

ADERÊNCIA ENTRE VARÕES DE AÇO INOX E BETÃO COM BAIXA DOSAGEM DE LIGANTE

Emanuel Rocha Freitas

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores

Professor Doutor Eduardo Nuno Brito Santos Júlio

Doutor Manuel José de Andrade Loureiro Pipa

Júri

Presidente: Professor Luís Manuel Coelho Guerreiro

Orientador: Doutor Manuel José de Andrade Loureiro Pipa

Vogal: Doutora Ana Sofia Miranda da Silva Louro

Vogal: Professor Doutor José Manuel Matos Noronha da Câmara

Outubro de 2016

Agradecimentos

Começo por agradecer de forma geral a todas as pessoas envolvidas neste trabalho de investigação, contribuindo assim para a superação de todos os obstáculos encontrados e no aconselhamento na hora de efetuar algumas decisões.

Ao Professor Doutor Eduardo Nuno Brito Santos Júlio, orientador científico desta dissertação, e ao Doutor Manuel José de Andrade Loureiro Pipa, co-orientador científico desta dissertação, expresso o meu sincero e profundo agradecimento pela disponibilidade, ensinamentos e incentivo ao longo destes meses de trabalho.

Ao Professor Doutor Hugo Sérgio Sousa Costa que prontamente acreditou neste tipo de misturas, partilhou todo o conhecimento científico relativamente à formulação de misturas de betão e pela disponibilidade em desenvolver a parte experimental em Coimbra.

Ao técnico de laboratório do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, António Amaral, pela ajuda e disponibilidade na realização das amassaduras e ensaios para caracterização das diferentes misturas.

Ao Instituto Superior Engenharia de Coimbra pelo fornecimento de todos os materiais necessários à realização das misturas de betão das diferentes fases da campanha experimental.

À Doutora Ana Sofia Miranda da Silva Louro reservo uma enorme gratidão por tudo o que partilhou comigo, pela sua experiência, disponibilidade, dedicação e persistência desde a primeira reunião até à análise de resultados. O seu contributo foi imprescindível para que toda a campanha laboratorial efetuada no LNEC fosse rigorosa e fornecesse resultados credíveis.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil a oportunidade e disponibilidade dos meios e dos materiais para realização das misturas de betão e dos ensaios de caracterização das mesmas e dos ensaios de aderência.

Ao Doutor António Bettencourt Ribeiro agradeço o contributo relativamente à utilização de um betão de referência, com consistência e propriedades de um betão comum, por forma a melhor comparar os resultados obtidos e à disponibilidade em realizar as amassaduras e ensaios ao betão no Núcleo de Betões, Pedras e Cerâmicos.

Ao Núcleo de Betões, Pedras e Cerâmicos, nomeadamente aos técnicos João Balsinha, Vítor Campos, Gil Rosa e Hugo Soares, pela experiência e disponibilidade na realização de todas as amassaduras de betão e ensaios de caracterização das mesmas.

À Doutora Helena Cruz agradeço a disponibilidade para fazer uso de todos os recursos presentes no Núcleo de Comportamento de Estruturas.

Ao Núcleo de Comportamento de Estruturas, nomeadamente aos técnicos e engenheiros José Louro, Joaquim Pereira, Paulo Marques, Manuel Alves, Paulo Santos e Rui Alvarez, pela forma como me

receberam e pela dedicação que demonstraram para que o trabalho experimental fosse efetuado como planejado.

Agradeço à Andreia Felizardo todo o amor, paciência e incentivo nos momentos mais difíceis.

Agradeço a todos os colegas que se cruzaram comigo ao longo dos anos de curso, a sua amizade e a partilha de bons momentos.

O meu mais profundo agradecimento destina-se aos meus pais, que sempre apoiaram as minhas decisões ao longo do percurso académico e que sem eles nada disto seria possível.

Resumo

No sentido de contribuir para a sustentabilidade do sector da construção, é importante procurar reduzir a quantidade de cimento Portland nas misturas de betão corrente, assegurando porém o desenvolvimento da resistência à compressão necessária, originando o aqui denominado “betão com baixa dosagem de ligante” (LBC – *low binder concrete*).

