

No Quadro 5.5 estão indicadas as variações entre as tensões das amassaduras do betão com fibras e o betão de referência, sem fibras.

Quadro 5.5 – Variação das tensões entre o betão sem fibras e os betões com fibras (cubos)

Amassadura	Idade (dias)	Tensão de rotura Valor médio (MPa)	Variação da tensão (relativa a G0)	
			(MPa)	(%)
G0	7	67,7	Valores de referência	
	35	83,6		
	90	92,9		
G20	7	70,9	3,2	4,9
	35	83,4	-0,2	-0,3
	90	93,8	0,9	1,1
G40	7	69,4	1,7	2,6
	35	83,1	-0,5	-0,6
	90	89,0	-3,9	-4,6
G60	7	75,5	7,8	12,1
	35	88,9	5,3	6,8
	90	100,8	7,9	10,2

Apesar da tendência inconsistente dos resultados, pode-se concluir que na presença de uma quantidade considerável de fibras (60 kg/m^3) as melhorias são de cerca de 10% aos 90 dias.

O Quadro 5.6 apresenta os resultados das resistências à compressão obtidas por ensaios a cubos extraídos dos primas ensaiados à flexão (Bekaert). Estes cubos, foram também eles ensaiados no *Concrete Laboratory* da Bekaert.

Quadro 5.6 – Resistências à compressão do betão com godo (cubos)

Amassadura	Provete	Idade (dias)	$f_{c,m}$ (MPa)
G20	DR2043-D-1	37	85,4
	DR2043-D-2	93	94,4
G40	DR2043-E-1	43	90,8
	DR2043-E-2	88	93,9
G60	DR2043-F-1	41	93,1
	DR2043-F-2	86	105,9

Pela análise dos Quadros 5.5 e 5.6 é possível verificar uma grande diferença na amassadura G40 entre os valores de compressão em betão (cubos) dos ensaios realizados no LEMC e na Bekaert.

5.2.1.3. Resistência à compressão do betão com brita granítica obtida por ensaios de cilindros (Ø15x30 cm)

No Quadro 5.7 estão expostos os resultados do ensaio de compressão do betão com britas.

Quadro 5.7 – Resistências à compressão do betão com brita granítica (cilindros)

Amassadura	Idade (dias)	Tensão de rotura	Tensão de rotura
		Valores individuais (MPa)	Valor médio (MPa)
B0	7	64,3	64,9
		65,3	
		65,0	
	35	82,0	82,8
		82,9	
		83,5	
	90	95,8	96,2
		94,8	
		97,9	
B20	7	64,5	63,4
		64,2	
		61,6	
	35	77,6	79,5
		82,9	
		78,1	
	90	87,1	89,0
		85,3	
		94,7	
B40	7	64,9	64,7
		64,4	
		49,6 a)	
	35	82,1	79,7
		79,0	
		78,0	
	90	87,3	87,1
		94,6	
		79,5	
B60	7	62,7	64,5
		64,5	
		66,2	
	35	82,9	77,9
		73,6	
		77,2	
	90	88,2	89,1
		90,4	
		88,8	

a) dada a grande diferença entre este valor e os restantes da mesma “família”, foi excluído do cálculo da média.

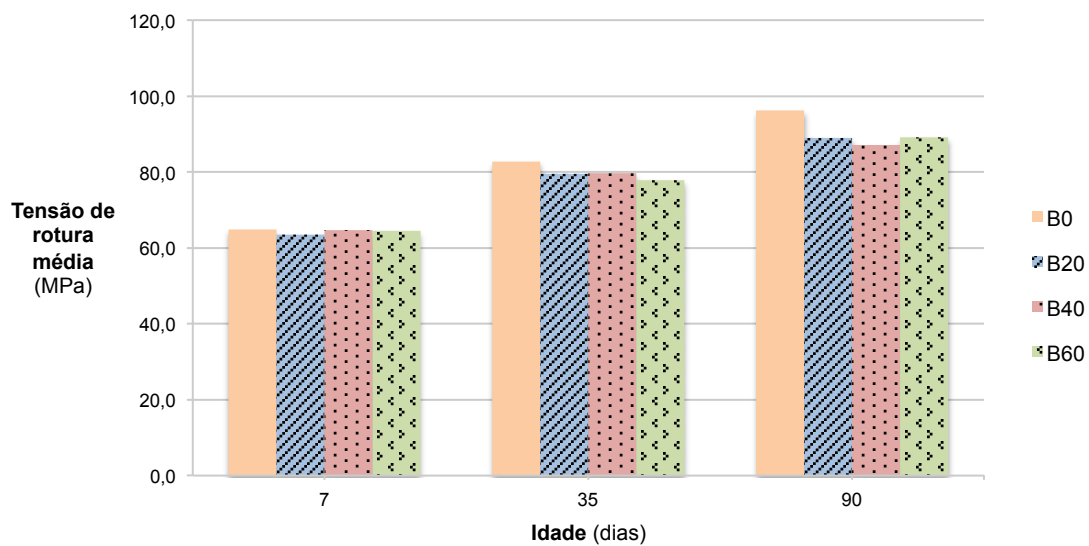


Fig. 5.4 – Resistência à compressão média do betão com brita granítica (cilindros)

Do representado na Fig. 5.4 denota-se que ocorre um aumento gradual no valor das resistências à compressão com o progredir das idades à data dos ensaios. É ainda perceptível que, em todas as idades, a amassadura B0 apresenta tensões ligeiramente maiores. Quanto às restantes amassaduras, apresentam resistências semelhantes entre elas com exceção da amassadura B20 (aos 7 dias); B60 (aos 35 dias) e B40 (aos 90 dias), sendo estas tensões menores. Este fato pode ser justificado pela discrepância que existe nos valores obtidos para os 3 provetes ensaiados de cada amassadura, que se fossem excluídos, aproximar-se-iam dos outros. Alguma desta disparidade de valores na amassadura B40 pode ser explicada pelo fato de, aquando da produção do betão desta amassadura, ter-se mudado o método de vibração, tendo sido usada a mesa vibratória em vez da agulha vibradora.

No Quadro 5.8 estão indicadas as variações entre as tensões das amassaduras do betão com fibras e o betão de referência, sem fibras.

Quadro 5.8 – Variação das tensões entre o betão sem fibras e os betões com fibras (cilindros)

Amassadura	Idade (dias)	Tensão de rotura Valor médio (MPa)	Variação da tensão (relativa a B0)	
			MPa	%
B0	7	64,9	Valores de referência	
	35	82,8		
	90	96,2		
B20	7	63,4	-1,5	-2,3
	35	79,5	-3,3	-4,0
	90	89,0	-7,2	-7,5
B40	7	64,7	-0,2	-0,3
	35	79,7	-3,1	-3,7
	90	87,1	-9,1	-9,5
B60	7	64,5	-0,4	-0,6
	35	77,9	-4,9	-5,9
	90	89,1	-7,1	-7,4

Pela análise do Quadro 5.8 verifica-se o decréscimo das tensões de rotura do betão em cilindros com o aumento da dosagem de fibras, na presença de britas.

5.2.1.4. Resistência à compressão do betão com godo rolado obtida por ensaios de cilindros ($\varnothing 15 \times 30$ cm)

No Quadro 5.9 estão expostos os resultados do ensaio de compressão do betão com godos.

Quadro 5.9 – Resistências à compressão do betão com godo rolado (cilindros)

Amassadura	Idade (dias)	Tensão de rotura Valores individuais (MPa)	Tensão de rotura Valor médio (MPa)
G0	7	58,8	59,5
		60,5	
		59,2	
	35	70,8	68,7
		66,4	
		69,0	
	90	80,6	80,9
		78,6	
		83,4	
G20	7	59,8	60,0
		59,4	
		60,7	
	35	77,2	73,4
		71,0	
		71,9	
	90	78,5	77,6
		82,0	
		72,2	
G40	7	59,3	59,2
		60,4	
		58,0	
	35	65,3	67,9
		67,7	
		70,6	
	90	76,6	76,3
		77,7	
		74,7	
G60	7	59,6	59,3
		58,2	
		60,2	
	35	76,6	75,1
		74,7	
		74,0	
	90	80,6	80,4
		82,3	
		78,2	

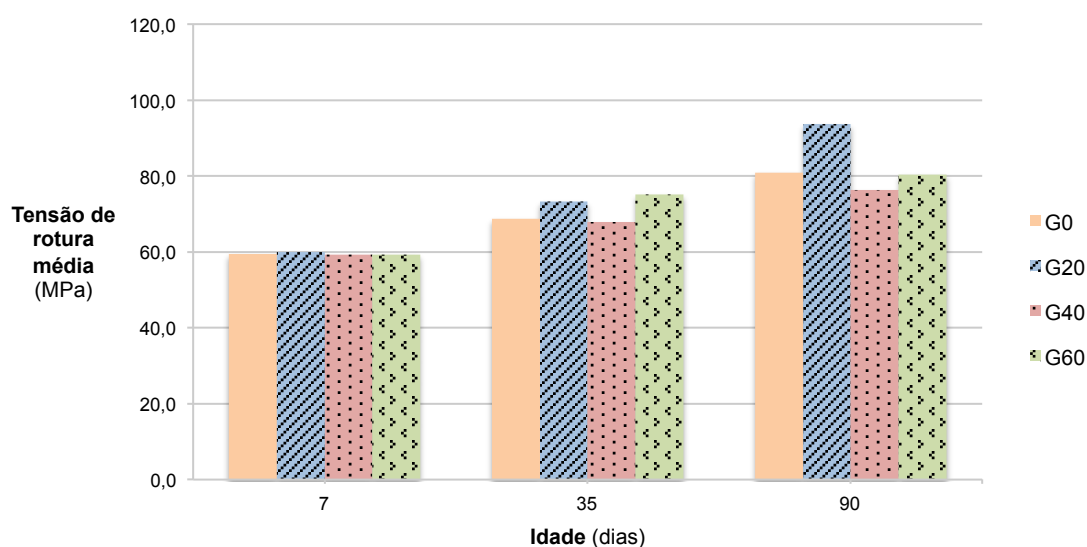


Fig. 5.5 – Resistência à compressão média do betão com godo rolado (cilindros)

Como esperado, dá-se um aumento gradual no valor das tensões com o aumento das idades à data de ensaio. Aos 7 dias de idade, todas as amassaduras apresentam valores de tensão idênticos. Tanto aos 35 como 90 dias, a amassadura G40 apresenta valores inferiores. É de notar também uma diferença na ordem dos 14 MPa na amassadura G20 aos 90 dias de idade, quando comparada com as restantes amassaduras.

No Quadro 5.10 estão indicadas as variações entre as tensões das amassaduras do betão com fibras e o betão de referência, sem fibras.

Quadro 5.10 – Variação das tensões entre o betão sem fibras e os betões com fibras (cilindros)

Amassadura	Idade (dias)	Tensão de rotura Valor médio (MPa)	Variação da tensão (relativa a G0)	
			MPa	%
G0	7	59,5	Valores de referência	
	35	68,7		
	90	80,9		
G20	7	60,0	0,5	0,8
	35	73,4	4,7	5,7
	90	93,8	12,9	13,4
G40	7	59,2	-0,3	-0,5
	35	67,9	-0,8	-1,0
	90	76,3	-4,6	-4,8
G60	7	59,3	-0,2	-0,3
	35	75,1	6,4	7,7
	90	80,4	-0,5	-0,6

Nos valores do Quadro 5.10, relativos a ensaios de compressão de betão com godos em cilindros, não é possível verificar uma tendência devido à inconsistente perda/ganho de resistência ao longo do tempo e com o aumento de fibras.

5.2.2. RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Os ensaios de resistência à flexão foram concretizados segundo o procedimento descrito em 4.3.1..

5.2.2.1. Resistência à flexão do betão sem fibras contendo brita granítica com 35 dias à data de ensaio (NP EN 12390-5:2009)

No Quadro 5.11 são apresentados os resultados relativos ao ensaio de prismas de betão com brita, aos 35 dias de idade à data de ensaio, segundo a norma NP EN 12390-5:2009.

Quadro 5.11 – Resistências à flexão do betão com brita granítica

Amassadura	Provete	Resistência à flexão	Resistência à flexão
		Valores individuais (MPa)	Valor médio (MPa)
B0	1	9,0	8,9
	2	8,7	

5.2.2.2. Resistência à flexão do betão contendo brita granítica com 35 dias à data de ensaio (EN 14651:2005)

Nos Quadros 5.12, 5.13 e 5.14 e nas Fig. 5.6, 5.7 e 5.8 apresentam-se os resultados obtidos dos ensaios segundo a norma EN 14651:2005, em prismas de betão com brita e com 35 dias de idade à data de ensaio.

Quadro 5.12 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do betão com fibras (20 kg/m³ de fibras 5D)

Specimen ID	Provete	Delta f_L (mm)	f_L (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)
42155	1	0,0514	6,43	4,93	6,33	6,96	5,44
42156	2	0,0569	7,32	5,52	7,75	8,43	6,96
42157	3	0,0581	6,91	4,65	6,33	7,11	5,91
42158	4	0,0430	7,08	6,76	8,68	9,40	8,99
B20 42159	5	0,0765	7,46	6,87	9,53	10,34	9,42
42160	6	0,0663	6,95	3,32	4,22	4,70	3,27
42161	7	0,0573	6,98	4,69	4,43	4,30	2,28
42162	8	0,0571	6,64	4,54	6,11	6,39	5,23
42163	9	0,0568	6,47	4,92	6,72	7,28	6,50
Média		0,0581	6,92	5,13	6,68	7,21	6,00
Desvio Padrão		0,0092	0,35	1,12	1,77	1,99	2,35
Coeficiente de Variação		16	5	22	27	28	39

f_L – limite de proporcionalidade

$f_{R,1}$ – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 0,47 mm;

$f_{R,2}$ – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 1,32 mm;

$f_{R,3}$ – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 2,17 mm;

$f_{R,4}$ – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 3,02 mm.

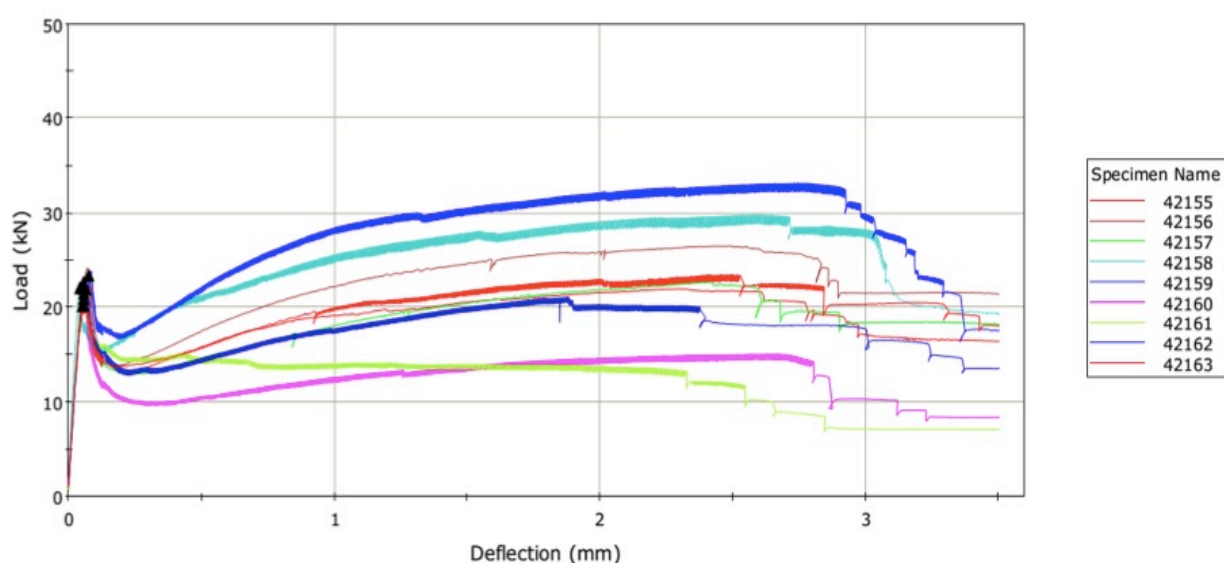


Fig. 5.6 – Curvas da resistência à flexão de betão com brita granítica (20 kg/m³)

Na amassadura B20 é visível um comportamento homogêneo entre provetes. Os valores $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ e $f_{R,4}$ que “definem” um “patamar” de cedência proporcionado pelas fibras, apresentam valores não muito superiores ao limite de proporcionalidade (f_L).

Quadro 5.13 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do betão com fibras (40 kg/m³ de fibras 5D)

Specimen ID	Provete	Delta f_L (mm)	f_L (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)
42170	1	0,0571	7,15	6,03	7,52	7,10	6,56
42171	2	0,0572	7,57	8,67	12,64	11,54	7,89
42172	3	0,0599	7,67	7,93	9,47	8,66	6,76
42173	4	0,0613	7,72	7,48	10,00	10,60	8,78
B40 42174	5	0,0478	6,86	5,27	6,79	7,34	4,57
42175	6	0,0686	7,78	8,24	11,47	13,07	7,86
42176	7	0,0723	7,98	7,50	10,10	10,17	7,30
42177	8	0,0579	7,74	9,18	10,67	8,56	7,53
42178	9	0,0577	6,91	6,01	7,88	7,43	4,86
Média		0,0600	7,49	7,37	9,62	9,39	6,90
Desvio Padrão		0,0071	0,41	1,33	1,92	2,08	1,40
Coeficiente de Variação		12	5	18	20	22	20

f_L – limite de proporcionalidade

f_{R1} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 0,47 mm;

f_{R2} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 1,32 mm;

f_{R3} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 2,17 mm;

f_{R4} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 3,02 mm.

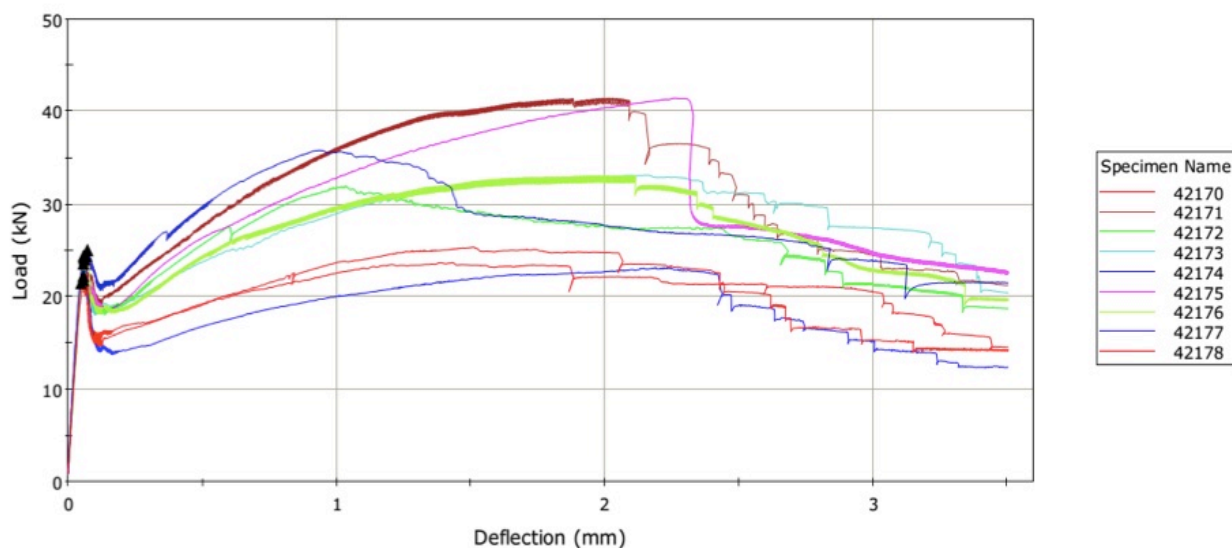


Fig. 5.7 – Curvas da resistência à flexão de betão com brita granítica (40 kg/m³)

Nesta situação (Fig. 5.7), após ser atingido o limite de proporcionalidade, existe um aumento de resistência transmitido pelas fibras, ainda que pouco acentuado.

Quadro 5.14 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do betão com fibras (60 kg/m³ de fibras 5D)

	Specimen ID	Provete	Delta f_L (mm)	f_L (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)
B60	42185	1	0,0535	7,52	10,08	11,74	10,09	9,15
	42186	2	0,0661	8,99	9,95	11,70	11,97	11,74
	42187	3	0,0524	7,64	10,2	11,25	12,36	12,61
	42188	4	0,0615	8,35	12,5	11,87	10,86	9,77
	42189	5	0,0592	8,01	10,7	11,22	9,80	8,97
	42190	6	0,0590	8,37	10,83	11,33	11,13	9,75
	42191	7	0,0545	7,60	6,71	7,84	7,95	7,80
	42192	8	0,0729	8,64	12,77	13,90	12,23	11,43
	42193	9	0,0603	8,39	10,99	12,24	11,76	11,57
	Média		0,0599	8,17	10,53	11,45	10,91	10,31
	Desvia Padrão		0,0065	0,51	1,75	1,58	1,43	1,59
	Coefficiente de Variação		11	6	17	14	13	15

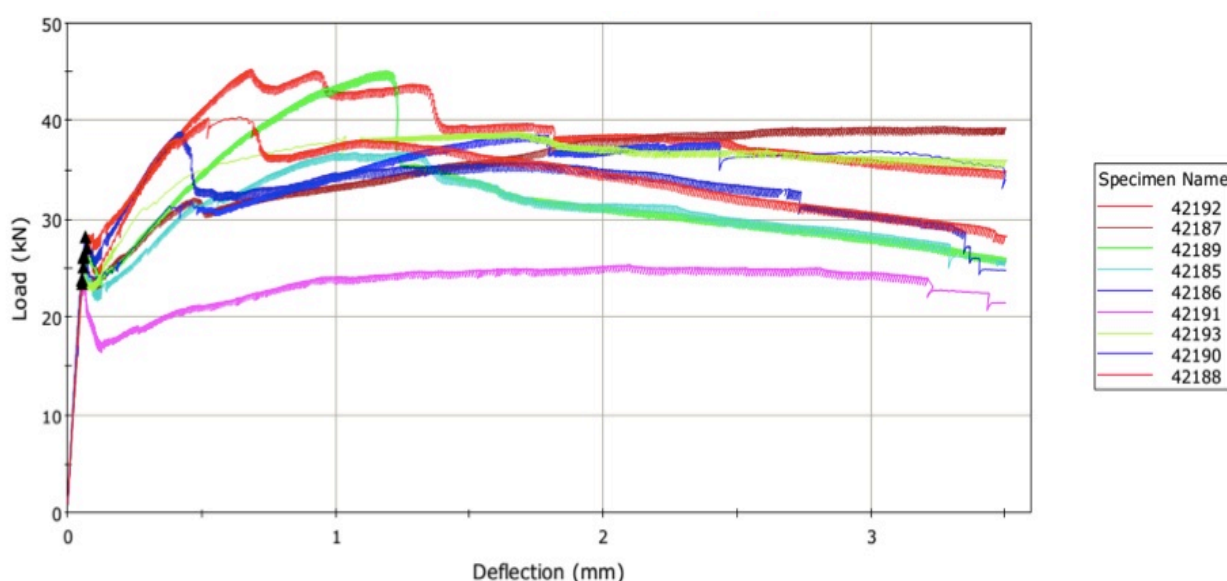
f_L – limite de proporcionalidade

f_{R1} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 0,47 mm;

f_{R2} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 1,32 mm;

f_{R3} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 2,17 mm;

f_{R4} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 3,02 mm.

Fig. 5.8 – Curvas da resistência à flexão de betão com brita granítica (60 kg/m³)

Na Fig. 5.8 é possível conferir que a adição de 60 kg/m³ proporciona um apreciável aumento de resistência à flexão que se verifica pelo grande declive do gráfico, depois de se atingir o limite de proporcionalidade. Constata-se também a formação de um “patamar” de cedência.

Pela comparação das três amassaduras (B20, B40 e B60) pode-se concluir que o comportamento é proporcional ao aumento da dosagem de fibras. Nas dosagens 20 e 60 kg/m³ verifica-se um patamar de

cedência. Os valores do limite de proporcionalidade (f_L) e as resistências que se constatarem a seguir a esse limite, são tanto mais próximas desse limite e de maior valor quanto maior a dosagem de fibras.

5.2.2.3. Resistência à flexão do betão sem fibras contendo godo rolado com 35 dias à data de ensaio (NP EN 1390-5:2009)

Igualmente para prismas de betão mas com godos realizaram-se ensaios à flexão segundo a norma NP EN 1390-5:2009 onde se obtiveram os valores presentes no Quadro 5.15.

Quadro 5.15 – Resistências à flexão do betão com godo rolado

Amassadura	Provete	Resistência à flexão	Resistência à flexão
		Valores individuais (MPa)	Valor médio (MPa)
G0	1	9,4	9,1
	2	8,7	

5.2.2.4. Resistência à flexão do betão contendo godo rolado com 35 dias à data de ensaio (EN 14651:2005)

Nos Quadros 5.16, 5.17 e 5.18 e nas Fig. 5.9, 5.10 e 5.11 apresentam-se os resultados obtidos dos ensaios segundo a norma EN 14651:2005, em prismas de betão com godo e com 35 dias de idade à data de ensaio.

Quadro 5.16 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do betão com fibras (20 kg/m³ de fibras 5D)

	Specimen ID	Provete	Delta f_L (mm)	f_L (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)
G20	42200	1	0,0522	7,71	3,34	3,24	3,35	2,83
	42201	2	0,0453	7,66	3,64	4,50	4,91	4,67
	42202	3	0,0494	7,93	5,46	7,81	7,35	7,80
	42203	4	0,0516	7,89	3,63	4,04	4,37	4,51
	42204	5	0,0457	8,33	4,29	5,78	6,27	3,92
	42205	6	0,0481	7,62	2,27	2,49	2,52	1,47
	42206	7	0,0472	7,36	4,89	6,24	6,25	4,90
	42207	8	0,0493	8,19	4,34	5,93	6,59	5,56
	42208	9	0,0444	8,62	4,18	5,84	5,88	3,85
	Média		0,0481	7,92	4,00	5,10	5,28	4,39
	Desvio Padrão		0,0027	0,39	0,93	1,66	1,60	1,76
	Coefficiente de Variação		6	5	23	33	30	40

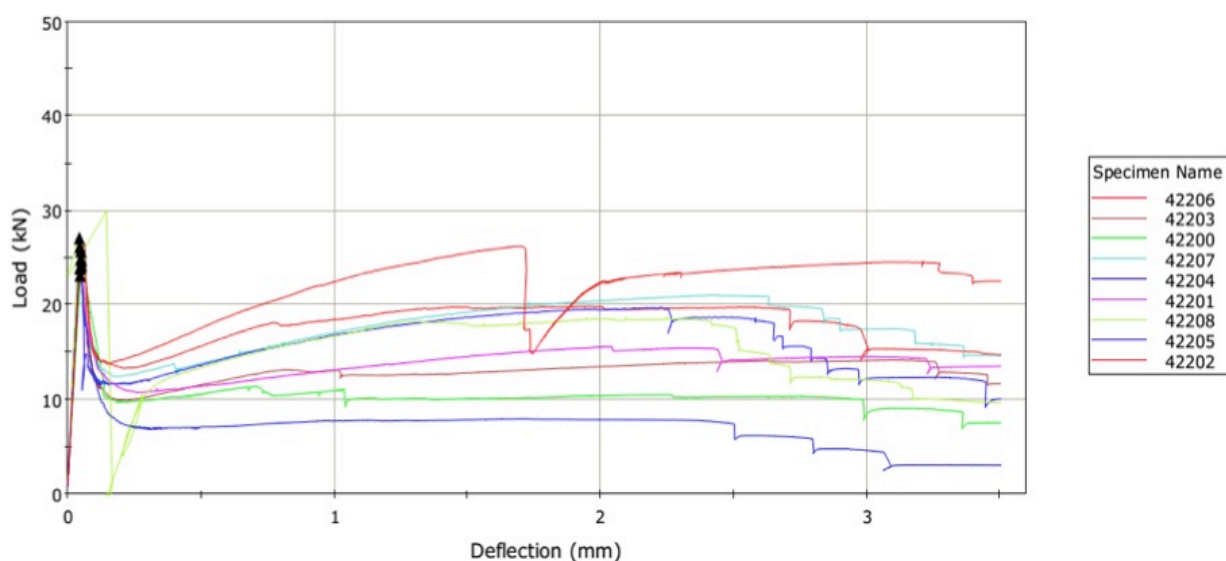
f_L – limite de proporcionalidade

f_{R1} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 0,47 mm;

f_{R2} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 1,32 mm;

f_{R3} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 2,17 mm;

f_{R4} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 3,02 mm.

Fig. 5.9 – Curvas da resistência à flexão de betão com godo rolado (20 kg/m³)

Pela análise do gráfico da Fig. 5.9, verifica-se que após se atingir o limite de proporcionalidade (f_L) forma-se um “patamar” de cedência em que as resistências são claramente inferiores à resistência máxima antes atingida (f_L).

Quadro 5.17 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do betão com fibras (40 kg/m³ de fibras 5D)

	Specimen ID	Provete	Delta f_L (mm)	f_L (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)
G40	42215	1	0,0480	6,59	5,92	6,72	7,17	6,27
	42216	2	0,0543	6,80	5,04	6,35	6,41	5,54
	42217	3	0,0469	6,77	6,86	8,76	8,42	8,01
	42218	4	0,0557	7,65	9,60	8,59	7,53	6,65
	42219	5	0,0535	7,05	8,38	10,82	8,10	7,37
	42220	6	0,0598	7,06	8,03	10,90	9,37	8,36
	42221	7	0,0583	6,99	6,60	8,89	9,27	8,22
	42222	8	0,0474	7,44	8,64	11,89	7,70	7,71
	42223	9	0,0467	7,21	7,42	9,14	8,78	6,84
	Média		0,0523	7,06	7,39	9,12	8,08	7,22
	Desvio Padrão		0,0052	0,33	1,43	1,86	0,98	0,96
	Coeficiente de Variação		10	5	19	20	12	13

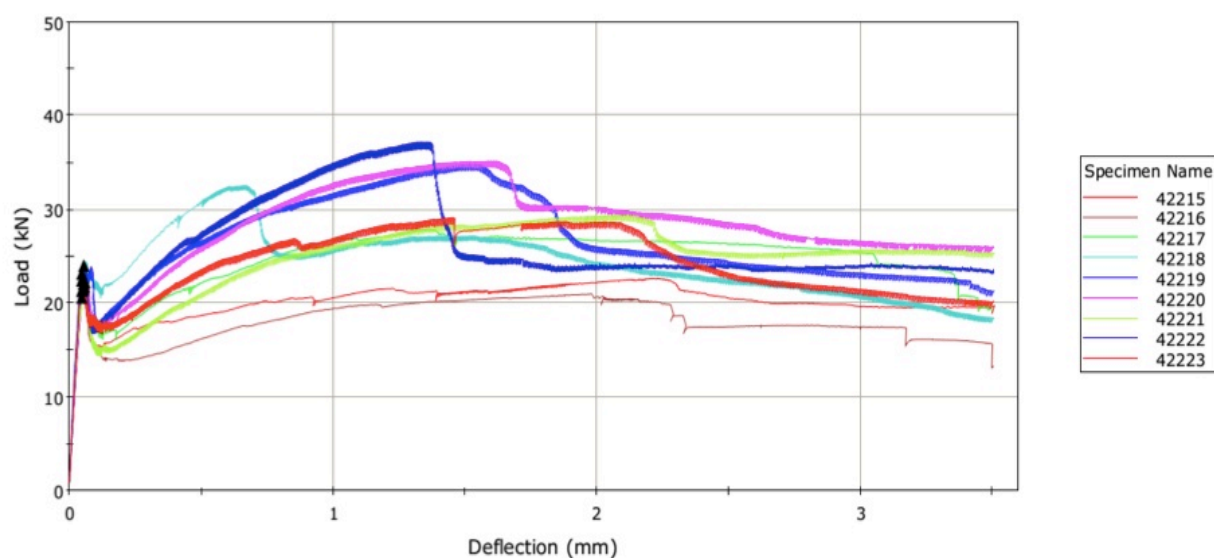
f_L – limite de proporcionalidade

f_{R1} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 0,47 mm;

f_{R2} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 1,32 mm;

f_{R3} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 2,17 mm;

f_{R4} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 3,02 mm.

Fig. 5.10 – Curvas da resistência à flexão de betão com godo rolado (40 kg/m³)

Observando a Fig. 5.10, denota-se que há um aumento significativo das resistências a seguir a ser atingido o limite de proporcionalidade (f_L).

Quadro 5.18 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do betão com fibras (60 kg/m³ de fibras 5D)

	Specimen ID	Provete	Delta f_L (mm)	f_L (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)
G60	42230	1	0,0586	8,57	9,49	12,17	9,94	10,01
	42231	2	0,0536	8,39	11,02	10,75	10,72	9,91
	42232	3	0,0545	9,14	12,88	14,25	13,37	12,71
	42233	4	0,0702	10,53	11,35	13,65	11,86	10,36
	42234	5	0,0571	9,11	12,02	14,74	12,10	11,09
	42235	6	0,0552	8,97	9,78	10,25	9,92	8,62
	42236	7	0,0590	9,75	10,27	12,34	12,35	11,12
	42237	8	0,0573	9,69	10,26	11,67	10,28	8,78
	42238	9	0,0522	8,61	10,75	12,62	13,45	13,09
	Média		0,0575	9,20	10,87	12,49	11,55	10,63
	Desvio Padrão		0,0053	0,69	1,09	1,52	1,39	1,55
	Coefficiente de Variação		9	7	10	12	12	15

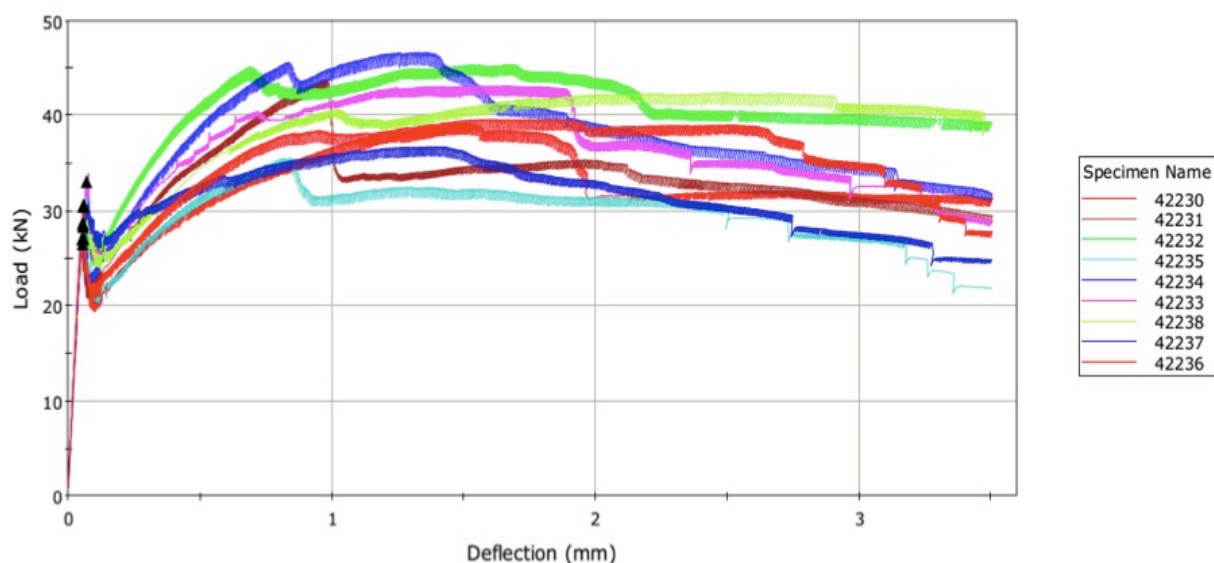
f_L – limite de proporcionalidade

f_{R1} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 0,47 mm;

f_{R2} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 1,32 mm;

f_{R3} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 2,17 mm;

f_{R4} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 3,02 mm.

Fig. 5.11 – Curvas da resistência à flexão de betão com godo rolado (60 kg/m³)

Na situação da Fig. 5.11, é possível constatar a formação de um “patamar” de cedência em que os valores das resistências são bastantes superiores ao limite de proporcionalidade (f_L), verificando-se assim uma grande contribuição das fibras na resistência à flexão.

Pela comparação das três amassaduras (G20, G40 e G60) pode-se concluir que o comportamento é proporcional ao aumento da dosagem de fibras. Os valores do limite de proporcionalidade (f_L) e as

resistências que se constatarem a seguir a esse limite, são tanto mais próximas desse limite e de maior valor quanto maior a dosagem de fibras.

5.2.2.5. Resistência à flexão do betão contendo brita granítica com 90 dias à data de ensaio (EN 14651:2005)

De forma a caraterizar o comportamento dos primas de betão com brita à flexão e com 90 dias de idade à data de ensaio, testaram-se provetes segundo a norma EN 14651:2005 cujos resultados se apresentam no Quadro 5.19, 5.20 e 5.21.

Quadro 5.19 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do betão com fibras (20 kg/m³ de fibras 5D)

	Specimen ID	Provete	Delta f_L (mm)	f_L (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)
B20	42164	10	0,0609	8,42	4,65	6,25	6,54	4,52
	42165	11	0,0565	8,59	5,33	7,39	8,20	6,44
	42166	12	0,0670	9,03	5,16	6,25	5,00	4,33
	42167	13	0,0536	9,00	7,05	9,21	9,07	7,12
	42168	14	0,0632	9,01	3,73	4,94	4,96	4,16
	42169	15	0,0527	8,67	3,48	4,39	4,40	3,35
	Média		0,0590	8,79	4,90	6,41	6,36	4,99
	Desvio Padrão		0,0056	0,26	1,29	1,74	1,92	1,46
	Coeficiente de Variação		10	3	26	27	30	29

f_L – limite de proporcionalidade

$f_{R,1}$ – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 0,47 mm;

$f_{R,2}$ – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 1,32 mm;

$f_{R,3}$ – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 2,17 mm;

$f_{R,4}$ – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 3,02 mm.

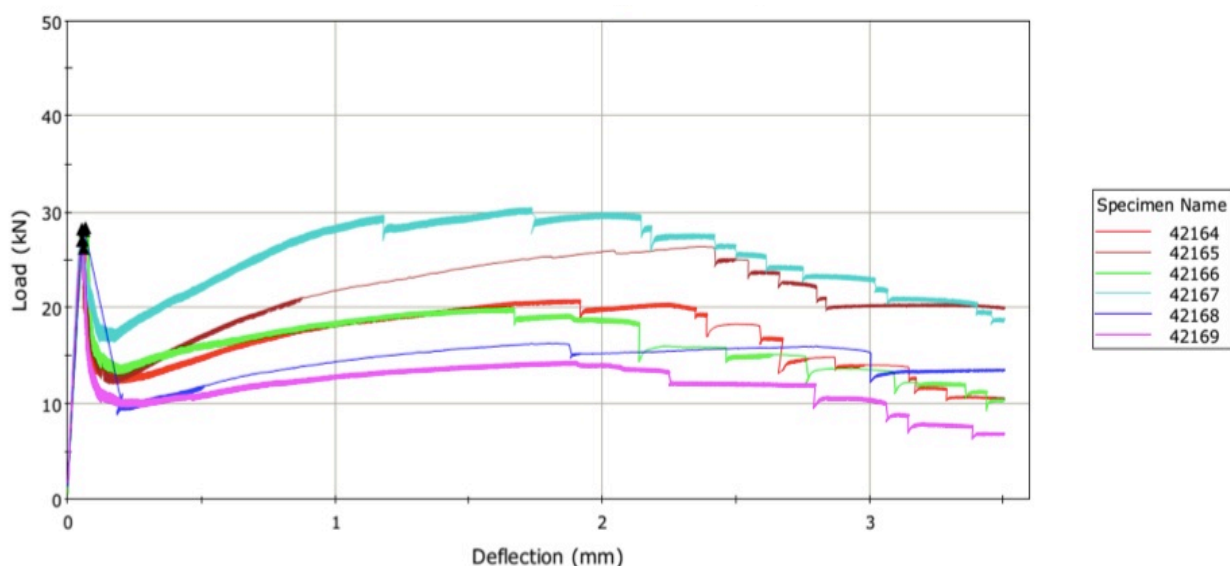


Fig. 5.12 – Curvas da resistência à flexão de betão com brita granítica (20 kg/m³)

O limite de proporcionalidade atingido é maior que o da mesma amassadura mas ensaiada com a idade de 35 dias. Verifica-se igualmente um “patamar” de cedência em que os valores das resistências são semelhantes aos dos 35 dias.

Quadro 5.20 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do betão com fibras (40 kg/m³ de fibras 5D)

Specimen ID	Provete	Delta f_L (mm)	f_L (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)
42179	10	0,0637	9,21	10,88	14,74	15,47	12,18
42180	11	0,0569	8,87	8,76	9,38	10,36	10,45
42181	12	0,0713	9,38	8,79	10,91	10,99	9,51
42182	13	0,0553	9,17	8,03	10,58	11,28	9,80
42183	14	0,0593	9,25	12,43	11,20	10,91	9,24
42184	15	0,0579	8,84	7,94	11,56	10,68	9,09
Média		0,0607	9,12	9,47	11,40	11,62	10,05
Desvio Padrão		0,0059	0,22	1,80	1,80	1,91	1,15
Coeficiente de Variação		10	2	19	16	16	11

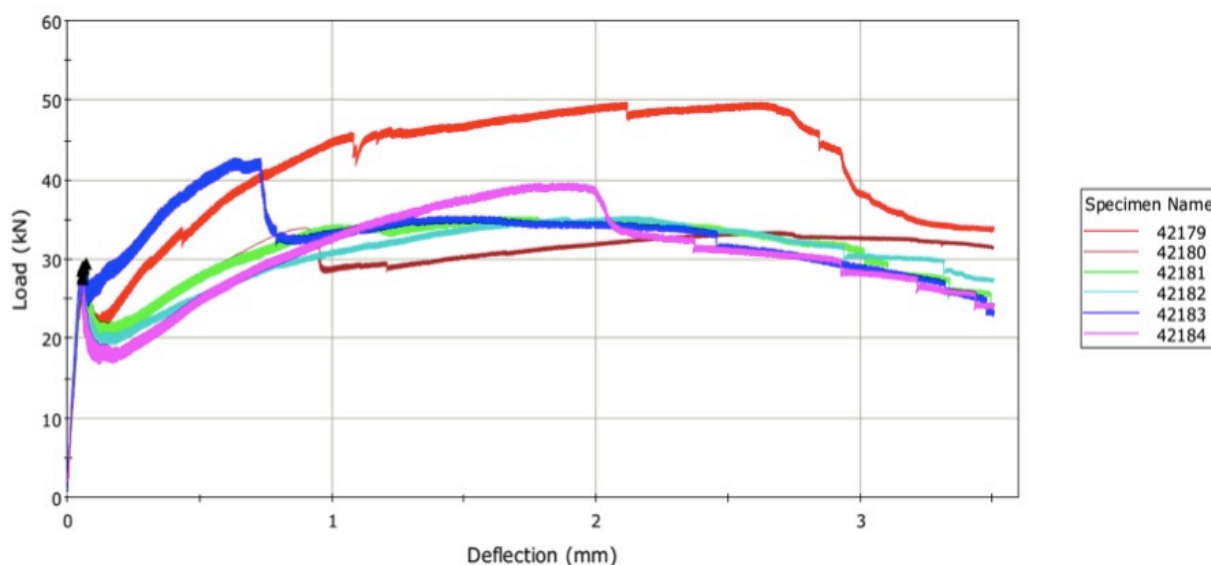
f_L – limite de proporcionalidade

$f_{R,1}$ – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 0,47 mm;

$f_{R,2}$ – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 1,32 mm;

$f_{R,3}$ – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 2,17 mm;

$f_{R,4}$ – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 3,02 mm.