Dado que, hoje em dia, para a maioria das estruturas de betão, o propósito atrás referido é alcançável, até mesmo considerando quantidades abaixo do mínimo regulamentar, importa validar as expressões de cálculo dos regulamentos para estas novas misturas “extremas”. Uma das primeiras expressões que importa analisar é a referente ao cálculo da tensão de aderência varão-LBC, atendendo a que está na base do comportamento das estruturas de betão armado, sendo este o principal objetivo do estudo aqui apresentado.

Numa primeira fase, foram desenvolvidas e caracterizadas diferentes misturas de LBC. Posteriormente, duas dessas misturas foram selecionadas para se realizar o estudo da aderência entre varões de aço inoxidável e LBC. Realizaram-se 60 ensaios de arrancamento (*pull-out*), com provetes preparados de acordo com o previsto no Anexo D da EN 10080:2005. Como referência utilizou-se um betão de classe C25/30 e varões de aço do tipo A500NR SD com 12 e 16 mm de diâmetro.

Conclui-se que as misturas LBC estudadas apresentam resistências superiores às previstas pela Expressão de Feret, Eurocódigo 2 (2010) e Model Code 2010. Relativamente à caracterização da aderência dos varões aço inoxidável e LBC, verificou-se que o seu valor é superior ao esperado e que a compacidade tem influência nos resultados.

Palavras-chave

Sustentabilidade, betão com baixa dosagem de ligante, aderência varão-betão, varões de aço inoxidável

Abstract

To contribute to the sustainability of the construction sector, it is mandatory to reduce the Portland cement content in current concrete mixtures, although ensuring the design compressive strength, giving rise to the herein called 'low binder concrete' (LBC).

Given that, nowadays, for most concrete structures, the mentioned goal is reachable, even considering dosages below the minimum prescribed in codes, focus should be directed to check the validity of codes' design expressions for these 'extreme' mixtures. One of the expressions that need to be analysed first refers to the rebar-to-LBC bond strength, since this stands as the main pillar of the reinforced concrete concept, and for this reason it was settled as the main goal of the study herein presented.

First, different LBC mixtures were developed and characterized. Next, two of these mixtures were adopted to study the bond characteristics between stainless steel rebars and LBC. The bonding characterization was assessed by means of 60 pull-out tests using specimens prepared according to Annex D of EN 10080:2005. The reference specimens were produced with C25/30 concrete and S500NR SD steel rebars with 12 and 16 mm diameter.

It was concluded that the developed LBC mixtures present higher strengths than those predicted by the Feret expression, Eurocode 2 (2010) or Model Code 2010. Regarding the characterization of bonding between stainless steel rebars and this type of mixtures, it was observed that these present higher values than expected and packing density influences the results.

Key-words

Sustainability, low binder concrete, rebar-concrete bond, stainless steel rebars

ÍNDICE

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Âmbito e objetivos	1
1.3. Organização da dissertação.....	1
2. Betão com baixa dosagem de ligante	3
2.1. Motivação	3
2.2. Composição da mistura.....	3
2.2.1. Compacidade	3
2.2.2. Arranjo das partículas	5
2.2.2.1. Curvas de Otimização	5
2.2.3. Volume de Água	6
2.2.4. Superplastificantes	7
2.3. Propriedades do Betão	8
2.3.1. Trabalhabilidade	9
2.3.2. Resistência à compressão	9
2.3.3. Resistência à tração	11
2.3.4. Módulo Elasticidade	12
2.4. Considerações finais	12
3. Aderência: Estado da arte	13
3.1. Introdução	13
3.2. Modelos de aderência	14
3.3. Tipos de ensaio	16
3.4. Parâmetros que afetam a aderência varão-betão	17
3.4.1. Influência da velocidade	17
3.4.2. Influência do diâmetro	18
3.4.3. Influência das características do perfil nervurado	18
3.4.4. Influência da resistência do betão.....	19
3.4.5. Influência da corrosão	20
3.4.6. Influência da superfície do varão	21
3.4.7. Influência do recobrimento no tipo de rotura	21
3.5. Considerações finais.....	22
4. Caracterização experimental de misturas LBC	23
4.1. Objetivos.....	23
4.2. Materiais utilizados	23
4.2.1. Caracterização dos agregados	23
4.2.1.1. Curvas granulométricas	23