Fig. 5.13 – Curvas da resistência à flexão de betão com brita granítica (40 kg/m³)

Observando a Fig. 5.13, verifica-se que existe um ligeiro aumento do limite de proporcionalidade (f_L) em relação à idade de 35 dias embora os valores das resistências ($f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ e $f_{R,4}$) apresentem valores similares aos daquela idade.

Quadro 5.21 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do betão com fibras (60 kg/m³ de fibras 5D)

	Specimen ID	Provete	Delta f_L (mm)	f_L (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)
B60	42194	10	0,0569	9,18	10,46	11,53	10,92	8,86
	42195	11	0,0610	9,46	9,78	12,87	11,50	10,66
	42196	12	0,0370	7,46	-	-	-	-
	42197	13	0,0565	9,54	13,23	11,75	11,43	10,40
	42198	14	0,0552	8,96	10,20	10,28	10,45	7,43
	42199	15	0,0641	9,25	14,79	15,62	15,54	13,71
	Média		0,0551	8,98	11,69	12,41	11,97	10,21
	Desvio Padrão		0,0095	0,77	2,20	2,02	2,04	2,35
	Coeficiente de Variação		17	9	19	16	17	23

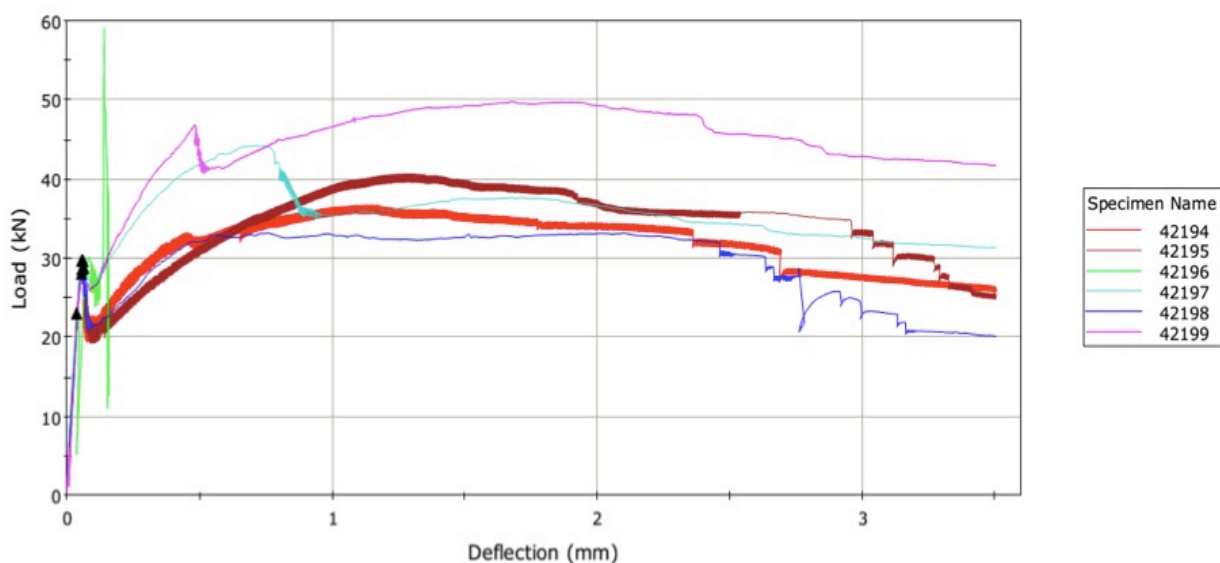
f_L – limite de proporcionalidade

f_{R1} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 0,47 mm;

f_{R2} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 1,32 mm;

f_{R3} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 2,17 mm;

f_{R4} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 3,02 mm.

Fig. 5.14 – Curvas da resistência à flexão de betão com brita granítica (60 kg/m³)

Pela análise da Fig. 5.14 denota-se que, em termos do limite de proporcionalidade esta amassadura apresenta valores semelhantes para igual amassadura mas ensaiada aos 35 dias. Pode-se referir também que se atingem resistências altas e que, é no “patamar” de cedência que se atinge a maior resistência. Não foi possível obter os valores dos restantes patamares no prisma B60-12 porque o ensaio falhou.

Pela apreciação dos três gráficos, a amassadura B60 destaca-se por atingir valores de resistência superiores às restantes amassaduras, embora B20 e B40 tenham um comportamento muito parecidos.

5.2.2.6. Resistência à flexão do betão contendo godo rolado com 90 dias à data de ensaio (EN 14651:2005)

Nos Quadros 5.22, 5.23 e 5.24 e nas respectivas representações gráficas nas Fig. 5.15, 5.16 e 5.17 apresentam-se os resultados obtidos do ensaio segundo a norma EN 14651:2005, em prismas de betão com godos ensaiados aos 90 dias de idade à data de ensaio.

Quadro 5.22 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do betão com fibras (20 kg/m³ de fibras 5D)

	Specimen ID	Provete	Delta f_L (mm)	f_L (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)
G20	42209	10	0,0518	8,56	3,68	4,61	4,61	2,61
	42210	11	0,0571	7,95	1,64	1,58	1,62	1,71
	42211	12	0,0489	8,32	4,13	5,13	5,50	4,88
	42212	13	0,0496	7,53	2,97	3,87	4,37	3,94
	42213	14	0,0657	9,20	2,66	3,32	3,71	2,91
	42214	15	0,0613	8,37	2,50	3,03	2,66	2,78
	Média		0,0557	8,32	2,93	3,59	3,75	3,14
	Desvio Padrão		0,0068	0,56	0,89	1,26	1,41	1,11
	Coeficiente de Variação		12	7	30	35	38	35

f_L – limite de proporcionalidade

f_{R1} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 0,47 mm;

f_{R2} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 1,32 mm;

f_{R3} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 2,17 mm;

f_{R4} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 3,02 mm.

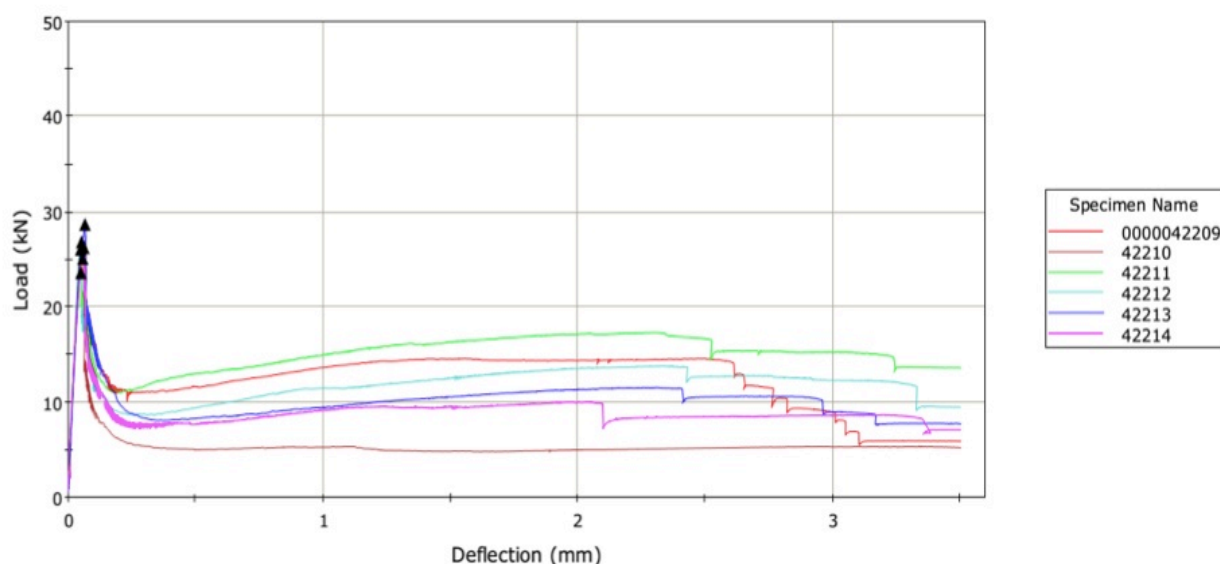


Fig. 5.15 – Curvas da resistência à flexão de betão com godo rolado (20 kg/m³)

Observando a Fig. 5.15 e tendo em conta a análise feita para igual amassadura mas com 35 dias de idade à data de ensaio, constata-se que ambas têm um comportamento muito similar.

Quadro 5.23 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do betão com fibras (40 kg/m³ de fibras 5D)

	Specimen ID	Provete	Delta f_L (mm)	f_L (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)
G40	42224	10	0,0476	7,48	7,25	9,30	9,47	8,17
	42225	11	0,0439	7,49	5,99	7,90	8,46	8,41
	42226	12	0,0427	7,68	8,57	8,26	8,12	7,39
	42227	13	0,0543	8,47	7,65	10,34	11,13	10,59
	42228	14	0,0457	7,80	7,81	8,55	8,00	5,64
	42229	15	0,0528	7,96	9,96	10,69	9,94	8,77
	Média		0,0478	7,81	7,87	9,17	9,19	8,16
	Desvio Padrão		0,0047	0,37	1,33	1,14	1,22	1,63
	Coefficiente de Variação		10	5	17	12	13	20

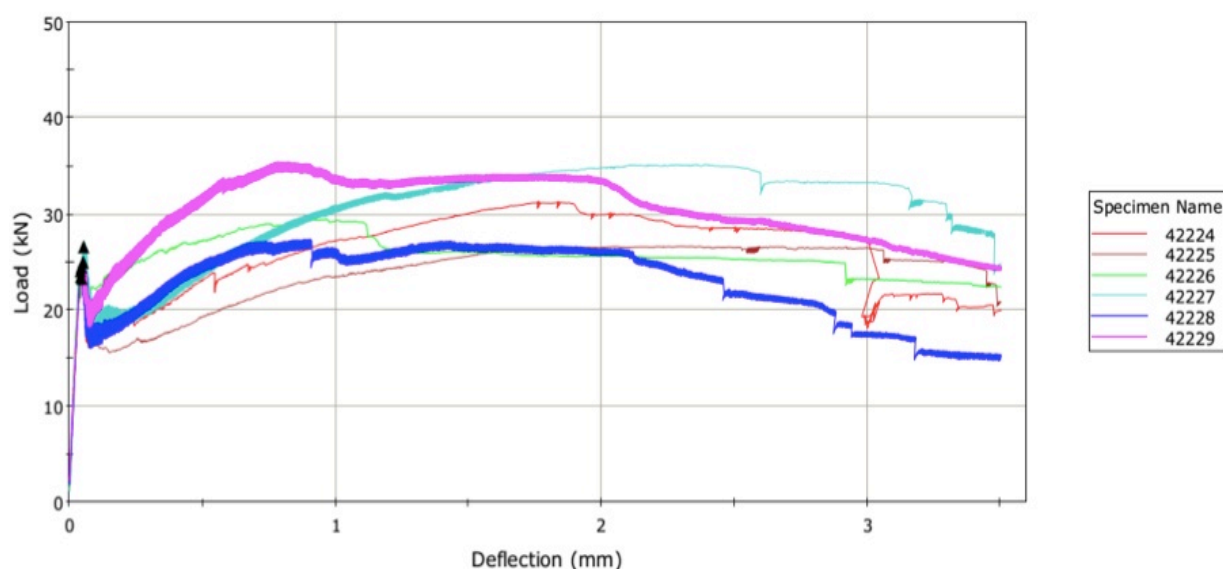
f_L – limite de proporcionalidade

f_{R1} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 0,47 mm;

f_{R2} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 1,32 mm;

f_{R3} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 2,17 mm;

f_{R4} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 3,02 mm.

Fig. 5.16 – Curvas da resistência à flexão de betão com godo rolado (40 kg/m³)

Considerando a Fig. 5.16 e lembrando a análise feita para igual amassadura mas com 35 dias de idade à data de ensaio, verifica-se que ambas têm um comportamento muito similar.

Quadro 5.24 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do betão com fibras (60 kg/m³ de fibras 5D)

	Specimen ID	Provete	Delta f_L (mm)	f_L (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)
G60	42239	10	0,0581	9,28	8,88	11,69	11,19	8,79
	42240	11	0,0574	8,69	10,45	12,17	11,79	9,39
	42241	12	0,0440	9,19	6,32	7,74	6,51	4,77
	42242	13	0,0584	9,59	11,15	12,30	11,91	11,51
	42243	14	0,0701	9,53	12,52	13,68	13,89	11,62
	42244	15	0,0632	9,40	12,26	12,58	11,63	9,80
	Média		0,0614	9,30	11,05	12,48	12,08	10,22
	Desvio Padrão		0,0053	0,36	1,48	0,74	1,05	1,28
	Coeficiente de Variação		9	4	13	6	9	12

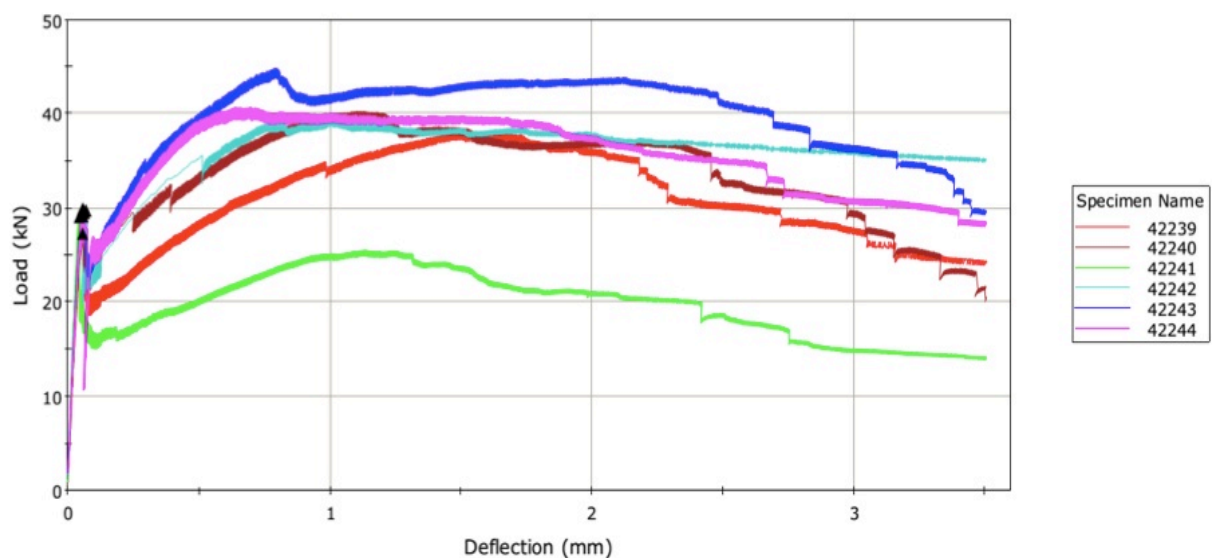
f_L – limite de proporcionalidade

f_{R1} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 0,47 mm;

f_{R2} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 1,32 mm;

f_{R3} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 2,17 mm;

f_{R4} – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 3,02 mm.

Fig. 5.17 – Curvas da resistência à flexão de betão com godo rolado (60 kg/m³)

Observando a Fig. 5.17 e tendo em conta a análise feita para igual amassadura mas com 35 dias de idade à data de ensaio, constata-se que ambas têm um comportamento muito similar. Refere-se ainda que o início do “funcionamento” das fibras ocorre um pouco antes do que acontece aos 35 dias.

Analisando na globalidade o comportamento dos betões contendo godo rolado e ensaiados aos 90 dias, denota-se que as amassaduras G20 e G40 não têm um comportamento em nada similar. Comparando as três amassaduras, verifica-se a fraca influência da adição de fibras no caso de G20 equiparando estas com as amassaduras G40 e G60. Nestas, obtém-se um “patamar” de cedência com resistências bastante superiores ao limite de proporcionalidade (f_L).

5.2.3. MÓDULO DE ELASTICIDADE (DIN 1048-5:1991)

Os ensaios de módulo de elasticidade foram concretizados segundo o procedimento descrito em 4.3.3..

5.2.3.1. Módulo de elasticidade do betão contendo brita granítica

No Quadro 5.25 apresentam-se os resultados obtidos pelo ensaio de módulo de elasticidade em betão com brita granítica e em várias idades à data de ensaio (7, 35 e 90 dias).

Quadro 5.25 – Módulos de elasticidade do betão com brita granítica

Amassadura	Idade (dias)	Módulo de elasticidade	Módulo de elasticidade
		Valores individuais (MPa)	Valor médio (MPa)
B0	7	37000	36800
		36600	
		36700	
	35	42900	40900
		38600	
		41100	
	90	41900	42000
		43100	
		40900	
B20	7	39100	37800
		36600	
		37700	
	35	43400	41800
		42500	
		39600	
	90	43700	43900
		43800	
		44300	
B40	7	36800	36700
		37600	
		35600	
	35	39200	40700
		42400	
		40600	
	90	42400	42900
		42900	
		43300	
B60	7	37600	38300
		39400	
		38000	
	35	41500	41600
		42600	
		40600	

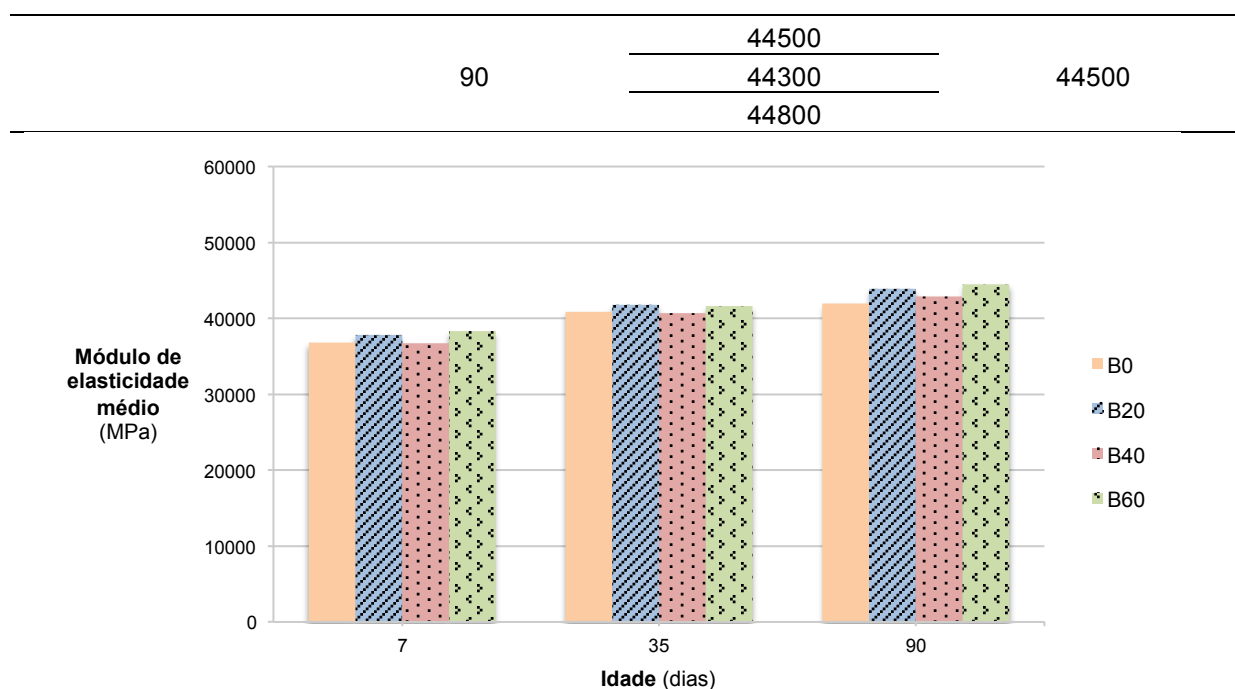


Fig. 5.18 – Módulo de elasticidade médio do betão com brita granítica

Pelo exposto no Quadro 5.25 e observando a Fig. 5.18 verifica-se um aumento gradual mas ligeiro no valor do módulo de elasticidade com o decorrer do tempo. Embora existam pequenas oscilações no valor do módulo de elasticidade entre amassaduras, apresentam-se todas muito idênticas sem especial realce para nenhuma das amassaduras. Ainda assim, pode mencionar-se uma subtil diferença entre a amassadura B40 em comparação com as restantes amassaduras com fibras, apresentando esta (B40), valores menores.

5.2.3.2. Módulo de elasticidade do betão contendo godo rolado

No Quadro 5.26 apresentam-se os resultados obtidos pelo ensaio de módulo de elasticidade em betão com godo rolado e em várias idades à data de ensaio (7, 35 e 90 dias).

Quadro 5.26 – Módulos de elasticidade do betão com godo rolado

Amassadura	Idade (dias)	Módulo de elasticidade	Módulo de elasticidade
		Valores individuais (MPa)	Valor médio (MPa)
G0	7	42000	40700
		39400	
		40600	
	35	48300	48200
		48200	
		48000	
	90	50500	52200
		53500	
		52500	
G20	7	42800	43600
		45500	
		42400	
	35	46200	47000
		47500	
		47300	
	90	49900	49400
		49300	
		49100	
G40	7	41100	40400
		39900	
		40100	
	35	46200	46100
		47600	
		44500	
	90	46200	47000
		47500	
		47300	
G60	7	44800	44400
		42600	
		45900	
	35	46000	45300
		42100	
		47800	
	90	49900	49400
		49300	
		49100	

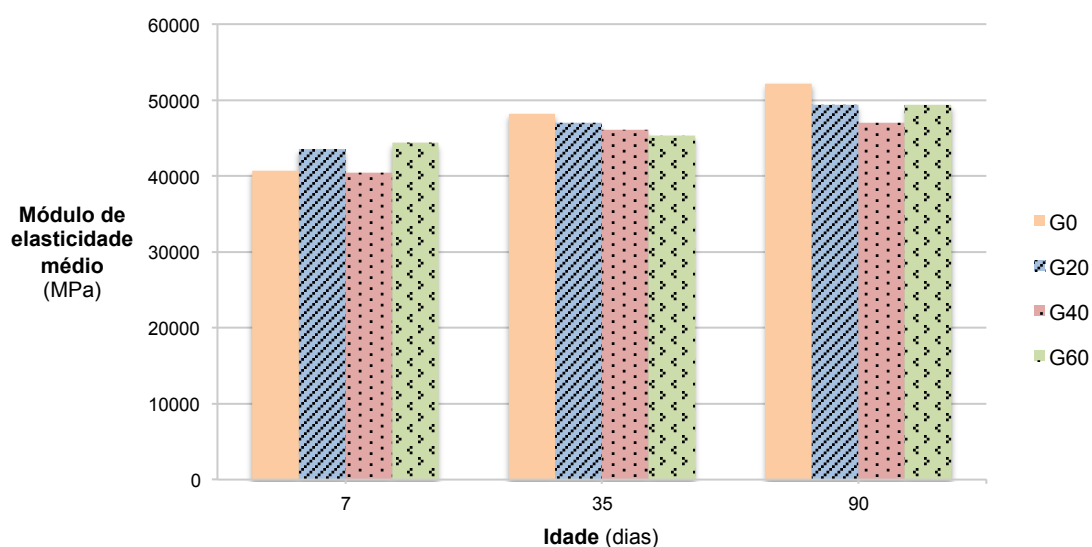


Fig. 5.19 – Módulo de elasticidade médio do betão com godo rolado

Mais uma vez se constata que, como esperado, se dá um aumento progressivo do valor do módulo de elasticidade com o aumento da idade dos provetes à data de ensaio. Contra aquilo que seria de esperar, a amassadura G0 (sem fibras), às idades de 35 e 90 dias, apresenta valores ligeiramente maiores que amassaduras contendo fibras. Aos 7 e 90 dias de idade, a amassadura G40 apresenta valores visivelmente menores quando comparado com amassaduras contendo fibras e com a mesma idade.

5.2.3.3. Tensão de rotura dos cilindros utilizados na determinação do módulo de elasticidade produzidos com betão contendo brita granítica

No Quadro 5.27 apresentam-se os valores relativos ao ensaio de betão com brita.

Quadro 5.27 – Tensões de rotura do betão com brita granítica

Amassadura	Idade (dias)	Tensão de rotura	Tensão de rotura
		Valores individuais (MPa)	Valor médio (MPa)
B0	7	65,4	64,1
		65,1	
		61,7	
	35	78,0	77,6
		72,7	
		82,2	
	90	96,0	93,4
		93,6	
		90,5	
B20	7	63,0	63,8
		64,0	
		64,4	
	35	81,9	81,4
		82,0	
		80,3	
	90	88,9	90,5
		90,5	
		92,0	
B40	7	61,4	62,7
		63,7	
		63,1	
	35	78,4	78,0
		75,5	
		80,1	
	90	94,5	90,6
		86,8	
		90,4	
B60	7	64,7	63,7
		62,8	
		63,6	
	35	80,1	80,0
		80,9	
		78,9	
	90	93,5	90,6
		87,5	
		90,9	

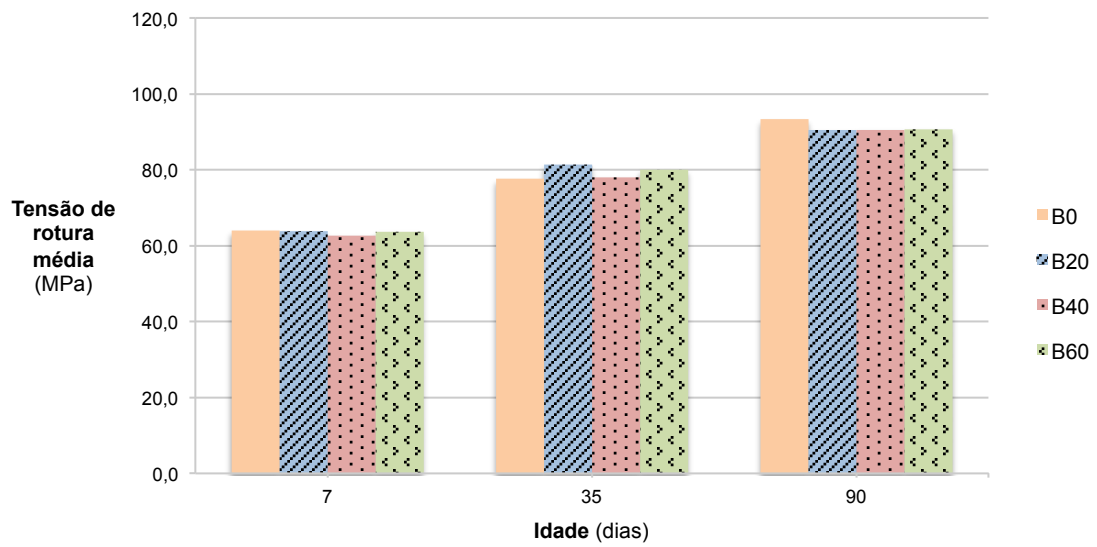


Fig. 5.20 – Tensão de rotura média dos cilindros utilizados na obtenção do módulo de elasticidade produzidos com betão contendo brita granítica

Observando a Fig. 5.20 constata-se que ocorre um aumento gradual no valor das tensões de rotura com o aumento das idades à data dos ensaios. Todas as amassaduras, por idade, apresentam valores da mesma ordem de grandeza.

5.2.3.4. Tensão de rotura dos cilindros utilizados na determinação do módulo de elasticidade produzidos com betão contendo godo rolado

No Quadro 5.28 apresentam-se os valores relativos aos ensaios de compressão do betão com godo.

Quadro 5.28 – Tensões de rotura do betão com godo rolado

Amassadura	Idade (dias)	Tensão de rotura	Tensão de rotura
		Valores individuais (MPa)	Valor médio (MPa)
G0	7	57,9	56,0
		52,4	
		57,6	
	35	76,7	73,3
		69,8	
		73,4	
	90	80,6	80,9
		78,6	
		83,4	
G20	7	56,8	58,0
		59,7	
		57,6	
	35	71,7	73,1
		74,6	
		73,1	
	90	87,9	77,1
		67,2	
		76,3	
G40	7	56,8	56,7
		57,9	
		55,5	
	35	68,7	71,3
		72,2	
		73,1	
	90	71,7	73,1
		74,6	
		73,1	
G60	7	55,8	55,4
		55,2	
		55,2	
	35	76,1	77,2
		77,3	
		78,3	
	90	87,9	77,1
		67,2	
		76,3	

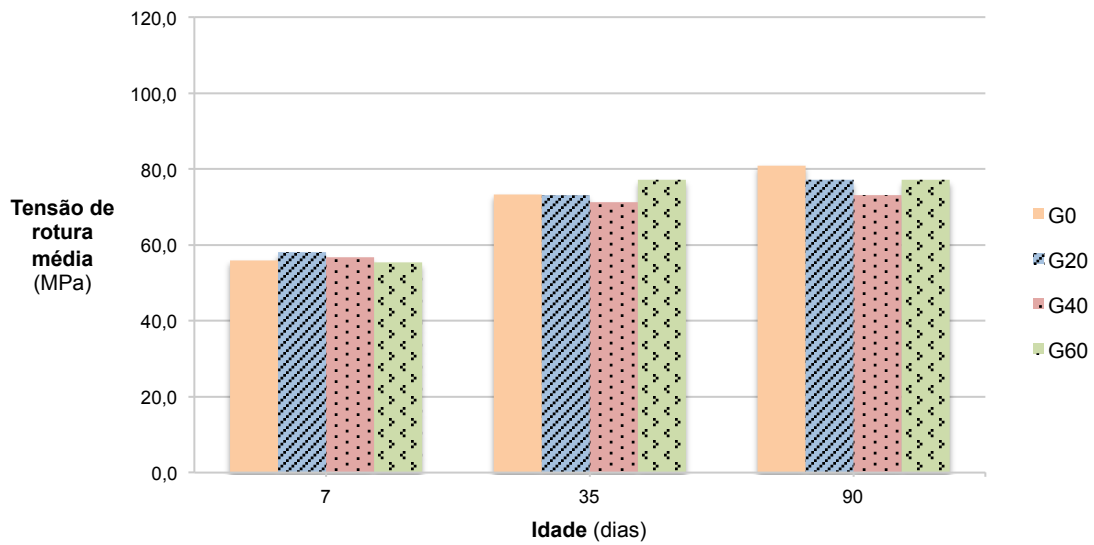


Fig. 5.21 – Tensão de rotura média dos cilindros utilizados na obtenção do módulo de elasticidade produzidos com betão contendo godo rolado

Verifica-se um aumento gradual no valor das tensões com a idade dos provetes à data do ensaio. Às idades 35 e 90 dias, a amassadura G40 apresenta valores ligeiramente inferiores quando comparada com as restantes amassaduras com fibras.

5.2.4. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO (E 394-1993)

Os ensaios de absorção de água por imersão foram concretizados segundo o procedimento descrito em 4.3.4..

5.2.4.1. Absorção de água por imersão do betão contendo brita granítica e do betão contendo godo rolado com 35 dias de idade à data de ensaio

Como ocorreu um problema na conservação dos cubos na estufa durante o ensaio de absorção de água por imersão à idade de 35 dias e dada a consequente dispersão de valores obtidos, optou-se por excluir estes valores da análise.

5.2.4.2. Absorção de água por imersão do betão contendo brita granítica com 90 dias de idade à data de ensaio

No Quadro 5.29 apresentam-se os valores do ensaio de absorção de água no betão com brita granítica aos 90 dias de idade à data de ensaio.

Quadro 5.29 – Absorção de água do betão com brita granítica

Amassadura	Provete	A _i	Valor médio
		Valores individuais (%)	
B0	6	7,9	8,0
	7	7,9	
	8	8,1	
B20	19	8,3	8,1
	20	8,1	
	21	8,0	
B40	19	8,1	8,1
	20	8,0	
	21	8,3	
B60	19	7,9	8,0
	20	8,0	
	21	8,0	

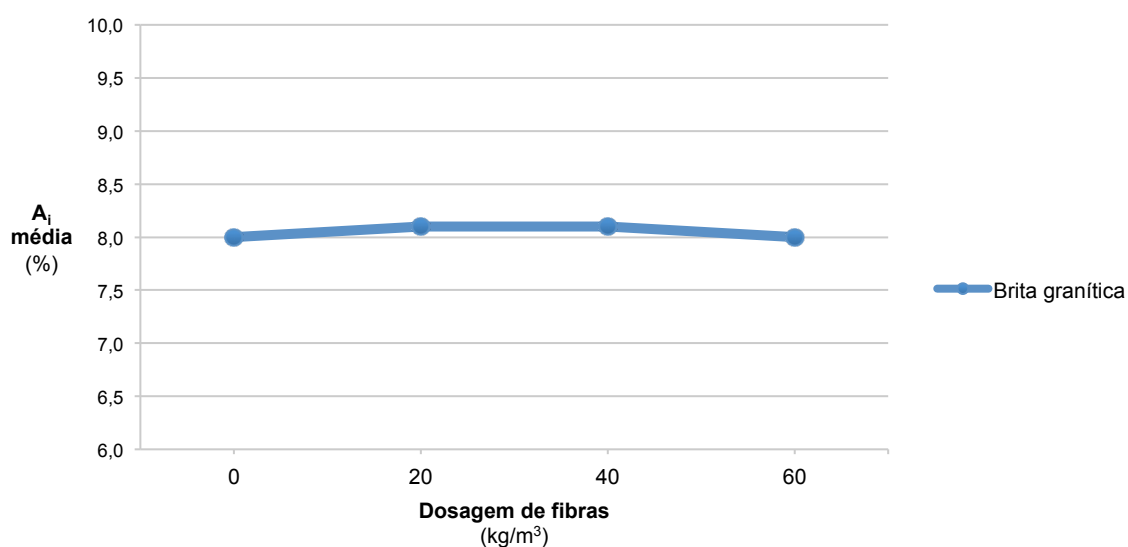


Fig. 5.22 – Absorção média de água por imersão do betão com brita granítica

Pelo exposto na Fig. 5.22 verifica-se que a absorção de água foi praticamente igual em todas as amassaduras.

5.2.4.3. Absorção de água por imersão do betão contendo godo rolado com 90 dias de idade à data de ensaio

No Quadro 5.30 apresentam-se os valores do ensaio de absorção de água no betão com brita granítica aos 90 dias de idade à data de ensaio.

Quadro 5.30 – Absorção de água do betão com godo rolado

Amassadura	Provete	A_i	A_i
		Valores individuais (%)	Valor médio (%)
G0	6	7,6	7,4
	7	7,3	
	8	7,4	
G20	19	7,5	7,5
	20	7,7	
	21	7,5	
G40	19	5,9	7,8
	20	8,5	
	21	9,1	
G60	19	7,5	7,4
	20	7,3	
	21	7,3	

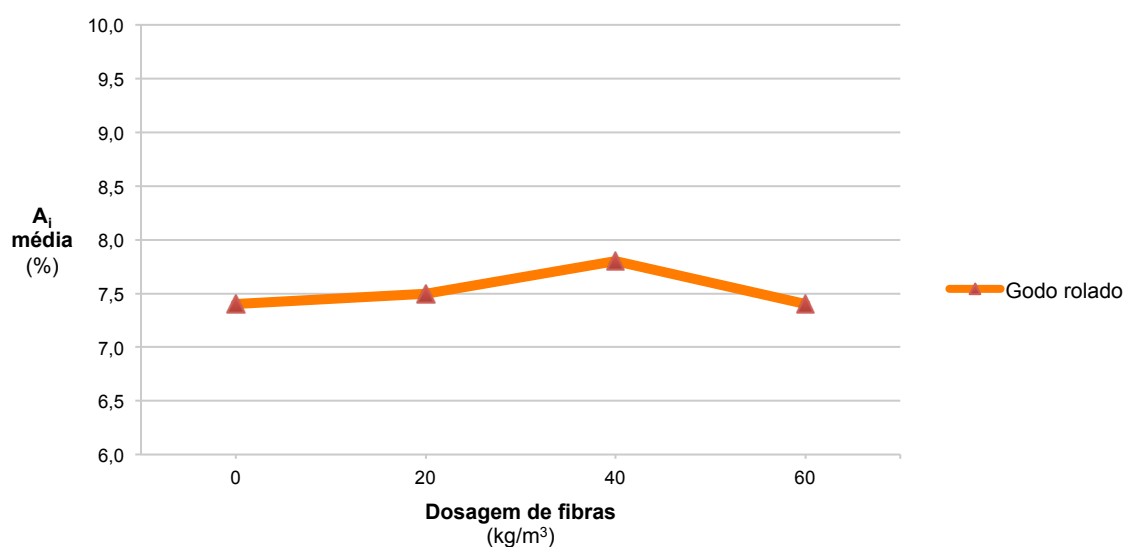


Fig. 5.23 – Absorção média de água por imersão do betão com godo rolado

Pela análise do Quadro 5.30 averigua-se que o provete 19 da amassadura G40 apresenta um valor anormalmente inferior de absorção de água quando comparado com os restantes provetes da mesma amassadura. Caso este valor fosse excluído, acentuaria ainda mais o desvio da amassadura G40 para com as restantes amassaduras.

5.2.5. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE (RILEM TC 116-PCD)

Os ensaios de absorção de água por capilaridade foram concretizados segundo o procedimento descrito em 4.3.5..

5.2.5.1. Absorção de água por capilaridade do betão contendo brita granítica com 35 dias de idade à data de ensaio

Nos Quadros 5.31, 5.32, 5.33 e 5.34 apresentam-se os valores dos ensaios de absorção de água por capilaridade no betão com brita granítica aos 35 dias de idade à data de ensaio.

Quadro 5.31 – Absorção de água do betão com brita granítica (B0)

Amassadura	Provete	Tempo	w(t) Valores individuais (g/m ²)	w(t) Valor médio (g/m ²)
B0	18	10min	105,6	109,3
	19		100,0	
	20		122,2	
	18	20min	150,0	150,0
	19		133,3	
	20		166,7	
	18	30min	172,2	168,5
	19		150,0	
	20		183,3	
	18	40min	183,3	181,5
	19		161,1	
	20		200,0	
	18	50min	205,6	196,3
	19		172,2	
	20		211,1	
	18	1h	216,7	207,4
	19		183,3	
	20		222,2	
	18	4h	322,2	301,9
	19		272,2	
	20		311,1	
	18	24h	500,0	461,1
	19		427,8	
	20		455,6	

Quadro 5.32 – Absorção de água do betão com brita granítica (B20)

Amassadura	Provete	Tempo	w(t) Valores individuais (g/m ²)	w(t) Valor médio (g/m ²)
B20	22	10min	155,6	196,3
	23		150,0	
	24		283,3	
	22	20min	194,4	248,1
	23		216,7	
	24		333,3	
	22	30min	216,7	268,5
	23		227,8	
	24		361,1	
	22	40min	272,2	288,9
	23		227,8	
	24		366,7	
	22	50min	255,6	294,4
	23		222,2	
	24		405,6	
	22	1h	255,6	296,3
	23		233,3	
	24		400,0	
	22	4h	350,0	388,9
	23		322,2	
	24		494,4	
	22	24h	511,1	550,0
	23		483,3	
	24		655,6	

Quadro 5.33 – Absorção de água do betão com brita granítica (B40)

Amassadura	Provete	Tempo	w(t) Valores individuais (g/m ²)	w(t) Valor médio (g/m ²)
B40	22	10min	166,7	166,7
	23		172,2	
	24		161,1	
	22	20min	227,8	201,9
	23		177,8	
	24		200,0	
	22	30min	255,6	237,0
	23		222,2	
	24		233,3	
	22	40min	272,2	238,9
	23		211,1	
	24		233,3	
	22	50min	272,2	246,3
	23		227,8	
	24		238,9	
	22	1h	288,9	255,6
	23		227,8	
	24		250,0	
	22	4h	383,3	355,6
	23		322,2	
	24		361,1	
	22	24h	544,4	520,4
	23		488,9	
	24		527,8	

Quadro 5.34 – Absorção de água do betão com brita granítica (B60)

Amassadura	Provete	Tempo	w(t) Valores individuais (g/m ²)	w(t) Valor médio (g/m ²)
B60	22	10min	144,4	135,2
	23		133,3	
	24		127,8	
	22	20min	188,9	187,0
	23		188,9	
	24		183,3	
	22	30min	205,6	214,8
	23		211,1	
	24		227,8	
	22	40min	244,4	238,9
	23		227,8	
	24		244,4	
	22	50min	250,0	242,6
	23		238,9	
	24		238,9	
	22	1h	266,7	257,4
	23		255,6	
	24		250,0	
	22	4h	361,1	366,7
	23		366,7	
	24		372,2	
	22	24h	494,4	509,3
	23		522,2	
	24		511,1	

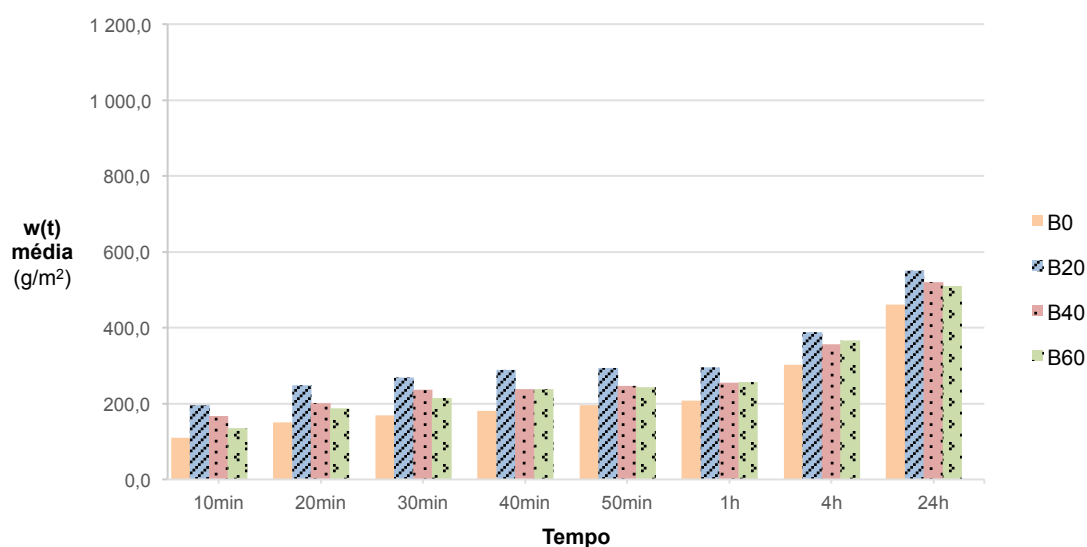


Fig. 5.24 – Absorção média de água por capilaridade do betão com brita granítica (35 dias de idade)

Observando a Fig. 5.24 comprova-se que a absorção de água por capilaridade aumenta gradualmente com o decorrer do tempo do ensaio. A absorção de água é menor na amassadura B0 e ligeiramente superior em B20. Nota-se contudo que, em todas as amassaduras (exceto B60), existe uma patela que tem valores ou muito acima ou muito abaixo da média. No entanto, dado apenas se possuírem 3 patelas para os ensaios, decidiu-se entrar na mesma com esses valores para a média.