4.2.1.2.	Dimensão máxima do agregado	24
4.2.1.3.	Módulo de finura.....	25
4.2.1.4.	Massa volúmica.....	25
4.2.2.	Caracterização do ligante	26
4.2.3.	Caracterização do adjuvante	26
4.3.	Formulação das misturas	26
4.3.1.	Curvas de otimização	26
4.3.2.	Superplastificante.....	29
4.3.3.	Volume de água.....	29
4.3.4.	Composição das misturas.....	29
4.4.	Ensaio realizados.....	30
4.4.1.	Ensaio do betão no estado fresco.....	30
4.4.1.1.	Abaixamento do Cone de Abrams	31
4.4.1.2.	Grau de compactabilidade	31
4.4.1.3.	Massa volúmica.....	31
4.4.1.4.	Determinação do teor de ar.....	32
4.4.2.	Ensaio de betão no estado endurecido	32
4.4.2.1.	Resistência à compressão	32
4.4.2.2.	Resistência à tração por compressão diametral	33
4.4.2.3.	Módulo de elasticidade.....	34
4.5.	Apresentação e análise dos resultados experimentais obtidos.....	34
4.5.1.	Resultados da primeira fase experimental	34
4.5.1.1.	Resultados do estudo do betão no estado fresco.....	35
4.5.1.1.1.	Abaixamento do Cone de Abrams	35
4.5.1.1.2.	Massa volúmica.....	35
4.5.1.1.3.	Determinação do teor de ar.....	35
4.5.1.2.	Resultados do betão no estado endurecido.....	35
4.5.1.2.1.	Resistência à compressão	35
4.5.1.3.	Consequências para a segunda fase experimental.....	36
4.5.2.	Resultados da segunda fase experimental.....	37
4.5.2.1.	Resultados do betão no estado fresco.....	37
4.5.2.1.1.	Abaixamento do cone de Abrams	37
4.5.2.1.2.	Ensaio de compactabilidade	37
4.5.2.1.3.	Massa volúmica.....	38
4.5.2.1.4.	Teor de ar	38
4.5.2.2.	Resultados do betão no estado endurecido.....	38
4.5.2.2.1.	Resistência à compressão	38
4.5.2.2.2.	Resistência à tração por compressão diametral	41
4.5.2.2.3.	Módulo de elasticidade.....	41
4.6.	Considerações finais.....	42

5. Caracterização da aderência.....	43
5.1. Programa experimental para caracterização da aderência	43
5.1.1. Variáveis a ensaiar.....	43
5.1.2. Tipo de ensaio adotado	43
5.1.3. Sistema de ensaio.....	45
5.1.3.1. Máquina hidráulica servo-controlada	46
5.1.3.2. Acessório para instalação dos provetes	46
5.1.3.3. Sistema de medição.....	47
5.1.3.4. Velocidade de ensaio	48
5.1.4. Produção dos provetes	48
5.1.5. Fabrico dos provetes	51
5.2. Caracterização dos materiais adotados	52
5.2.1. Misturas de Betão	52
5.2.2. Varões.....	52
5.2.3. Ensaio de caracterização dos materiais envolvidos	53
5.2.3.1. Misturas de betão	53
5.2.3.2. Varões nervurados de aço	54
5.2.3.2.1. Medição das nervuras	54
5.2.3.2.2. Ensaio de tração.....	55
5.2.4. Equipamento utilizado.....	56
5.2.4.1. Ensaio de compressão do betão.....	56
5.2.4.2. Ensaio de tração dos varões nervurados.....	56
5.2.5. Apresentação e análise dos resultados de caracterização dos materiais.....	56
5.2.5.1. Misturas de betão	56
5.2.5.1.1. Estado fresco.....	57
5.2.5.1.2. Resistência à compressão	58
5.2.5.2. Varões	61
5.2.5.2.1. Medição das Nervuras	61
5.2.5.2.2. Caracterização mecânica dos varões	62
5.3. Apresentação e análise dos resultados experimentais dos ensaios de aderência.....	62
5.3.1. Caracterização da aderência varão-betão.....	62
5.3.2. Influência do diâmetro.....	68
5.3.3. Influência da área relativa das nervuras transversais	69
5.3.4. Influência da resistência à compressão do betão.....	70
5.3.5. Influência da compacidade da mistura	71
5.3.6. Comparação dos resultados com Louro (2008)	72
5.3.7. Comparação dos resultados com a norma Model Code 2010	73
5.4. Considerações finais.....	76
6. Conclusões	77

6.1.	Betão com baixa dosagem de ligante.....	77
6.2.	Aderência varão de inox - LBC.....	77
6.3.	Perspetivas futuras.....	78

Bibliografia.....	81
--------------------------	-----------

ANEXOS

A1. Composição das misturas de Fennis (2011).....	A1
--	-----------

A2. Resultados individuais misturas de betão.....	A3
--	-----------

A2.1. Primeira e segunda fases experimentais.....	A3
--	-----------

A2.1.1. Ensaio de compressão	A3
------------------------------------	----

A2.1.1.1. Força de compressão (kN)	A3
--	----

A2.1.1.2. Resistência à compressão (MPa).....	A3
---	----

A2.1.1.3. Massa dos provetes (g)	A4
--	----

A2.1.2. Tração	A4
----------------------	----

A2.1.2.1. Força de compressão (kN)	A4
--	----

A2.1.2.2. Tensão de tração (MPa)	A4
--	----

A2.2. Terceira fase experimental	A5
---	-----------

A2.2.1. Ensaio de compressão	A5
------------------------------------	----

A2.2.1.1. Força de compressão (kN)	A5
--	----

A2.2.1.2. Resistência à compressão (MPa).....	A5
---	----

A2.2.1.3. Massa dos provetes (g)	A6
--	----

A3. Mapa identificação dos provetes de arrancamento	A7
--	-----------

A4. Calendarização dos ensaios.....	A9
--	-----------

A5. Resultados individuais dos ensaios de arrancamento.....	A11
--	------------

A5.1. Resultados do ensaio em força [kN] e observações durante a realização do ensaio.....	A11
---	------------

A5.1.1. Mistura C250.....	A11
---------------------------	-----

A5.1.2. Mistura LBC125	A12
------------------------------	-----

A5.1.3. Mistura LBC75	A13
-----------------------------	-----

A5.2. Análise estatística.....	A14
---------------------------------------	------------

A5.2.1. Análise estatística com Outliers para a mistura C250.....	A14
---	-----

A5.2.2. Análise estatística com Outliers para a mistura LBC125.....	A15
---	-----