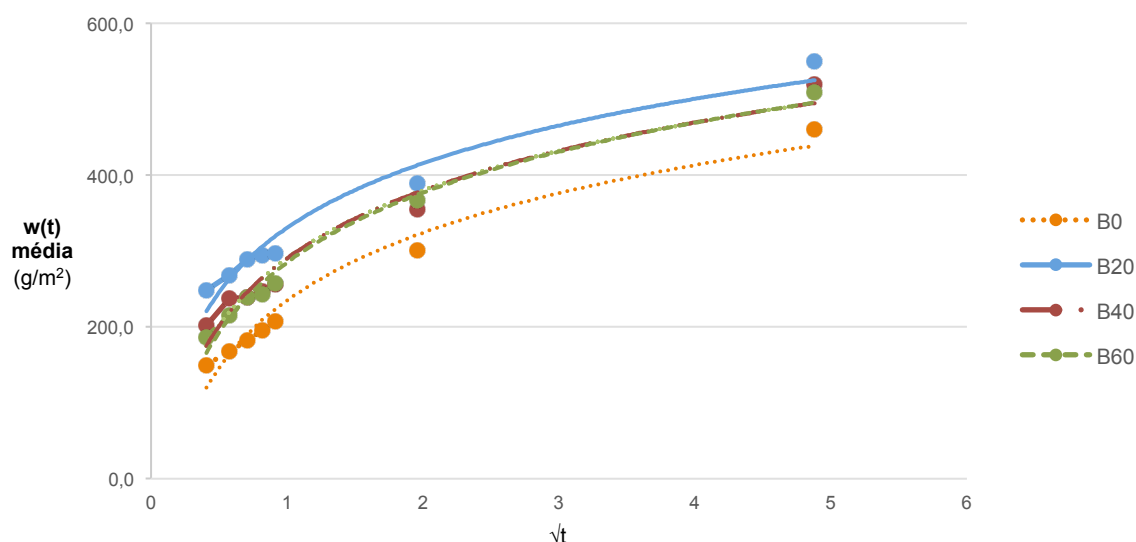


Fig. 5.25 – Variação da absorção de água por capilaridade com o tempo (35 dias de idade)

A progressão da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo pode ser dividida, de modo geral, em três patamares distintos: um inicial onde a absorção de água aumenta rapidamente; um segundo em que este aumento vai abrandando e um último no qual a absorção de água tende a estabilizar com o tempo. Estas três fases podem ser observadas na Fig. 5.25.

5.2.5.2. Absorção de água por capilaridade do betão contendo godo rolado com 35 dias de idade à data de ensaio

Nos Quadros 5.35, 5.36, 5.37 e 5.38 apresentam-se os valores dos ensaios de absorção de água por capilaridade no betão com godo rolado aos 35 dias de idade à data de ensaio.

Quadro 5.35 – Absorção de água do betão com godo rolado (G0)

Amassadura	Provete	Tempo	w(t) Valores individuais (g/m ²)	w(t) Valor médio (g/m ²)
G0	15	10min	166,7	151,9
	16		133,3	
	17		155,6	
	15	20min	211,1	201,9
	16		183,3	
	17		211,1	
	15	30min	222,2	216,7
	16		216,7	
	17		211,1	
	15	40min	238,9	231,5
	16		227,8	
	17		227,8	
	15	50min	250,0	246,3
	16		244,4	
	17		244,4	
	15	1h	272,2	268,5
	16		266,7	
	17		266,7	
	15	4h	355,6	337,0
	16		350,0	
	17		305,6	
	15	24h	477,8	477,8
	16		477,8	
	17		477,8	

Quadro 5.36 – Absorção de água do betão com godo rolado (G20)

Amassadura	Provete	Tempo	w(t)	w(t)
			Valores individuais (g/m ²)	Valor médio (g/m ²)
G20	22	10min	150,0	146,3
	23		138,9	
	24		150,0	
	22	20min	200,0	205,6
	23		194,4	
	24		222,2	
	22	30min	227,8	233,3
	23		227,8	
	24		244,4	
	22	40min	255,6	248,1
	23		244,4	
	24		244,4	
	22	50min	272,2	272,2
	23		272,2	
	24		272,2	
	22	1h	288,9	283,3
	23		272,2	
	24		288,9	
	22	4h	366,7	387,0
	23		405,6	
	24		388,9	
	22	24h	477,8	488,9
	23		488,9	
	24		500,0	

Quadro 5.37 – Absorção de água do betão com godo rolado (G40)

Amassadura	Provete	Tempo	w(t) Valores individuais (g/m ²)	w(t) Valor médio (g/m ²)
G40	22	10min	155,6	166,7
	23		172,2	
	24		172,2	
	22	20min	188,9	200,0
	23		216,7	
	24		194,4	
	22	30min	211,1	227,8
	23		244,4	
	24		227,8	
	22	40min	250,0	257,4
	23		277,8	
	24		244,4	
	22	50min	255,6	264,8
	23		277,8	
	24		261,1	
	22	1h	283,3	288,9
	23		294,4	
	24		288,9	
	22	4h	366,7	375,9
	23		383,3	
	24		377,8	
	22	24h	522,2	529,6
	23		527,8	
	24		538,9	

Quadro 5.38 – Absorção de água do betão com godo rolado (G60)

Amassadura	Provete	Tempo	w(t)	w(t)
			Valores individuais (g/m ²)	Valor médio (g/m ²)
G60	22	10min	111,1	120,4
	23		116,7	
	24		133,3	
	22	20min	166,7	163,0
	23		155,6	
	24		166,7	
	22	30min	188,9	183,3
	23		177,8	
	24		183,3	
	22	40min	222,2	209,3
	23		183,3	
	24		222,2	
	22	50min	216,7	216,7
	23		222,2	
	24		211,1	
	22	1h	233,3	220,4
	23		211,1	
	24		216,7	
	22	4h	350,0	329,6
	23		316,7	
	24		322,2	
	22	24h	477,8	477,8
	23		472,2	
	24		483,3	

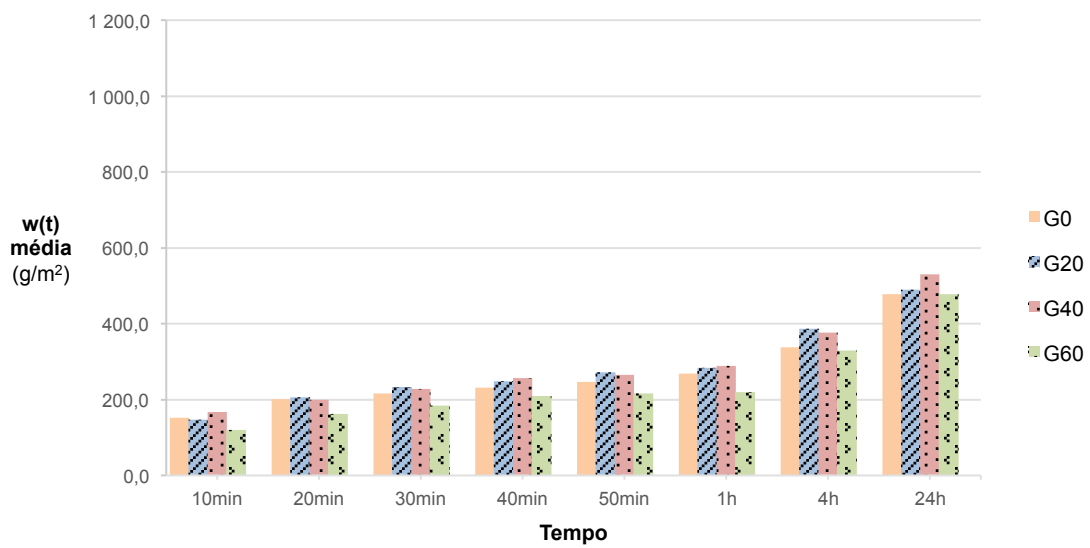


Fig. 5.26 – Absorção média de água por capilaridade do betão com godo rolado (35 dias de idade)

Examinando a Fig. 5.26, apura-se que inicialmente os valores da absorção de água por capilaridade são idênticos entre amassaduras, com exceção de G60 na qual esta é mais baixa. Ao fim das 24h de contato com a água, a amassadura G40 destaca-se das restantes (amassaduras com e sem fibras) com uma absorção de água maior, enquanto que as restantes terminaram com valores semelhantes.

Observando a Fig. 5.27 averigua-se que a progressão da absorção de água com o tempo é a esperada.

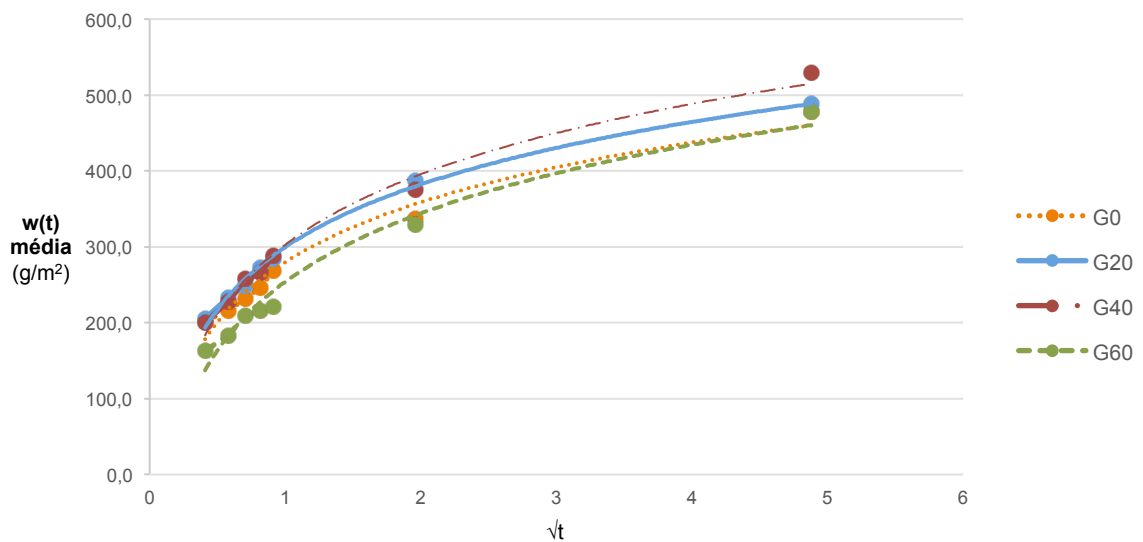


Fig. 5.27 – Variação da absorção de água por capilaridade com o tempo (35 dias de idade)

5.2.5.3. Absorção de água por capilaridade do betão contendo brita granítica com 90 dias de idade à data de ensaio

Nos Quadros 5.39, 5.40, 5.41 e 5.42 apresentam-se os valores dos ensaios de absorção de água por capilaridade no betão com brita granítica aos 90 dias de idade à data de ensaio.

Quadro 5.39 – Absorção de água do betão com brita granítica (B0)

Amassadura	Provete	Tempo	w(t) Valores individuais (g/m ²)	w(t) Valor médio (g/m ²)
B0	21	10min	300,0	288,9
	22		283,3	
	23		283,3	
	21	20min	377,8	355,6
	22		350,0	
	23		338,9	
	21	30min	433,3	411,1
	22		405,6	
	23		394,4	
	21	40min	472,2	464,8
	22		450,0	
	23		472,2	
	21	50min	511,1	490,7
	22		488,9	
	23		472,2	
	21	1h	533,3	518,5
	22		516,7	
	23		505,6	
	21	4h	772,2	763,0
	22		766,7	
	23		750,0	
	21	24h	1105,6	1090,7
	22		1088,9	
	23		1077,8	

Quadro 5.40 – Absorção de água do betão com brita granítica (B20)

Amassadura	Provete	Tempo	w(t) Valores individuais (g/m ²)	w(t) Valor médio (g/m ²)
B20	25	10min	272,2	303,7
	26		322,2	
	27		316,7	
	25	20min	355,6	387,0
	26		411,1	
	27		394,4	
	25	30min	411,1	438,9
	26		461,1	
	27		444,4	
	25	40min	450,0	481,5
	26		505,6	
	27		488,9	
	25	50min	483,3	514,8
	26		538,9	
	27		522,2	
	25	1h	505,6	538,9
	26		566,7	
	27		544,4	
	25	4h	722,2	757,4
	26		800,0	
	27		750,0	
	25	24h	1077,8	1114,8
	26		1161,1	
	27		1105,6	

Quadro 5.41 – Absorção de água do betão com brita granítica (B40)

Amassadura	Provete	Tempo	w(t) Valores individuais (g/m ²)	w(t) Valor médio (g/m ²)
B40	25	10min	66,7	72,2
	26		72,2	
	27		77,8	
	25	20min	83,3	92,6
	26		94,4	
	27		100,0	
	25	30min	100,0	107,4
	26		111,1	
	27		111,1	
	25	40min	111,1	118,5
	26		122,2	
	27		122,2	
	25	50min	116,7	125,9
	26		133,3	
	27		127,8	
	25	1h	122,2	133,3
	26		144,4	
	27		133,3	
	25	4h	200,0	214,8
	26		227,8	
	27		216,7	
	25	24h	311,1	329,6
	26		338,9	
	27		338,9	

Quadro 5.42 – Absorção de água do betão com brita granítica (B60)

Amassadura	Provete	Tempo	w(t) Valores individuais (g/m ²)	w(t) Valor médio (g/m ²)
B60	25	10min	50,0	64,8
	26		66,7	
	27		77,8	
	25	20min	61,1	79,6
	26		83,3	
	27		94,4	
	25	30min	72,2	90,7
	26		94,4	
	27		105,6	
	25	40min	83,3	101,9
	26		105,6	
	27		116,7	
	25	50min	88,9	111,1
	26		116,7	
	27		127,8	
	25	1h	94,4	113,0
	26		111,1	
	27		133,3	
	25	4h	166,7	190,7
	26		194,4	
	27		211,1	
	25	24h	288,9	313,0
	26		316,7	
	27		333,3	

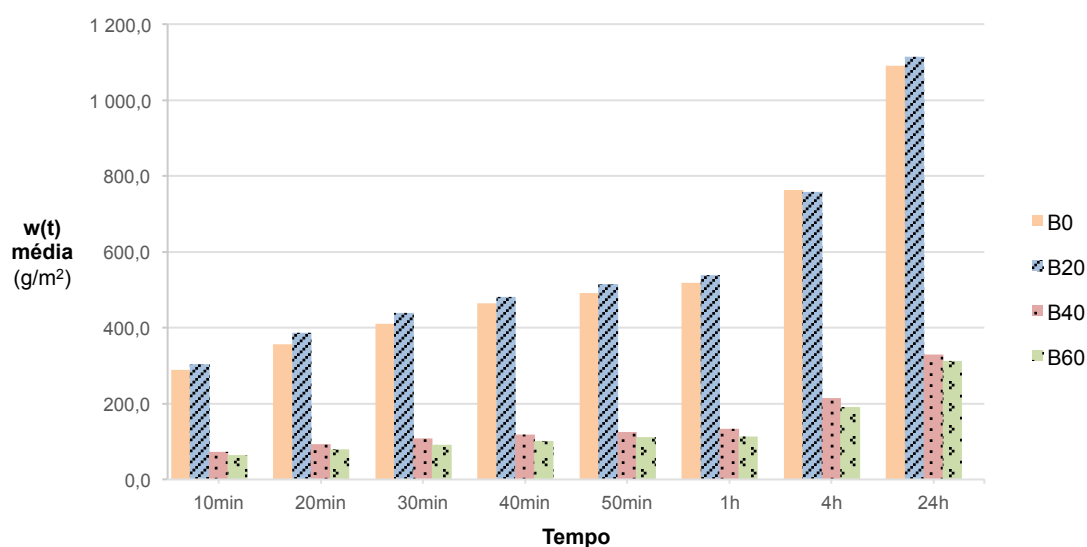


Fig. 5.28 – Absorção média de água por capilaridade do betão com brita granítica (90 dias de idade)

Decorridos 90 dias entre a data de produção do betão e a data de ensaio do mesmo, é claramente notória a diferença de absorção de água entre o betão com e sem fibras, com exceção da amassadura B20, sendo que, no final do ensaio, B40 e B60 apresentam valores idênticos.

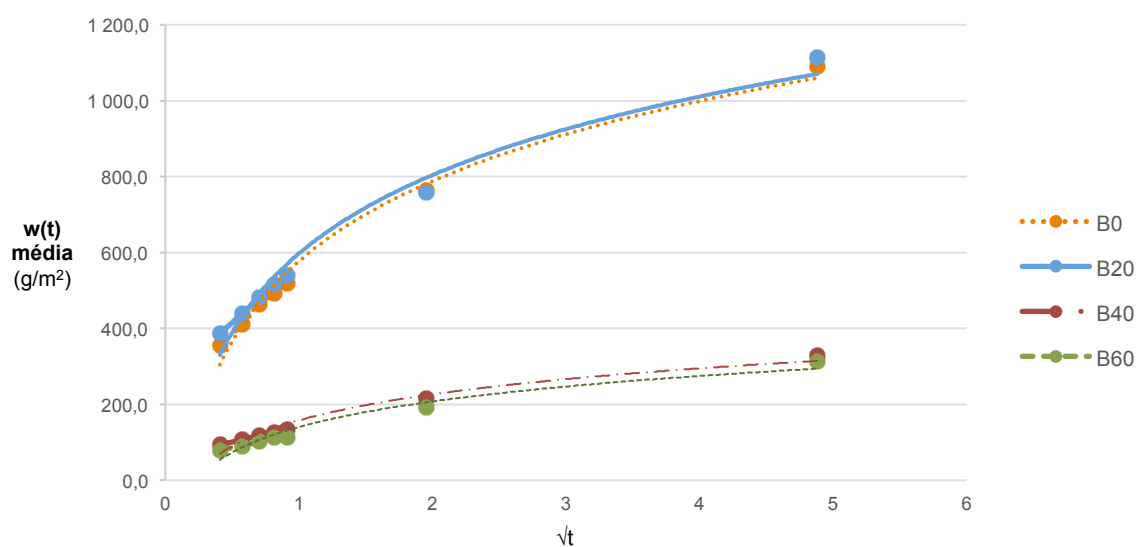


Fig. 5.29 – Variação da absorção de água por capilaridade com o tempo (90 dias de idade)

Apesar de continuarem evidentes os 3 patamares, existe uma visível diferença entre amassaduras. É facilmente notável que, nas amassaduras B40 e B60, a absorção de água é muito mais controlada que nas restantes amassaduras, verificável pelo declive pouco acentuado expresso no gráfico.

5.2.5.4. Absorção de água por capilaridade do betão contendo godo rolado com 90 dias de idade à data de ensaio

Nos Quadros 5.43, 5.44, 5.45 e 5.46 apresentam-se os valores dos ensaios de absorção de água por capilaridade no betão com godo rolado aos 90 dias de idade à data de ensaio.

Quadro 5.43 – Absorção de água do betão com godo rolado (G0)

Amassadura	Provete	Tempo	w(t) Valores individuais (g/m ²)	w(t) Valor médio (g/m ²)
G0	18	10min	238,9	255,6
	19		261,1	
	20		266,7	
	18	20min	322,2	342,6
	19		355,6	
	20		350,0	
	18	30min	377,8	398,1
	19		411,1	
	20		405,6	
	18	40min	411,1	435,2
	19		450,0	
	20		444,4	
	18	50min	444,4	464,8
	19		477,8	
	20		472,2	
	18	1h	466,7	487,0
	19		500,0	
	20		494,4	
	18	4h	666,7	694,4
	19		705,6	
	20		711,1	
	18	24h	938,9	975,9
	19		977,8	
	20		1011,1	

Quadro 5.44 – Absorção de água do betão com godo rolado (G20)

Amassadura	Provete	Tempo	w(t) Valores individuais (g/m ²)	w(t) Valor médio (g/m ²)
G20	25	10min	72,2	79,6
	26		77,8	
	27		88,9	
	25	20min	94,4	98,1
	26		94,4	
	27		105,6	
	25	30min	105,6	107,4
	26		105,6	
	27		111,1	
	25	40min	116,7	120,4
	26		116,7	
	27		127,8	
	25	50min	127,8	127,8
	26		122,2	
	27		133,3	
	25	1h	133,3	133,3
	26		127,8	
	27		138,9	
	25	4h	200,0	366,7
	26		200,0	
	27		700,0	
	25	24h	311,1	313,0
	26		316,7	
	27		311,1	

Quadro 5.45 – Absorção de água do betão com godo rolado (G40)

Amassadura	Provete	Tempo	w(t) Valores individuais (g/m ²)	w(t) Valor médio (g/m ²)
G40	25	10min	83,3	92,6
	26		83,3	
	27		111,1	
	25	20min	105,6	116,7
	26		111,1	
	27		133,3	
	25	30min	127,8	135,2
	26		122,2	
	27		155,6	
	25	40min	138,9	146,3
	26		133,3	
	27		166,7	
	25	50min	150,0	159,3
	26		144,4	
	27		183,3	
	25	1h	155,6	164,8
	26		150,0	
	27		188,9	
	25	4h	238,9	246,3
	26		233,3	
	27		266,7	
	25	24h	361,1	372,2
	26		361,1	
	27		394,4	

Quadro 5.46 – Absorção de água do betão com godo rolado (G60)

Amassadura	Provete	Tempo	w(t)	w(t)
			Valores individuais (g/m ²)	Valor médio (g/m ²)
G60	25	10min	61,1	66,7
	26		72,2	
	27		66,7	
	25	20min	77,8	83,3
	26		88,9	
	27		83,3	
	25	30min	88,9	96,3
	26		105,6	
	27		94,4	
	25	40min	94,4	101,9
	26		111,1	
	27		100,0	
	25	50min	100,0	109,3
	26		122,2	
	27		105,6	
	25	1h	111,1	118,5
	26		127,8	
	27		116,7	
	25	4h	177,8	188,9
	26		205,6	
	27		183,3	
	25	24h	305,6	311,1
	26		327,8	
	27		300,0	

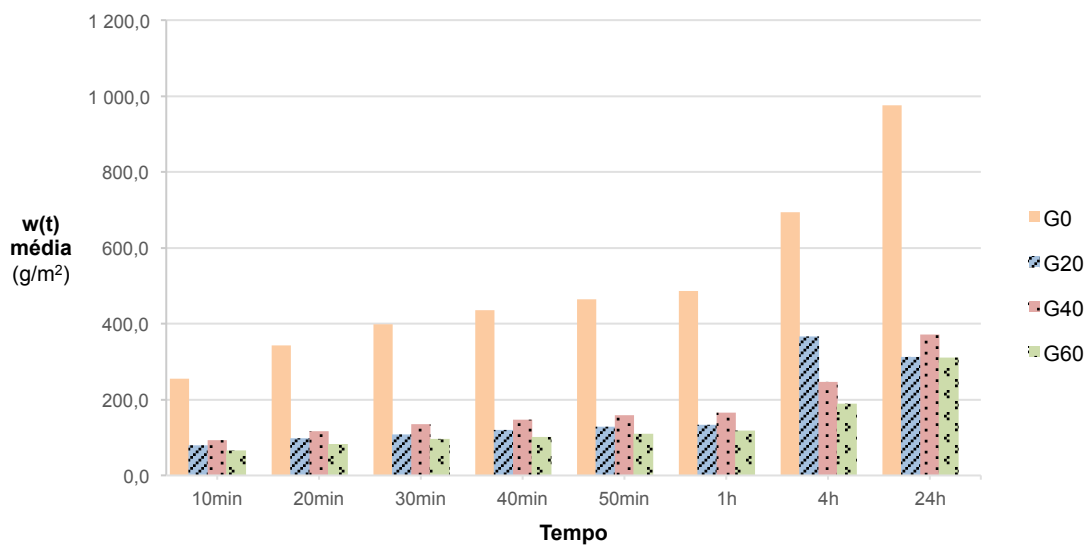


Fig. 5.30 – Absorção média de água por capilaridade do betão com godo rolado (90 dias de idade)

Nítida diferença de absorção de água entre amassaduras com e sem fibras em que, amassaduras com fibras apresentam valores bem menores. No final do ensaio (24h), G20 e G60 aproximam-se do mesmo valor enquanto que G40 teve uma superior absorção de água em comparação com as restantes amassaduras com fibras.

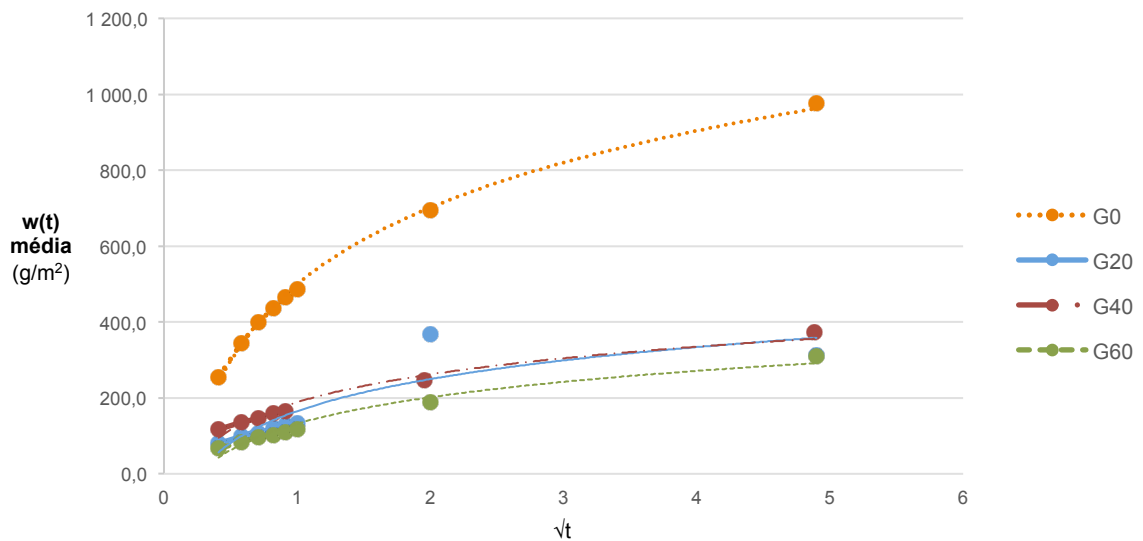


Fig. 5.31 – Variação da absorção de água por capilaridade com o tempo (90 dias de idade)

Examinando a variação da absorção de água com o tempo é clara a diferença de progressões. A leitura às 4h de ensaio, evidencia um valor anormalmente maior do que seria de esperar na amassadura G20, isto tendo em conta a evolução com o tempo dessa mesma amassadura.

5.2.6. PERMEABILIDADE AO OXIGÉNIO (E 392-1993)

Os ensaios de permeabilidade ao oxigénio foram concretizados segundo o procedimento descrito em 4.3.6..

5.2.6.1. Permeabilidade do betão com brita granítica

No Quadro 5.47 apresentam-se os valores do ensaio de permeabilidade ao oxigénio com brita granítica.

Quadro 5.47 – Permeabilidade do betão com brita granítica

Amassadura	Provete	K (m ²)
B0	42	<10 ⁻¹⁹
	43	<10 ⁻¹⁹
	44	<10 ⁻¹⁹
B20	46	<10 ⁻¹⁹
	47	<10 ⁻¹⁹
	48	<10 ⁻¹⁹
B40	46	<10 ⁻¹⁹
	47	b)
	48	<10 ⁻¹⁹
B60	46	b)
	47	b)
	48	b)

b) provetes defeituosos

Esta norma é aplicável a betões com variação de permeabilidade ao oxigénio entre 10⁻¹⁴ e 10⁻¹⁹ m². Os valores obtidos nos ensaios foram inferiores ao mínimo requerido pela norma, daí considerar-se o betão impermeável à passagem do oxigénio. Nos provetes assinalados com b) a superfície lateral apresentava canais inviabilizando a realização do ensaio.

5.2.6.2. Permeabilidade do betão com godo rolado

No Quadro 5.48 apresentam-se os valores do ensaio de permeabilidade ao oxigénio com godo rolado.

Quadro 5.48 – Permeabilidade do betão com godo rolado

Amassadura	Provete	K (m ²)
G0	39	<10 ⁻¹⁹
	40	<10 ⁻¹⁹
	41	<10 ⁻¹⁹
G20	46	b)
	47	<10 ⁻¹⁹
	48	b)
G40	46	<10 ⁻¹⁹
	47	<10 ⁻¹⁹
	48	b)
G60	46	b)
	47	<10 ⁻¹⁹
	48	<10 ⁻¹⁹

b) provetes defeituosos

Esta norma é aplicável a betões com variação de permeabilidade ao oxigénio entre 10⁻¹⁴ e 10⁻¹⁹ m². Os valores obtidos nos ensaios foram inferiores ao mínimo requerido pela norma, daí considerar-se o betão impermeável à passagem do oxigénio. Nos provetes assinalados com b) a superfície lateral apresentava canais inviabilizando a realização do ensaio.

5.3. COMPARAÇÃO DOS ENSAIOS E CORRELAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

5.3.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

5.3.1.1. Resistência à compressão de betões de brita granítica e godo rolado (cubos)

Na Fig. 5.32 pode analisar-se a comparação de resistências à compressão entre betões contendo britas e godos em provetes cúbicos.

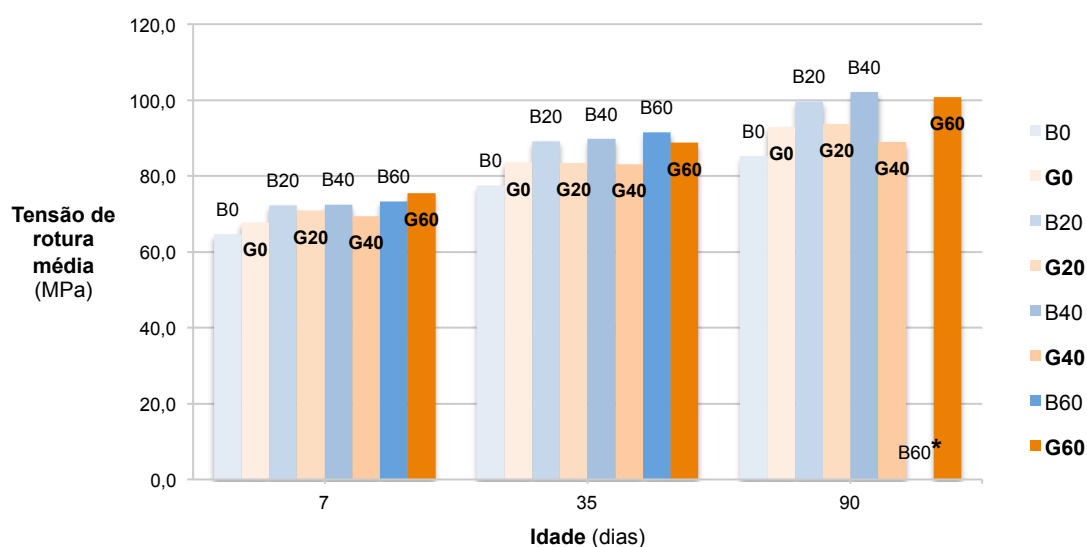


Fig. 5.32 – Comparação de resistências à compressão médias entre betões de brita granítica e godo rolado (cubos)

* valor inexistente

Analisando a Fig. 5.32, percebe-se que aos 7 dias de idade, as tensões de rotura são bastante idênticas entre betões fabricados tanto com britas como com godos. Já aos 35 e 90 dias de idade à data de ensaio, existe uma diferença ligeiramente maior entre betões com britas do que com godos embora idênticas resistências nas amassaduras B60 e G60 (aos 35 dias de idade à data de ensaio). Os betões que possuem fibras nas suas composições apresentam tensões visivelmente maiores do que de betões sem fibras.

5.3.1.2. Resistência à compressão em cilindros ($\varnothing 15 \times 30$ cm) de brita granítica e godo rolado

Na Fig. 5.33 pode analisar-se a comparação de resistências à compressão entre betões contendo britas e godos, em provetes cilíndricos.

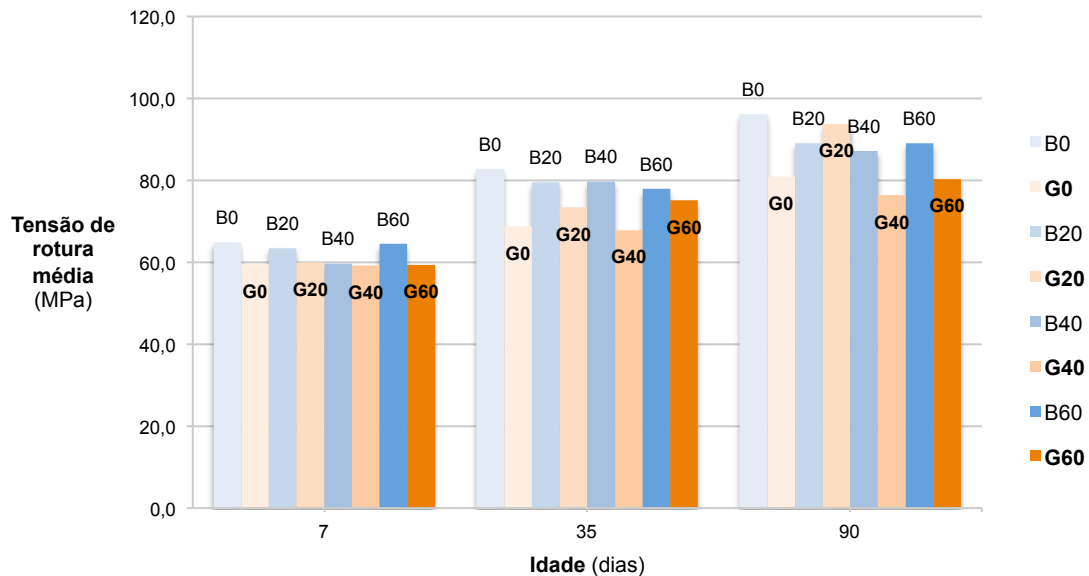


Fig. 5.33 – Comparação de resistências à compressão médias entre betões de brita granítica e godo rolado (cilindros)

Em ambas as idades, a amassadura B0 (sem fibras) deu valores ligeiramente maiores que as restantes amassaduras com fibras. Aos 7 dias de idade à data de ensaio, os valores das tensões das amassaduras de betões contendo agregados grossos diferentes aproximam-se em grosso modo umas das outras em oposição ao que ocorre aos 35 e 90 dias. De um modo geral (com exceção da amassadura G20 aos 90 dias), os betões contendo britas apresentam resistências superiores aos betões contendo godos.

5.3.2. RESISTÊNCIA À FLEXÃO

5.3.2.1. Resistência à flexão em betões de brita granítica e godo rolado com 35 dias de idade à data de ensaio (NP EN 12390-5:2009)

Na Fig. 5.34 é feita a comparação da resistência à flexão entre betões contendo britas e godos.

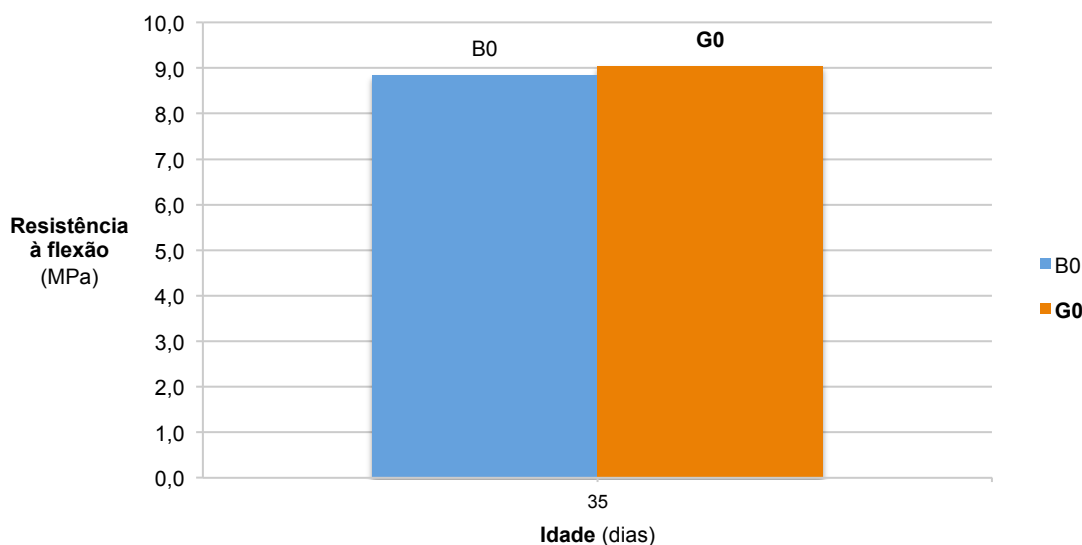


Fig. 5.34 – Variação de resistências à flexão entre betões de brita granítica e godo rolado

Comparando as resistências à flexão dos betões fabricados com britas com aqueles produzidos com godos, constata-se que ambos apresentam resistências praticamente iguais.

5.3.2.2. Resistência à flexão em betões de brita granítica e godo rolado com 35 dias de idade à data de ensaio (EN 14651:2005)

20 kg/m³

O limite de proporcionalidade nos betões com godos é ligeiramente superior no entanto, os betões contendo britas têm resistências levemente maiores às dos betões com godos para igual idade e dosagem de fibras, no “patamar” de cedência;

40 kg/m³

O limite de proporcional é bastante idêntico assim como o comportamento no “patamar” de cedência. Pode-se no entanto assinalar que os betões contendo britas atingem resistências tenuemente maiores neste patamar;

60 kg/m³

Tanto no limite de proporcionalidade como nos “patamares” de cedência, os betões com godos apresentam valores mais altos.

5.3.2.3. Resistência à flexão em betões de brita granítica e godo rolado com 90 dias de idade à data de ensaio (EN 14651:2005)

20 kg/m³

Os limites de proporcionalidade são da mesma ordem embora com valores de resistência nos “patamares” e resistência ligeiramente superiores nos betões contendo brita;

40 kg/m³

Os betões contendo britas apresentam limites de proporcionalidade maiores assim como as resistências no “patamar” de cedência, com diferenças assinaláveis;

60 kg/m³

Os dois tipos de betões (com britas e com godos) possuem limites idênticos embora com diferenças nos “patamares” de cedência em que os betões com godos apresentam valores superiores.

5.3.3. MÓDULO DE ELASTICIDADE

5.3.3.1. Módulos de elasticidade em betões de brita granítica e godo rolado

A Fig. 5.35 expõe a comparação de módulos de elasticidade entre betões produzidos com britas graníticas e godos rolados.

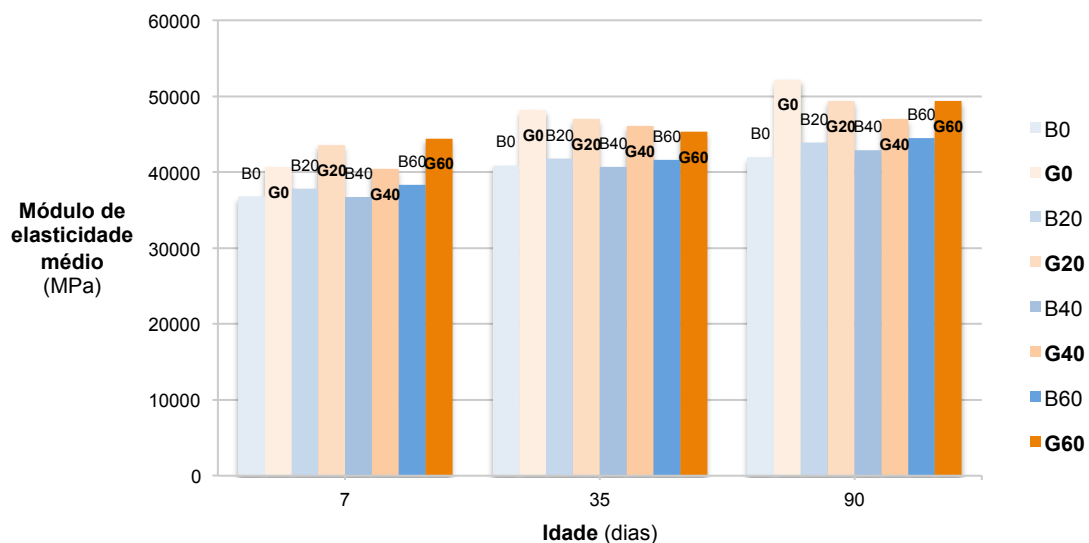


Fig. 5.35 – Comparação de módulos de elasticidade médios entre betões de brita granítica e godo rolado

Através da análise da Fig. 5.35 verifica-se que nas três idades em que foram realizados os ensaios, os betões produzidos com godo rolado como agregado grosso apresentaram módulos de elasticidade superiores àqueles em que o agregado grosso era brita granítica.

5.3.3.2. Tensões de rotura em betões de brita granítica e godo rolado

A Fig. 5.36 expõe a comparação de tensões de rotura entre betões produzidos com britas graníticas e godos rolados.

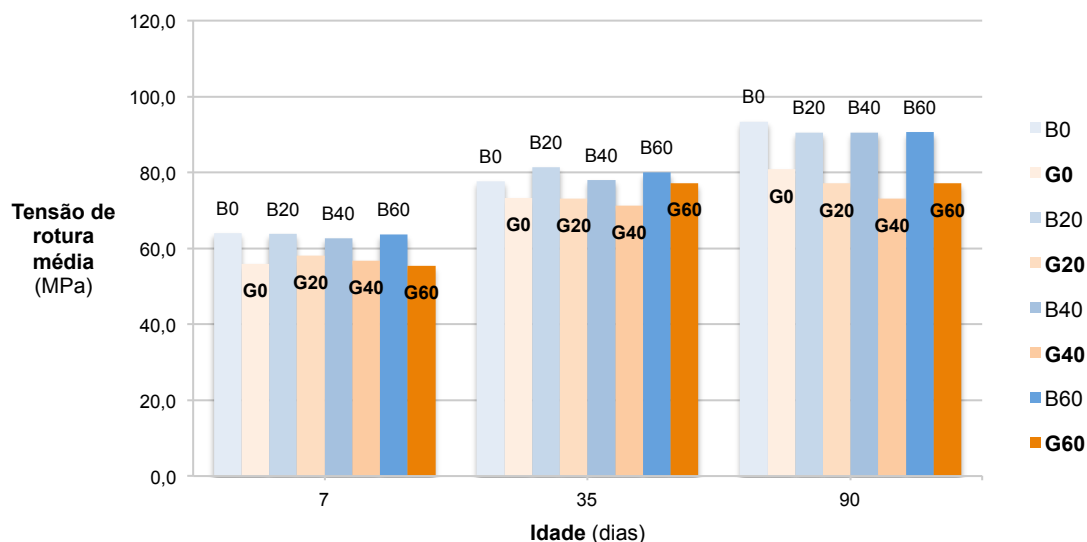


Fig. 5.36 – Comparação de tensões de rotura médias entre betões de brita granítica e godo rolado

Examinando a Fig. 5.36 atesta-se que, para as três idades dos ensaios, existe uma notória diferença entre tensões de rotura em que, os betões produzidos com brita granítica apresentam tensões maiores.

Ao comparar as tensões de rotura de provetes cilíndricos moldados para serem exclusivamente ensaiados à compressão com aqueles moldados para ensaios de módulo de elasticidade e posteriormente levados à rotura, é possível distinguir diferenças. Como seria de esperar, as tensões de rotura dos cilindros de ensaios de módulo de elasticidade são ligeiramente menores. Tal se pode ter devido ao fato destes, numa primeira fase, serem submetidos ao ensaio do módulo de elasticidade, onde estão sujeitos a várias cargas e descargas e, só depois, levados à rotura.

5.3.4. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

5.3.4.1. Absorção de água por imersão em betões de brita granítica e godo rolado com 90 dias de idade à data de ensaio

Na Fig. 5.37 pode observar-se a comparação da absorção de água por imersão entre betões produzidos com britas graníticas e godos rolados à idade de ensaio de 90 dias.