A5.2.1. Análise estatística com Outliers para a mistura LBC75.....	A16
--	-----

Lista de quadros

Tabela 3.1 – Valores limites da relação recobrimento/diâmetro no tipo de rotura, adaptado de Gavilán <i>et al.</i> (2014)	22
Tabela 4.1 – Composição do ligante para as misturas estudadas	23
Tabela 4.2 – Percentagem de massa passada nos peneiros para cada agregado utilizado	24
Tabela 4.3 – Módulo de finura dos agregados utilizados nas misturas de betão	25
Tabela 4.4 – Massa volúmica absoluta dos agregados utilizados nas misturas de betão	25
Tabela 4.5 - Massa volúmica dos constituintes do ligante	26
Tabela 4.6 – Composição dos agregados para as curvas de Faury e de Funk e Dinger (1980)	28
Tabela 4.7 – Quadro resumo da curva granulométrica real.....	29
Tabela 4.8 – Composição das misturas estudadas em ambas as fases experimentais	30
Tabela 4.9 - Resistência à compressão das misturas RC250_v1 e LBC125_v1	36
Tabela 4.10 - Comparação da resistência aos 28 dias com a previsão pela Expressão de Feret.....	36
Tabela 4.11 – Resumo do número de provetes para cada tipo de ensaio	37
Tabela 4.12 – Grau de compactabilidade das misturas RC250_v1, LBC125, LBC100 e LBC75	38
Tabela 4.13 - Massa volúmica das misturas RC250_v2, LBC125, LBC100, LBC75 e LBC125_V2	38
Tabela 4.14 - Propriedades médias para as misturas RC250_v2, LBC125, LBC100 e LBC75	39
Tabela 4.15 - Quantidade de cimento equivalente pelo fator-k	40
Tabela 4.16 - Comparação dos resultados experimentais com a previsão pela Expressão de Feret..	40
Tabela 4.17 - Comparação da resistência média à compressão aos 28 dias com e sem cura	40
Tabela 4.18 - Resistência à tração por compressão diametral para RC250_v2, LBC125, LBC100 e LBC75.....	41
Tabela 4.19 - Módulo de elasticidade para as misturas RC250_v2, LBC125, LBC100 e LBC75	41
Tabela 5.1 – Número de provetes e volume de betão envolvido.....	51
Tabela 5.2 – Características da mistura de referência C250, adaptado de Alves (2016)	52
Tabela 5.3 – Tipo de aço utilizado por diâmetro para caracterizar a aderência	53
Tabela 5.4 – Número de provetes a ensaiar por cada diâmetro e tipo de aço	54
Tabela 5.5 – Resultados obtidos para as características do betão em estado fresco	57
Tabela 5.6 – Resistência à compressão média para cada idade e para cada amassadura	58
Tabela 5.7 – Tabela de cálculo do coeficiente s e erro quadrático para a mistura C250.....	59
Tabela 5.8 – Tabela de cálculo do coeficiente s e erro quadrático para a mistura LBC125	59
Tabela 5.9 - Tabela de cálculo do coeficiente s e erro quadrático para a mistura LBC75	60
Tabela 5.10 – Características geométricas das nervuras dos varões em estudo	61
Tabela 5.11 – Valores de referência para área relativa de nervuras transversais	62
Tabela 5.12 – Características mecânicas dos varões em estudo	62
Tabela 5.13 – Valores médios da tensão média e máxima de aderência após análise estatística.....	64
Tabela 5.14 – Resultados da tensão de aderência para o provete LBC125_A16_3.....	66
Tabela 5.15 – Parâmetros para definição da relação tensão de aderência – deslizamento propostos pelo Model Code 2010	73
Tabela 5.16 – Valores dos parâmetros utilizados em cada mistura e diâmetro	74

Tabela 5.17 – Comparação da tensão de aderência máxima proposta pelo Model Code 2010 e os valores médios de tensão máxima obtidos experimentalmente	74
Tabela 5.18 – Comparação da tensão de aderência máxima através da equação (5.12) e os valores médios obtidos experimentalmente.....	76

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Curvas granulométricas dos diferentes tipos de pó de quartzo comparando com a curva do cimento CEM I 42,5N, adaptado de Fennis <i>et al.</i> (2009)	4
Figura 2.2 – Curvas de otimização para um diâmetro máximo de 32 mm e mínimo de 63 μ m, adaptado de Fennis e Walraven (2012)	6
Figura 2.3 – Comparação do volume de água necessária em função da compactidade e da trabalhabilidade, adaptado de Fennis <i>et al.</i> (2012c)	7
Figura 2.4 - Resistência à compressão com e sem uso de superplastificante e com e sem correção da água (Coutinho 1988)	8
Figura 2.5 - Previsão da resistência à compressão segundo a Expressão de Feret, adaptado de Fennis <i>et al.</i> (2012b)	10
Figura 2.6 - Volume ocupado por uma estrutura de cimento (C) estável com fíler grosso, F, à esquerda comparado com fíler fino à direita (Fennis e Walraven, 2012)	10
Figura 2.7 - Resistência média à compressão em provetes cúbicos para diferentes misturas, adaptado de Fennis (2011)	11
Figura 2.8 - Correlação entre a resistência média à compressão e a resistência à tração, adaptado de Fennis (2011)	12
Figura 3.1 – Condições de aderência Eurocódigo 2 (2010)	13
Figura 3.2 – Curvas esquemáticas tensão de aderência – escorregamento de Leonhardt e Mönning (1977), citados por Louro (2011)	14
Figura 3.3 – Esquema da tensão de aderência para as diferentes fases, adaptado de <i>fib</i> bulletin 10 (2000)	16
Figura 3.4 – Características gerais do ensaio de viga de Rilem (1983), adaptado de Lúcio e Marreiros (2005)	17
Figura 3.5 – Influência da velocidade de ensaio, adaptado de Eligehausen <i>et al.</i> (1983), citado por Louro (2014)	17
Figura 3.6 – Relação entre altura das nervuras relativa e tensão de aderência relativa, adaptado de Lorrain <i>et al.</i> (2010)	19
Figura 3.7 – Influência da corrosão na tensão de aderência residual, adaptado de Cairns <i>et al.</i> (2007)	20
Figura 4.1 – Curvas granulométricas dos agregados utilizados nas misturas de betão	24
Figura 4.2 - Sobreposição das curvas granulométricas de Faury e de Funk e Dinger (1980)	27
Figura 4.3 - Aproximação da curva real à de referência	28
Figura 4.4 - Abaixamento verdadeiro (à esquerda) e abaixamento deformado (à direita) (NP EN 12350-2:2002)	31
Figura 4.5 – Esquema de ensaio segundo a NP EN 12390-6:2011 (à esquerda) e provete em ensaio (à direita)	33
Figura 4.6 – Ilustração do abaixamento deformado do cone de Abram's	35