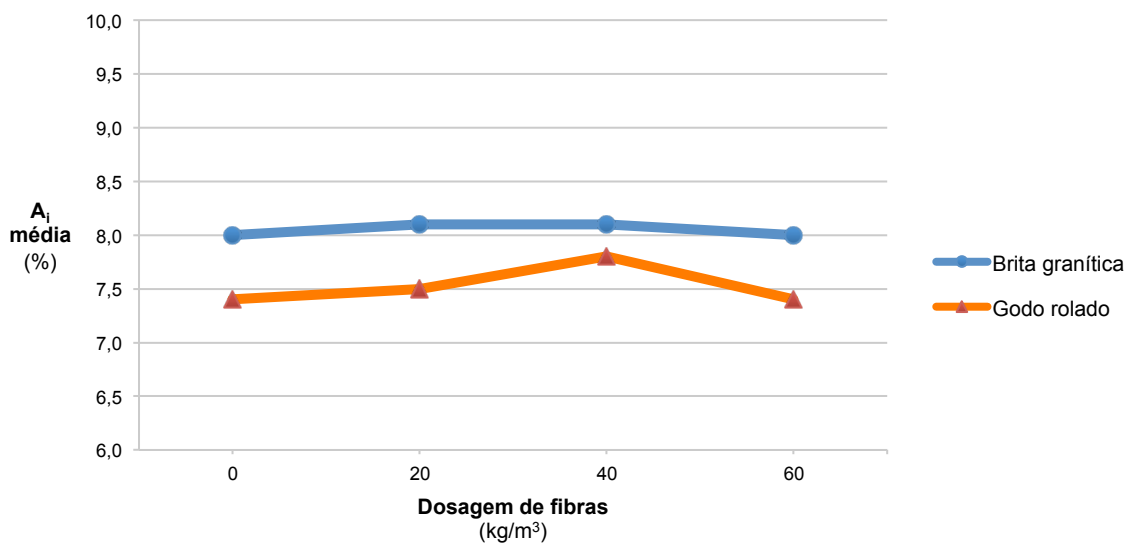


Fig. 5.37 – Comparação da absorção média de água por imersão entre betões de brita granítica e godo rolado

Analisando a Fig. 5.37, verifica-se a prevalência de uma maior absorção de água nos betões com britas graníticas do que aqueles com godos.

5.3.5. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

5.3.5.1. Absorção de água por capilaridade em betões de brita granítica e godo rolado com 35 dias de idade à data de ensaio

Na Fig. 5.38 é realizada a comparação da absorção de água por capilaridade entre betões produzidos com britas graníticas e godos rolados à idade de ensaio de 35 dias.

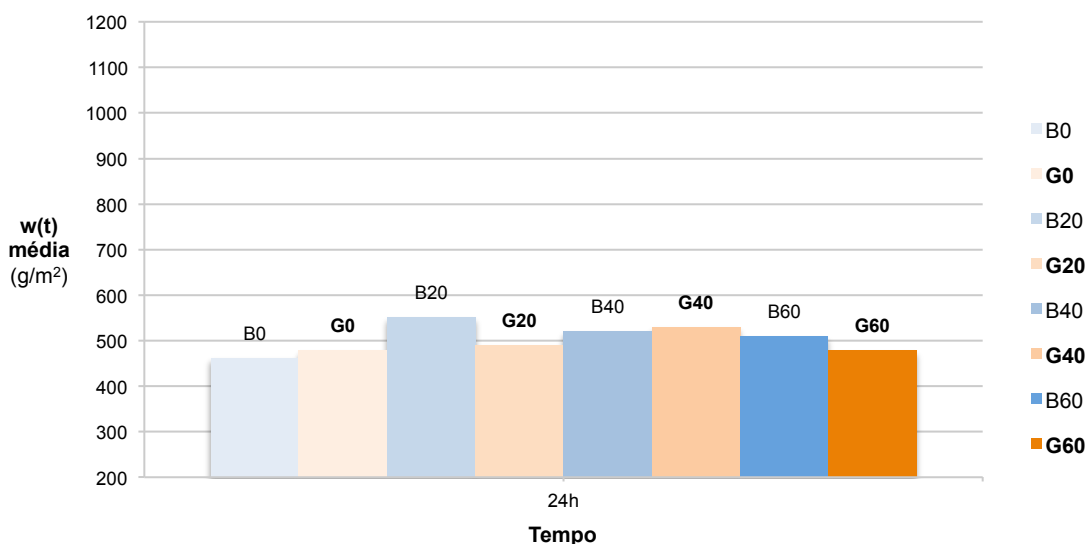


Fig. 5.38 – Comparação da absorção média de água ao fim de 24h entre betões de brita granítica e godo rolado

Os valores de absorção de água por capilaridade são todos muito idênticos, não havendo evidência de uma maior absorção em um agregado grosso pelo outro.

5.3.5.2. Absorção de água por capilaridade em betões de brita granítica e godo rolado com 90 dias de idade à data de ensaio

Na Fig. 5.39 é realizada a comparação da absorção de água por capilaridade entre betões produzidos com britas graníticas e godos rolados à idade de ensaio de 90 dias.

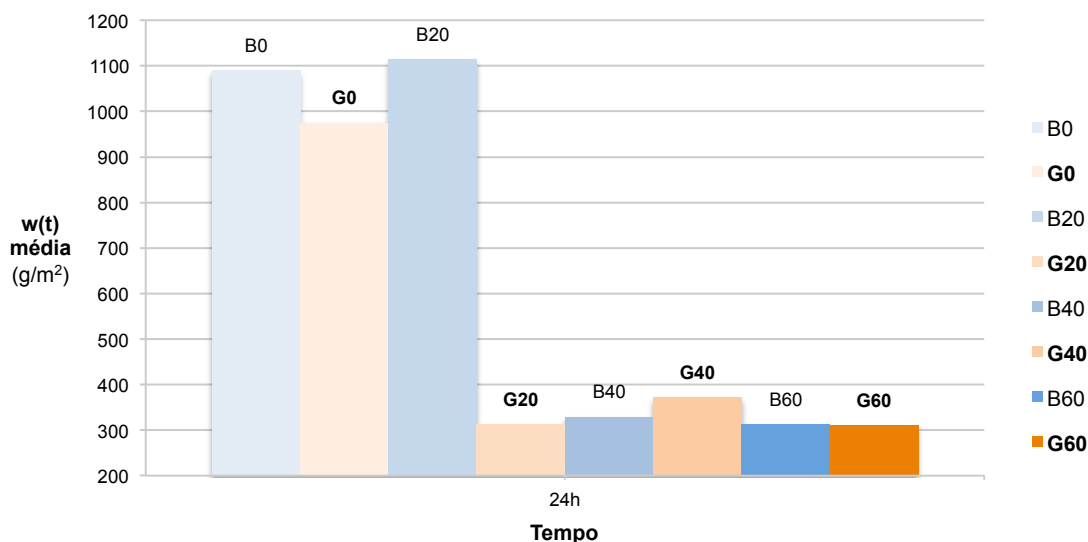


Fig. 5.39 – Comparação da absorção média de água ao fim de 24h entre betões de brita granítica e godo rolado

Existe nitidamente uma maior absorção de água por capilaridade nas amassaduras sem fibras. Com exceção da amassadura B20 que apresenta um valor anormalmente maior em comparação com os restantes, não existe prevalência de um tipo de agregado grosso sobre o outro, verificando-se diferenças muito subtis.

6

CONCLUSÕES

6.1. APRECIÇÕES GERAIS

Antes de mais, importa relembrar que os betões sem fibras com britas e godos ensaiados possuíam composições, resistências e trabalhabilidade idênticas. Com isto se deduz que, apesar da dosagem de fibras variar e com isso poder induzir alterações no comportamento do betão, o principal aspeto objeto de pesquisa deste trabalho foi a influência da natureza do agregado grosso no comportamento do BRFA. Por este motivo, numa primeira fase da campanha experimental, procedeu-se à avaliação de certas propriedades dos agregados com o intuito de procurar caracteriza-los, no que concerne à forma e à granulometria. Assim, através da análise dos índices e, tendo em conta que tanto os valores obtidos em britas como em godos não foram muito diferentes, conclui-se que por meio destes parâmetros não foi possível diferenciar estes dois tipos de agregados grossos. Porém, por uma análise visual é possível distinguir os agregados quanto à textura, em que um é liso (godo rolado) e o outro rugoso (brita granítica).

Embora em betões de alta resistência não devam ser usados godos graúdos, mesmo assim estes foram utilizados. Com isto pretendeu-se verificar a diferença que o uso destas partículas causam no desempenho do betão.

Atenta-se ainda que as conclusões deduzidas desta dissertação apenas se aplicam ao uso de fibras Dramix® 5D.

6.2. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

6.2.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Nos provetes cúbicos produzidos com betões contendo britas e ensaiados no LEMC, a adoção de fibras induziu melhorias na tensão de rotura, enquanto nos betões possuindo godos como agregado grosso este incremento apenas se verificou na amassadura G60. Ao comparar betões contendo britas com aqueles contendo godos, verifica-se que, para todas as idades, os betões fabricados com britas apresentam maiores tensões.

Por seu lado, nos provetes cilíndricos produzidos com britas e ensaiados no LEMC, constata-se que a adoção de fibras não proporcionou qualquer incremento, pelo contrário, piorou o valor nas tensões de rotura quando comparado com a amassadura B0 (sem fibras). Já nas composições contendo godos, existe uma melhoria proporcional ao aumento da dosagem de fibras. Comparando betões com britas com aqueles contendo godos, embora menos notável, denota-se que os betões com brita granítica apresentam também maior tensão de rotura.

- Conclui-se assim que, quanto aos ensaios de resistência à compressão realizados no LEMC, as fibras facultam certos incrementos nos provetes cúbicos. Esta melhoria é mais facilmente notada em betões contendo britas. A diferença de comportamentos entre betões possuindo britas e aqueles contendo godos pode ser explicada pela forma e superfície que distingue estes agregados. Enquanto que os godos apresentam partículas com faces mais lisas, as britas apresentam faces mais irregulares com vértices e arestas bem definidas o que, pela análise dos

resultados comprovam uma melhor aderência da argamassa ao agregado; porém, tendo em conta os resultados dos ensaios realizados em cubos de betão no *Concrete Laboratory* da Bekaert na Bélgica, a anterior constatação não se confirma de forma tão clara.

6.2.2. RESISTÊNCIA À FLEXÃO

- Com o incremento da dosagem de fibras, verifica-se que as tensões residuais vão aumentando e atingem valores superiores aos do limite de proporcionalidade (f_L);
- A diminuição do coeficiente de variação das resistências residuais tende a diminuir com o aumento da dosagem de fibras em cada amassadura, indicando um melhor comportamento do betão à flexão dependente da quantidade de fibras;
- Pelos ensaios realizados percebe-se também que o tipo de agregado grosso usado não influencia o comportamento do betão com fibras;
- Percebe-se ainda que dosagens de 20 kg/m^3 de fibras são insuficientes para surtir o efeito desejado no reforço das tensões residuais. Assim, segundo os estudos realizados, é desaconselhado o uso de tão diminuta quantidade, ou seja, tem que haver uma determinada porção de fibras que garantam uma homogeneidade do betão.

6.2.3. MÓDULO DE ELASTICIDADE

Tanto em betões contendo britas como aqueles contendo godos, e com o avançar da idade, verifica-se que a adição de fibras não apresenta grande contribuição no aumento do módulo de elasticidade. Quando feita a comparação entre betões com britas com betões com godos, denota-se que as amassaduras contendo godos apresentam um módulo de elasticidade um pouco superior ao que se verifica nos betões com britas.

- Ao contrário do expectável, a introdução de fibras nos betões não trouxe variações significativas quanto ao módulo de elasticidade. Seria de prever um maior módulo de elasticidade entre amassaduras com adição de fibras do que com aquelas sem, dado o efeito de cintagem proporcionado pelas fibras;
- A situação ocorrida no ponto anterior pode ser justificada devido à grande diferença entre o módulo de elasticidade dos godos e da argamassa que os envolve. Desta forma, era esperado que os módulos de elasticidade das composições com godos fossem inferiores ao das composições com britas (os godos ter-se-iam destacado da argamassa durante o ensaio por serem mais lisos). No entanto, pela análise feita, esta situação não se confirmou. Pode isto ser explicado pelo efeito de cintagem proporcionado pelas fibras, que evita que os godos se destaquem da argamassa.

Após o ensaio para a determinação do módulo de elasticidade, os cilindros foram ensaiados para a tensão de rotura. Nestes ensaios, os provetes contendo britas apresentam resultados significativamente superiores aos dos provetes com godos.

- Embora fosse esperado que estas tensões de rotura fossem ligeiramente inferiores às obtidas no ensaio de resistência à compressão, verificou-se que em todas as idades, os valores foram idênticos aos valores obtidos quer nos ensaios à compressão como naqueles posteriormente realizados aos ensaios de módulo de elasticidade.

6.2.4. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

Dada a disparidade de valores tanto em betões produzidos com britas como aqueles com godos à idade de 35 dias e, visto ter ocorrido uma contrariedade com a conservação dos provetes na estufa durante o ensaio dos mesmos, decidiu-se não utilizar estes valores pois inviabilizavam a obtenção de resultados coerentes. No entanto, nos ensaios realizados aos 90 dias de idade, verificou-se que, em ambas as amassaduras, com o aumento da dosagem de fibras, a porosidade das amassaduras não aumentou, mantendo-se o valor da absorção idêntica à das amassaduras sem fibras. Excluindo o valor da amassadura G40, conclui-se que o comportamento em betões contendo godos é igual ao dos betões com britas. Comparando betões com britas com aquelas com godos, constata-se que a absorção de água é ligeiramente superior nos betões com britas.

- Conclui-se que a adição de fibras, em ambas as amassaduras, não aumenta o valor da absorção de água, provando assim que as fibras não influenciam de forma negativa a durabilidade do betão, embora também não tragam melhorias.

6.2.5. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Nos betões contendo britas, à idade de 35 dias e que possuíam fibras na sua composição, a absorção de água por capilaridade foi superior à dos betões com britas embora sem fibras. Porém, nas amassaduras contendo godos e à mesma idade, a absorção é idêntica em todas as amassaduras, exceto em G40 que se destaca por um aumento no valor da absorção. Em contra ponto, nos betões ensaiados à idade de 90 dias, contendo britas e fibras na sua composição, verificou-se uma acentuada melhoria (exceto B20) quando comparando estes com igual betão sem fibras (B0) em que a absorção é extremamente maior. Nos betões com godo e fibras, é mais uma vez perceptível a diferença entre a absorção de água por capilaridade no betão contendo fibras do que aquela no betão sem fibras, em que esta é visivelmente maior.

Comparando a absorção de água por capilaridade entre betões com britas e godos à idade de 35 dias conclui-se que esta é bastante idêntica, não se destacando qualquer amassadura. Aos 90 dias de idade, nas amassaduras contendo fibras, excetuando B20, tanto nos betões com britas como com godos, estes apresentam uma absorção de água semelhante. Nas amassaduras sem fibras, o betão com brita apresenta uma maior absorção.

- O fato de haver tal disparidade entre valores aos 35 e 90 dias de idade, pode ser justificada pela presença de uma grande quantidade de cinzas no cimento, que fazem prolongar o tempo de hidratação do ligante. É assim natural que a tensão de rotura e características relativas à absorção de água sejam influenciadas pelo tipo de cimento (CEM IV). Este aspeto aliado à presença de fibras permite de forma evidente diminuir a absorção de água nos betões;
- Além do exposto no ponto anterior, é também sabido que quanto mais estreitos forem os capilares presentes no betão, maior será a propensão da água para penetrar nas estruturas, concluindo-se assim que a existência de fibras no betão interrompem estes “caminhos” dificultando a progressão da água;
- Nos ensaios de capilaridade, e comparando betões com britas e godos, verifica-se que ambos têm um comportamento similar em que é perceptível a estabilização da inclinação dos declives representados nos gráficos $\sqrt{t}$. Significa isto que os betões têm tendência a estabilizar com o tempo o valor da absorção de água, o que é um bom indicador da qualidade do mesmo.

6.2.6. PERMEABILIDADE AO OXIGÉNIO

No ensaio à permeabilidade verifica-se que não houve passagem do oxigénio, concluindo-se que a permeabilidade é menor que 10^{-19} m^2 para todos os betões ensaiados. Desta forma, não é possível tirar conclusões quanto à diferença do agregado grosso usado.

De um modo geral, é possível concluir que as fibras, para além de proporcionarem um reforço estrutural para o qual foram dimensionadas, são um claro contributo na melhoria de certas características da durabilidade como a absorção de água por capilaridade. Enquanto que nem todas as estruturas se encontram sujeitas a fenómenos de imersão, o mesmo não pode ser dito para a absorção de água por capilaridade. Este fenómeno é muito mais gravoso que a absorção de água por imersão porque todas as estruturas estão sujeitas à humidade do ar, águas da chuva ou orvalho, que contribuem para a presença de água na superfície do betão, aumentando assim a propensão para estas penetrarem e degradarem as estruturas.

Dada a diferença de resultados obtidos através de ensaios ao betão, realizados em locais diferentes (LEMC e *Concrete Laboratory* da Bekaert), não foi possível deduzir uma conclusão.

6.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Os desenvolvimentos futuros sobre o estudo da influência da natureza do agregado grosso no comportamento do BRFA devem versar aspetos como:

- Utilizar diferentes tipos de fibras – Dramix® 3D ou 4D;
- Repetir o trabalho variando o tipo de agregado grosso usado – diferentes granulometrias;
- Aumentar o número de provetes ensaiados por forma a obter uma amostra mais representativa;
- Utilizar um diferente tipo de ligante – outra composição do betão;
- Aumentar a dosagem de fibras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, Tíberio - Tópicos Sobre Durabilidade do Concreto. São Paulo: Ibracon, 2005.
- CEN - Test method for metallic fibre concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual). European Committee for Standardization 2005.
- Committee, American Concrete Institute - Fiber Reinforced Concrete. 2002.
- COMMITTEES, RILEM TECHNICAL - Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability. Bremen, Germany: RILEM, 1999.
- Dupont, David - Modelling and Experimental Validation of the Constitutive Law (σ - ϵ) and Cracking Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete. Katholieke Universiteit Leuven, 2003.
- Ferreira, Nuno - Influência das Características das Fibras no Desempenho do Betão. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- Ferreira, Rui Miguel - Avaliação de Ensaios de Durabilidade do Betão. Guimarães: Escola de Engenharia da Universidade do Minho, 2000.
- Figueiredo, Antonio Domingues de - Concreto Reforçado com Fibras. São Paulo, Brasil: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.
- Figueiredo;, Antonio Dominques; Torneri, Paola - Efeitos da Ancoragem em Gancho de Fibras na Tenacidade dos Concretos. São Paulo: 2006.
- Gomes, José - Influência das Fibras Metálicas no Comportamento ao Esforço Transverso de Vigas SFRC. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- Helene, Paulo - La Agresividad del Medio y la Durabilidad del Hormigón. Barcelona: 1983.
- IPQ - Análise Granulométrica
- Parte 1: Método de Peneiração. Caparica, Portugal: 2000.
- IPQ - Fibras para betão
- Parte 1: Fibras de aço
- Definições, especificações e conformidade. Caparica, Portugal: IPQ, 2008.
- IPQ - Ensaio do betão endurecido
- Parte 3: Resistência à compressão de provetes. Caparica, Portugal: IPQ, 2009a.
- IPQ - Ensaio do betão endurecido
- Parte 5: Resistência à flexão de provetes. Caparica, Portugal: 2009b.
- IPQ - Ensaio do betão fresco
- Parte 7: Determinação do teor em ar
- Métodos pressiográficos. Caparica, Portugal: IPQ, 2009c.
- IPQ - Ensaio do betão fresco.
- Parte 6: Massa volúmica. Caparica. Portugal: IPQ, 2009d.
- Kropp;, J.; Hilsdorf, H. K. - Performance Criteria for concrete durability. 1st. London: E&FN SPON, 1995.
- Li, VICTOR C. - Large Volume, High-Performance Applications of Fibers in Civil Engineering. (2000). p. 660-686.
- Lima, Rui - Utilização de Fibras Metálicas com Funções Estruturais em Estruturas de Betão. Porto: Faculdade de Engenharia da Faculdade do Porto, 2012.
- LNEC - Determinação da Absorção de água por Imersão
- Ensaio à pressão atmosférica. Portugal: MOPTC-Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1993.

- Martins, Paulo - Influência da Granulometria Agregado Miúdo na Trabalhabilidade do Concreto. Feira de Santana: Universidade Estadual de Feira de Santana, 2008.
- Medeiros, Marcelo; Andrade, Jairo; Helene, Paulo - Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. (2011).
- Mehta, P.K.; Monteiro, P.J.M. - Concrete: Microstructure, Properties, and Materials
- MIPENZ, Alan Ross - Steel fibre reinforced concrete (SFRC) – Quality, performance and specification.
- Naaman, Antoine E. - Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*. Vol. 1. n.º 3 (2003). p. 241-252.
- Normung, DIN Deutsche Institut für - Testing Concrete
Testing of hardened concrete
(specimens prepared in mould). Berlin, Germany: 1991.
- Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do -.
- Proença, Ana Maria - Betões Especiais. 2004.
- S.A., N.V. Bekaert - Reinforcing the future. N.V. Bekaert S.A., 2012. Consult. em 7 de março de 2014.
Disponível em WWW: <http://www.bekaert.com/en/ProductCatalog/Content/BuildingProductsPages/steel_fibers_new_Dramix.aspx%3E.
- Souza, Vicente Custódio Moreira de; Ripeer, Thomaz - Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto. São Paulo, Brasil: Pini, 1998.
- Ulrix, Erik; Ferreira, Nuno - 1ªs Jornadas de Materiais na Construção. Porto: 2011. - State of the art - Betões com fibras em aplicações subterrâneas.
- Vandewalle, Marc - Tunelling is an Art. Zwevegem, Belgium: NV Bekaert, 2005.
- Vitt, Gerhard - Understanding Steel Fibre Reinforced Concrete: Dramix® 2011.