Figura 4.7 - Desenvolvimento da resistência à compressão das misturas RC250_v1, RC250_v2, LBC125_v1, LBC125, LBC100 e LBC75.....	39
Figura 4.8 – Comparação dos valores do módulo de elasticidade obtidos com os teóricos	42
Figura 5.1 – Esquema do ensaio de arrancamento (EN10080:2005 – Anexo D).....	44
Figura 5.2 – Características gerais dos provetes com varões Ø12 mm (corte z-z).....	45
Figura 5.3 – Características gerais dos provetes com varões Ø16 mm (corte z-z).....	45
Figura 5.4 – Aspeto geral do sistema de ensaio de arrancamento	46
Figura 5.5 – Marcação da correta posição dos provetes na chapa inferior do acessório (à esquerda) e verificação da horizontalidade da chapa superior do acessório (à direita)	47
Figura 5.6 – Sistema de suporte do equipamento de medição.....	48
Figura 5.7 – Molde preparado para a betonagem de dois provetes	49
Figura 5.8 – Comprimento aderente Ø12 (em cima) e Ø16 (em baixo)	49
Figura 5.9 – Esquema do molde (em cima) e pormenorização de todos os elementos usados na preparação do provete de arrancamento (em baixo).....	50
Figura 5.10 – Mesa vibratória usada para fornecer energia de compactação suficiente (à esquerda) e primeira etapa de enchimento dos moldes (à direita)	51
Figura 5.11 – Representação dos varões de aço inoxidável Ø12 (em cima) e Ø16 (em baixo)	53
Figura 5.12 – Representação dos varões de aço A500 NR SD Ø12 (em cima) e Ø16 (em baixo).....	53
Figura 5.13 – Máquina para medição automática das nervuras.....	54
Figura 5.14 – Marcação da amostra com espaçamento de 10 mm.....	55
Figura 5.15 – Medição da extensão permanente na força máxima.....	55
Figura 5.16 – Vibração do betão com recurso a mesa e agulha vibratória	56
Figura 5.17 – Medição do abaixamento do cone de Abrams da 1ª amassadura da mistura C250.....	57
Figura 5.18 – Curvas de endurecimento para a mistura C250	59
Figura 5.19 – Curva de endurecimento para a mistura LBC125.....	60
Figura 5.20 – Curvas de endurecimentos para a mistura LBC75.....	61
Figura 5.21 – Exemplo do tratamento estatístico efectuado para a série C250_A12 através de limites de controlo: a) tensão de aderência média; b) tensão de aderência máxima	64
Figura 5.22 – Resultados experimentais tratados para a mistura C250 com varões a) Ø12 A500 NR SD; b) Ø12 AISI304; c) Ø16 A500 NR SD; d) Ø16 AISI316	65
Figura 5.23 - Resultados experimentais tratados para a mistura LBC125 com varões a) Ø12 A500 NR SD; b) Ø12 AISI304; c) Ø16 A500 NR SD; d) Ø16 AISI316	65
Figura 5.24 - Resultados experimentais tratados para a mistura LBC75 com varões a) Ø12 A500 NR SD; b) Ø12 AISI304; c) Ø16 A500 NR SD; d) Ø16 AISI316	66
Figura 5.25 – Andamento da curva experimental da tensão de aderência para o provete LBC125_A16_3 (em cima) e marcação das fissuras no provete (em baixo)	67
Figura 5.26 – Zona interior do provete LBC125_A16_3	67
Figura 5.27 - Representação dos valores máximos, mínimos e média da tensão de aderência máxima para todos os tipos de varão: a) varões Ø12 de A500 NR SD; b) varões Ø12 de AISI304; c) varões Ø16 de A500 NR SD; d) varões Ø16 de AISI316	68