A1

BOLETIM DO CIMENTO USADO



RESULTADOS DO AUTOCONTROLO

AUTOCONTROL RESULTS | RÉSULTATS DE L'AUTOCONTROLÉ

VALORES MÉDIOS

AVERAGE RESULTS | RÉSULTATS MOYENNE

REFERÊNCIA
REFERENCE Cimento Pozolânico - EN 197-1 CEM I/A (V) 32,5 R - SR
Pozolanic cement | Ciment pouzzolanique

BOLETIM Nº
REPORT N.º ACM-012/2014

FÁBRICA
PLANT | USINE Macieira-Liz

DATA
DATE 14-02-2014

MÊS
MONTH | MOIS Dezembro 2013
December | Décembre

ENSAIOS MECÂNICOS

MECHANICAL TESTS | ESSAIS MÉCANIQUES (NF EN 1261)

IDADE AGE	Resistência à Flexão (MPa) Tensile Strength Résistance à la Flexion		Resistência à Compressão (MPa) Compressive Strength Résistance à la Compression	
	MÊS MONTH MOIS	ANO YEAR AN	MÊS MONTH MOIS	ANO YEAR AN
2 dias 2d 2j	3,5	4,1	18,4	20,5
7 dias 7d 7j	5,4	6,9	30,7	32,6
28 dias 28d 28j	7,5	7,9	43,5	44,9

ENSAIOS FÍSICOS

PHYSICAL TESTS | ESSAIS PHYSIQUES

	MÊS MONTH MOIS	ANO YEAR AN
Peso Específico (g/cm³) Specific Weight Poids volumique	2,88	2,88
Resíduo de Penetração (%) Slown Rate test Résidu de Ténacité (NF EN 1261-2)	45 µm 32 µm	1,77 5,96
Superfície Específica de Betão (m²/g) Blaine Spec. Surface Surface spéc. Béton p. h. Fin (m²/g)	4302	4212
Água na Pasta Normal (%) Water content Eau de Consistance NF EN 1261-1	29,1	29,2
Tempo de Pega (min) Setting Time Temps de Prise (NF EN 1261-2)	Início Início Début Fim Fin Fin	181 195
Exponibilidade (mm) Sediment Consistency (NF EN 1261-2)	0,39	0,40
Índice de Referência (0 a 100) Reference (Whiteness) Indice de blancheur		

INFORMAÇÃO ADICIONAL

ADDITIONAL INFORMATION | INFORMATION SUPPLÉMENTAIRE

--

ANÁLISE QUÍMICA

CHEMICAL ANALYSIS | ANALYSES CHIMIQUES

	MÊS MONTH MOIS	ANO YEAR AN
Perda ao Fogo (%) Loss on Ignition Perte au Feu	2,61	3,08
Resíduo Insolúvel (%) Insoluble Residue Résidu Insoluble	23,03	21,94
Óxido de Silício (%) Silicon Oxide Oxyde de Silicium	SiO ₂	
Óxido de Alumínio (%) Aluminium Oxide Oxyde d'Aluminium	Al ₂ O ₃	
Óxido de Ferro (%) Iron Oxide Oxyde de Fer	Fe ₂ O ₃	
Óxido de Cálcio (%) Calcium Oxide Oxyde de Calcium	CaO	
Óxido de Magnésio (%) Magnesium Oxide Oxyde de Magnesium	MgO	
Sulfato (%) Sulfates Sulfates	SO ₂	2,78 3,08
Óxido de Potássio (%) Potassium Oxide Oxyde de Potassium	K ₂ O	1,08
Óxido de Sódio (%) Sodium Oxide Oxyde de Sodium	Na ₂ O	0,35
Cloro (%) Chlorine Chlore (NF EN 1261-2)	Cl	0,04 0,03
Óxido de Lítio (%) Lithium Oxide Oxyde de Lithium		
Índice de Saturação em Cálcio Lime Saturation Factor Coef. de Gypse		
Índice Silíceo Silica Ratio Indice Siliceux		
Índice Alumínico Alumina eqv Ratio Indice Alumine		

COMPOSIÇÃO POTENCIAL DE BOGUE

BOGUES COMPOSITION | COMPOSITION POTENTIAL DE BOGUE

Silicato Tricálcico (%) Tricalcium Silicate Silicate Tricalcique	C ₃ S	
Silicato Bicálcico (%) Bicalcium Silicate Silicate Bicalcique	C ₂ S	
Aluminato Tricálcico (%) Tricalcium Aluminate Aluminato Tricalcique	C ₃ A	
Ferro-aluminato Tetracálcico (%) Tetracalcium Ferraluminate Ferro-aluminato Tetralcique	C ₄ AF	

APROVADO

APPROVED | APPROUVÉ

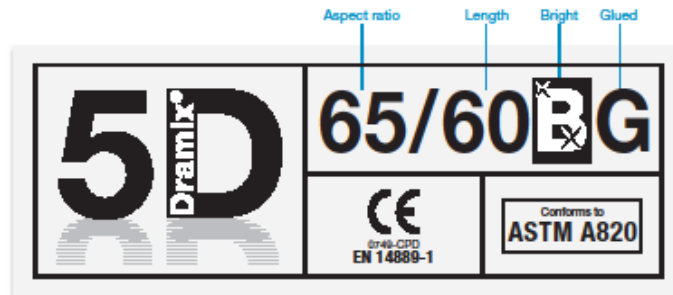
SEMA

Nota: (NOTE) Os resultados são apresentados com todos os dados com excepção dos dados de referência. Os resultados são apresentados com todos os dados, excepto os dados de referência.

A2

BOLETIM DAS FIBRAS USADAS (EM INGLÊS)

Data Sheet



DRAMIX® 5D



The Dramix® 5D series provides you with the ultimate in performance, thanks to a unique combination of a perfectly shaped hook, a high ductility wire, and extreme tensile strength.

- > ultimate anchorage
- > high L/D ratio, glued fibre
- > ultra high tensile strength
- > high ductility wire

Dramix® 5D is a cost efficient solution for high end ULS structural applications

- > foundation slabs structural rafts
- > rafts
- > suspended structures
- > structural precast elements
- > structural floors (e.g. floors on piles)

Bekaert supplies all of the support you need for your project. We help you determine the most suitable fibre types, calculate optimal dosages, select the right concrete quality. Contact your local support. Go to www.bekaert.com/dosingdramix for our recommendations on handling, dosing and mixing.

Modifications reserved.
All details describe our products in general form only.
For detailed information, product specifications available on request.

PERFORMANCE

Material properties

Tensile strength: $R_{t, \text{mean}} \geq 2.300 \text{ N/mm}^2$
Tolerances: $\pm 7,5\%$ Avg
Young's Modulus: $\pm 210.000 \text{ N/mm}^2$
Wire ductility: Ag+e = 6%

Geometry

Fibre family	5D	
Length (l)	60 mm	
Diameter (d)	0,90 mm	
Aspect ratio (l/d)	65	

Fibre network

9,0 km per m² (for 15 kg/m²)
3.183 fibres/kg
Minimum dosage:
15 kg per m² (according to CE)

Dramix® range

	5D	4R	3R
Tensile strength			
Wire ductility			
Anchorage strength			

PRODUCT CERTIFICATES



Dramix® is certified for structural use according to EN 14889-1 (system '1'). Detailed information is available on request.

SYSTEM CERTIFICATES



All Dramix® plants are ISO 9001 and ISO 14001 certified.

PACKAGING



STORAGE



A3

ÍNDICE DE ACHATAMENTO E ÍNDICE DE FORMA DOS AGREGADOS GROSSOS

Índice de achatamento

Norma de referência: **NP EN 933-3 - Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 3: Determinação da forma das partículas. Índice de achatamento**

Boletim nº **T102 03/14**

Data de ensaio: **18-03-2014**

Requerente: _____

Obra: _____

Referência da amostra: **Brita 4/8mm**

M_0 - Massa do provete	(g)	1494,7
Massa retida no peneiro de 80mm	(g)	
Massa que passa no peneiro de 4mm	(g)	412,6
Soma das massas rejeitadas	(g)	412,6

Peneiração em peneiros de ensaio		Peneiração em peneiros de barras		
Fracção granulométrica d/D _i	Massa da fracção granulométrica d/D _i	Largura nominal da ranhura no peneiro de barras	Massa que passa pelo peneiro de barras	F _i
(mm)	R _i (g)	(mm)	m _i (g)	$= (m_i/R_i) \times 100$ (%)
63/80		40		#DIV/0!
50/63		31,5		#DIV/0!
40/50		25		#DIV/0!
31,5/40		20		#DIV/0!
25/31,5		16		#DIV/0!
20/25		12,5		#DIV/0!
16/20		10		#DIV/0!
12,5/16		8		#DIV/0!
10/12,5		6,3		#DIV/0!
8/10	31,2	5	3,5	11,21794872
6,3/8	210,1	4	22,6	10,75678248
5/6,3	174	3,15	6,3	3,620689655
4/5	666,2	2,5	37,4	5,613929751

M_1 - Somatório de R _i	(g)	1081,5
M_2 - Somatório de m _i	(g)	69,8
F _i - Índice de achatamento $= (M_2/M_1) \times 100$	(%)	6

Verificação - $100 \times [(M_0 - (\Sigma R_i + (\Sigma \text{Massas rejeitadas})) / M_0] < 1\%$	(%)	0,040141834
--	-----	-------------

Observações:

Ensaio realizado por: _____

Índice de achatamento

Norma de referência: **NP EN 933-3 - Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 3: Determinação da forma das partículas. Índice de achatamento**

Boletim nº **T102/14**

Data de ensaio: **12-03-2014**

Requerente: _____

Obra: _____

Referência da amostra: **Brita 6/14mm**

M_0 - Massa do provete	(g)	2843
Massa retida no peneiro de 80mm	(g)	
Massa que passa no peneiro de 4mm	(g)	78,2
Soma das massas rejeitadas	(g)	78,2

Peneiração em peneiros de ensaio		Peneiração em peneiros de barras		
Fracção granulométrica d/D_i	Massa da fracção granulométrica d/D_i	Largura nominal da ranhura no peneiro de barras	Massa que passa pelo peneiro de barras	F_i
(mm)	R_i (g)	(mm)	m_i (g)	$= (m_i/R_i) \times 100$ (%)
63/80		40		#DIV/0!
50/63		31,5		#DIV/0!
40/50		25		#DIV/0!
31,5/40		20		#DIV/0!
25/31,5		16		#DIV/0!
20/25		12,5		#DIV/0!
16/20		10		#DIV/0!
12,5/16	418,6	8	20,9	4,992833254
10/12,5	1053,6	6,3	114,8	10,8959757
8/10	826,3	5	111,5	13,49388842
6,3/8	381,9	4	49,2	12,88295365
5/6,3	46,3	3,15	3,3	7,127429806
4/5	36,8	2,5	3,1	8,423913043

M_r - Somatório de R_i	(g)	2763,5
M_p - Somatório de m_i	(g)	302,8
F_i - Índice de achatamento $= (M_p/M_r) \times 100$	(%)	11
Verificação - $100 \times [(M_0 - (\sum R_i + (\sum \text{Massas rejeitadas})) / M_0] < 1\%$	(%)	0,045726345

Observações:

Ensaio realizado por: _____

Índice de achatamento

Norma de referência: **NP EN 933-3 - Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 3: Determinação da forma das partículas. Índice de achatamento**

Boletim nº **TI 02a 03/14**

Data de ensaio: **14-03-2014**

Requerente: _____

Obra: _____

Referência da amostra: **Brita 14/20mm**

M_0 - Massa do provete	(g)	4338,1
Massa retida no peneiro de 80mm	(g)	
Massa que passa no peneiro de 4mm	(g)	30
Soma das massas rejeitadas	(g)	30

Peneiração em peneiros de ensaio		Peneiração em peneiros de barras		
Fracção granulométrica d/D_i	Massa da fracção granulométrica d/D_i	Largura nominal da ranhura no peneiro de barras	Massa que passa pelo peneiro de barras	F_i
(mm)	R_i (g)	(mm)	m_i (g)	$=(m_i/R_i) \times 100$ (%)
63/80		40		#DIV/0!
50/63		31,5		#DIV/0!
40/50		25		#DIV/0!
31,5/40		20		#DIV/0!
25/31,5		16	0	#DIV/0!
20/25	325,1	12,5	98,7	30,35988926
16/20	1988,8	10	72	3,620273532
12,5/16	1737,2	8	7	0,402947271
10/12,5	166,4	6,3	7	4,206730769
8/10	44,9	5	5,3	11,80400891
6,3/8	23,2	4	2,7	11,63793103
5/6,3	10	3,15	0,2	2
4/5	12,5	2,5	0,8	6,4

M_1 - Somatório de R_i	(g)	4308,1
M_2 - Somatório de m_i	(g)	193,7
F_i - Índice de achatamento $=(M_2/M_1) \times 100$	(%)	4
Verificação - $100 \times [(M_0 - (\sum R_i + (\sum \text{Massas rejeitadas})) / M_0] < 1\%$	(%)	2,09653E-14

Observações:

Ensaio realizado por: _____

Índice de achatamento

Norma de referência: **NP EN 933-3 - Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 3: Determinação da forma das partículas. Índice de achatamento**

Boletim nº **T102/14**

Data de ensaio: **12-03-2014**

Requerente: _____

Obra: _____

Referência da amostra: **Godó Pequeno**

M_0 - Massa do provete	(g)	2027,9
Massa retida no peneiro de 80mm	(g)	
Massa que passa no peneiro de 4mm	(g)	87,1
Soma das massas rejeitadas	(g)	87,1

Peneiração em peneiros de ensaio		Peneiração em peneiros de barras		
Fracção granulométrica d/D_i	Massa da fracção granulométrica d/D_i	Largura nominal da ranhura no peneiro de barras	Massa que passa pelo peneiro de barras	F_i
(mm)	R_i (g)	(mm)	m_i (g)	$=(m_i/R_i) \times 100$ (%)
63/80		40		#DIV/0!
50/63		31,5		#DIV/0!
40/50		25		#DIV/0!
31,5/40		20		#DIV/0!
25/31,5		16		#DIV/0!
20/25		12,5		#DIV/0!
16/20		10		#DIV/0!
12,5/16	108,8	8	6,1	5,606617647
10/12,5	352,3	6,3	22,9	6,500141924
8/10	444,2	5	30	6,753714543
6,3/8	579,1	4	39,9	6,890001727
5/6,3	220,2	3,15	15,2	6,902815622
4/5	235,8	2,5	9,2	3,901611535

M_r - Somatório de R_i	(g)	1940,4
M_p - Somatório de m_i	(g)	123,3
F_i - Índice de achatamento $=(M_p/M_r) \times 100$	(%)	6
Verificação - $100 \times [(M_0 - (\sum R_i + (\sum \text{Massas rejeitadas})) / M_0] < 1\%$	(%)	0,019724839

Observações:

Ensaio realizado por: _____

Índice de achatamento

Norma de referência: **NP EN 933-3 - Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 3: Determinação da forma das partículas. Índice de achatamento**

Boletim nº **T102/14**

Data de ensaio: **12-03-2014**

Requerente: _____

Obra: _____

Referência da amostra: **Godo Grande**

M_0 - Massa do provete	(g)	7183,2
Massa retida no peneiro de 80mm	(g)	
Massa que passa no peneiro de 4mm	(g)	24,1
Soma das massas rejeitadas	(g)	24,1

Peneiração em peneiros de ensaio		Peneiração em peneiros de barras		
Fracção granulométrica d/D_i	Massa da fracção granulométrica d/D_i	Largura nominal da ranhura no peneiro de barras	Massa que passa pelo peneiro de barras	F_i
(mm)	R_i (g)	(mm)	m_i (g)	$=(m_i/R_i) \times 100$ (%)
63/80		40		#DIV/0!
50/63		31,5		#DIV/0!
40/50		25		#DIV/0!
31,5/40		20		#DIV/0!
25/31,5	130,7	16	0	0
20/25	1760,9	12,5	149	8,461582145
16/20	2170,4	10	223,4	10,29303354
12,5/16	2141,5	8	238,3	11,12771422
10/12,5	589,5	6,3	52,6	8,922815946
8/10	171,4	5	18,3	10,67677946
6,3/8	115,1	4	15,9	13,81407472
5/6,3	35,3	3,15	3	8,498583569
4/5	44,3	2,5	3,3	7,449209932

M_1 - Somatório de R_i	(g)	7159,1
M_2 - Somatório de m_i	(g)	703,8
F_i - Índice de achatamento $=(M_2/M_1) \times 100$	(%)	10
Verificação - $100 \times [(M_0 - (\sum R_i + (\sum \text{Massas rejeitadas})) / M_0] < 1\%$	(%)	-1,26614E-14

Observações:

Ensaio realizado por: _____

Índice de forma

Norma de referência: **NP EN 933-4 - Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 4: Determinação da forma das partículas. Índice de forma**

Boletim nº **1102 03/14**

Data de ensaio: **18-03-2014**

Requerente: _____

Obra: _____

Referência da amostra: **Brita 4/8mm**

M₀ - Massa do provete				(g)	1467,4
Fracção granulométrica d/D _i	Massa da fracção	Percentagem de cada fracção =(M _i /M ₀)x100	Massa das partículas não cúbicas	Índice de forma =(M ₂ /M ₁)x100	
D _i ≤2d _i (mm)	M _i (g)	V _i (%)	M ₂ (g)	SI' (%)	
4/5,6	639	43,54640861	28,3	4	
5,6/8	411,1	28,01553769	34	8	
8/11,2	31,1	2,119394848	5,3	17	
11,2/16		0		#DIV/0!	
16/22,4		0		#DIV/0!	
22,4/31,5		0		#DIV/0!	
31,5/45		0		#DIV/0!	
45/63		0		#DIV/0!	
SI Índice de forma				(%)	6,252312246

Observações:

Ensaio realizado por: _____

Índice de forma

Norma de referência: **NP EN 933-4 - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 4: Determinação da forma das partículas. Índice de forma**

Boletim nº **02 14**

Data de ensaio: **12-03-2014**

Requerente: _____

Obra: _____

Referência da amostra: **Brita 6/14**

M₀ - Massa do provete (g) **2760,8**

Fracção granulométrica d/D _i	Massa da fracção	Percentagem de cada fracção =(M _i /M ₀)x100	Massa das partículas não cúbicas	Índice de forma =(M ₂ /M ₁)x100
D _i ≤2d _i (mm)	M _i (g)	V _i (%)	M ₂ (g)	SI' (%)
4/5,6	53,5	1,937844103	0	0
5,6/8	366,9	13,2896262	127,6	35
8/11,2	1386,7	50,22819473	240,5	17
11,2/16	953,7	34,54433498	38,9	4
16/22,4		0		#DIV/0!
22,4/31,5		0		#DIV/0!
31,5/45		0		#DIV/0!
45/63		0		#DIV/0!

SI Índice de forma (%) **14,74210374**

Observações:

Ensaio realizado por: _____

Índice de forma

Norma de referência: **NP EN 933-4 - Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 4: Determinação da forma das partículas. Índice de forma**

Boletim nº **1102 e 03/14**

Data de ensaio: _____

Requerente: _____

Obra: _____

Referência da amostra: **Brita 14/20**

M₀ - Massa do provete (g) **4280,7**

Fracção granulométrica d/D _i	Massa da fracção	Percentagem de cada fracção =(M _i /M ₀)x100	Massa das partículas não cúbicas	Índice de forma =(M ₂ /M ₁)x100
D _i ≤2d _i (mm)	M _i (g)	V _i (%)	M ₂ (g)	SI' (%)
4/5,6	12,6	0,294344383		0
5,6/8	78,1	1,824467961		0
8/11,2	44,1	1,03020534		0
11,2/16	1857,4	43,39009975	140,2	8
16/22,4	2283	53,33239891	36,6	2
22,4/31,5	28,7	0,670451094	0	0
31,5/45		0		#DIV/0!
45/63		0		#DIV/0!

SI Índice de forma (%) **4,107902135**

Observações:

Ensaio realizado por: _____

Índice de forma

Norma de referência: **NP EN 933-4 - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 4: Determinação da forma das partículas. Índice de forma**

Boletim nº **fev-14**

Data de ensaio: **12-03-2014**

Requerente: _____

Obra: _____

Referência da amostra: **Godó Pequeno**

M₀ - Massa do provete (g) **1940,8**

Fracção granulométrica d/D _i	Massa da fracção	Percentagem de cada fracção = (M _i /M ₀)x100	Massa das partículas não cúbicas	Índice de forma = (M ₂ /M ₁)x100
D _i ≤ 2d _i (mm)	M _i (g)	V _i (%)	M ₂ (g)	SI' (%)
4/5,6	235,8	12,14962902	29,5	13
5,6/8	799,5	41,19435284	66,3	8
8/11,2	629	32,40931575	51,8	8
11,2/16	275,9	14,2157873	10,6	4
16/22,4		0		#DIV/0!
22,4/31,5		0		#DIV/0!
31,5/45		0		#DIV/0!
45/63		0		#DIV/0!

SI Índice de forma (%) **8,153798577**

Observações:

Ensaio realizado por: _____

Índice de forma

Norma de referência: **NP EN 933-4 - Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 4: Determinação da forma das partículas. Índice de forma**

Boletim nº **fev-14**

Data de ensaio: **12-03-2014**

Requerente: _____

Obra: _____

Referência da amostra: **Godo Grande**

M₀ - Massa do provete (g) **7167**

Fracção granulométrica d/D _i	Massa da fracção	Percentagem de cada fracção $= (M_i/M_0) \times 100$	Massa das partículas não cúbicas	Índice de forma $= (M_2/M_1) \times 100$
D _i ≤ 2d _i (mm)	M _i (g)	V _i (%)	M ₂ (g)	SI' (%)
4/5,6	36,8	0,51346449	10,5	29
5,6/8	150,2	2,095716478	28,8	19
8/11,2	382,9	5,342542207	67,1	18
11,2/16	2519,4	35,15278359	207,9	8
16/22,4	3134,4	43,73377982	209	7
22,4/31,5	796,6	11,11483187	59,6	7
31,5/45	130,8	1,825031394	0	0
45/63		0		#DIV/0!

SI Índice de forma (%) **8,151193523**

Observações: _____

Ensaio realizado por: _____