Figura 5.28 – Representação do tipo de mistura, tipo de aço e diâmetro	68
Figura 5.29 – Influência do diâmetro (\emptyset) na tensão máxima de aderência ($\tau_{d,m\acute{a}x}$): a) para a mistura C250; b) para a mistura LBC125; c) para a mistura LBC75	69
Figura 5.30 - Influência da área relativa das nervuras transversais (f_R) na tensão máxima de aderência ($\tau_{d,m\acute{a}x}$): a) Mistura C250 e $\emptyset 12$; b) Mistura C250 e $\emptyset 16$; c) Mistura LBC125 e $\emptyset 12$; d) Mistura LBC125 e $\emptyset 16$; e) Mistura LBC75 e $\emptyset 12$; f) Mistura LBC75 e $\emptyset 16$	70
Figura 5.31 – Influência da resistência à compressão do betão (f_{cm}) na tensão máxima de aderência ($\tau_{d,m\acute{a}x}$)	71
Figura 5.32 – Influência da compactidade das misturas na tensão máxima de aderência ($\tau_{d,m\acute{a}x}$): a) varões $\emptyset 12$ de A500 NR SD; b) varões $\emptyset 12$ de AISI304; c) varões $\emptyset 16$ de A500 NR SD; d) varões $\emptyset 16$ de AISI316	72
Figura 5.33 – Previsão da tensão de aderência máxima, para os varões i16 e para compactidades 0,81 e 0,86.....	73
Figura 5.34 - Comparação entre os resultados experimentais, os propostos pelo Model Code 2010 e pela equação (5.12): a) Mistura C250 e $\emptyset 12$ mm; b) Mistura C250 e $\emptyset 16$ mm; c) Mistura LBC125 e $\emptyset 12$ mm; d) Mistura LBC125 e $\emptyset 16$ mm; e) Mistura LBC75 e $\emptyset 12$ mm; f) Mistura LBC75 e $\emptyset 16$ mm....	75

Lista de abreviaturas e símbolos

SIGLAS

C250	Mistura de referência, com 250 kg/m ³ de betão de CEM I 52,5 R e 100 kg/m ³ de betão de fíler calcário
EN	Norma Europeia
ISEC	Instituto Superior Engenharia de Coimbra
LBC	Betão baixa dosagem de ligante
LBC100	Mistura com 100 kg/m ³ de betão de CEM I 52,5 R, 100 kg/m ³ de betão de fíler calcário e 50 kg/m ³ de betão de cinzas volantes
LBC125	Mistura com 125 kg/m ³ de betão de CEM I 52,5 R e 125 kg/m ³ de betão de fíler calcário
LBC75	Mistura com 75 kg/m ³ de betão de CEM I 52,5 R, 75 kg/m ³ de betão de fíler calcário e 100 kg/m ³ de betão de cinzas volantes
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NP	Norma Portuguesa
RC250	Mistura com 250 kg/m ³ de betão de CEM I 52,5 R

MAIÚSCULAS LATINAS

A	Tipo de agregado na definição da curva de Faury
A _c	Área da secção transversal do provete na qual a força é aplicada
A _g	Extensão permanente na força máxima
A _{gt}	Extensão total na força máxima
B	Trabalhabilidade desejada na definição da curva de Faury
C	Quantidade de cimento
C _{eq}	Valor da quantidade de cimento equivalente
D	Massa volúmica do betão fresco de acordo com a NP EN 12350-6 (2002)
E _{c0} × α _E	Coefficiente para ter em consideração a origem do agregado
E _{ci}	Módulo de elasticidade tangente do betão, pelo Model Code 2010
E _{cm}	Módulo de elasticidade secante do betão, pelo Eurocódigo 2 (2010)
F	Força máxima de compressão aplicada aos provetes
F _a	Força máxima de tracção nos ensaios de arrancamento
I _v	Índice de vazios
L	Comprimento da geratriz do provete
MF	Módulo de finura
P	Força concentrada
P(d)	Percentagem de material passado no peneiro
P'(d)	Percentagem corrigida de material passado no peneiro
R	Raio médio do molde
R _m	Tensão de rotura à tração da armadura
V	Volume do recipiente
V _a	Volume de vazios
V _c	Volume de cimento
V _s	Volume das adições

V_{sp}	Volume de superplastificante
V_w	Volume de água
X	Percentagem de material retido no peneiro com malha igual a metade da dimensão máxima do agregado

MINÚSCULAS LATINAS

$a_{1/2}$	Altura das nervuras transversais a $\frac{1}{2}$ do seu comprimento
$a_{1/4}$	Altura das nervuras transversais a $\frac{1}{4}$ do seu comprimento
$a_{3/4}$	Altura das nervuras transversais a $\frac{3}{4}$ do seu comprimento
c	Grau de compactabilidade
C_{nom}	Recobrimento do betão
C_{ivre}	Afastamento das nervuras transversais
$C_{ivre,méd}$	Afastamento médio das nervuras transversais
d	Dimensão da partícula
d_1	Dimensão do primeiro peneiro onde fica retido material
d_2	Dimensão do peneiro seguinte a d_1
$d_{máx}$	Dimensão máxima das partículas
$d_{mín}$	Dimensão mínima das partículas
f_{bd}	Valor de cálculo da tensão de rotura da aderência
f_c	Resistência do betão à compressão pela Expressão de Feret
f_{ck}	Valor característico da resistência do betão à compressão aos 28 dias
f_{cm}	Valor médio da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias
$f_{cm}(t)$	Andamento da curva de resistência do betão à compressão pelo Eurocódigo 2 (2010)
f_{ct}	Resistência à tração do betão
f_{ctm}	Valor médio da resistência à tração do betão
f_j	Resistência à compressão do betão à data do ensaio
f_R	Área relativa das nervuras transversais
$f_{R,média}$	Área relativa média das nervuras transversais
f_y	Tensão de cedência da armadura
h	Abaixamento no ensaio Cone de Abrams
h_1	Altura interior do recipiente
k	Coefficiente para o cálculo de C_{eq}
k_{28}	Coefficiente da Expressão de Feret que depende da classe de resistência do cimento
k_{fR}	Fator corretivo em função da área relativa das nervuras transversais do varão
k_G	Fator corretivo em função da compacidade da mistura de betão
m_1	Massa do recipiente
m_2	Massa do recipiente mais betão fresco
p_{c+s}	Percentagem de ligante na definição da curva de Faury
$p_{dmáx/2}$	Percentagem de material passado no peneiro com malha igual a metade da dimensão máxima do agregado
q	Parâmetro de ajuste das curvas de otimização
s	Coefficiente de ajuste curva da resistência à compressão do betão, pelo Eurocódigo 2 (2010)

s_c	Valor médio entre a superfície do betão compactado e o bordo superior do recipiente
s_i	Deslizamento
s_1	Deslizamento correspondente ao início do patamar onde a tensão de aderência é máxima no modelo do Model Code 2010
s_2	Deslizamento correspondente ao fim do patamar onde a tensão de aderência é máxima no modelo do Model Code 2010
s_3	Deslizamento correspondente à tensão de atrito no modelo do Model Code 2010
v_p	Velocidade do ensaio de arrancamento, pela EN 10080:2005
x	Percentagem de partículas retidas em d_1
y	Percentagem de partículas retidas em d_2

MAIÚSCULAS GREGAS

$\sum e_i$	Perímetro sem nervuras transversais
$\sum \Delta^2(d)$	Somatório do quadrado da diferença
Δ	Diferença
$\Delta^2(d)$	Quadrado da diferença

MINÚSCULAS GREGAS

\emptyset	Diâmetro
σ	Compacidade das misturas de betão
σ_j	Compacidade da mistura de betão j
β_{cc}	Coefficiente para definição da curva de resistência à compressão pelo Eurocódigo 2 (2010)
γ_{cb}	Fator de segurança para cálculo da tensão de rotura da aderência
η_i	Coefficientes para cálculo da tensão de rotura da aderência
τ	Tensão de aderência
$\tau_{0,01}$	Tensão de aderência para 0,01 mm de deslizamento
$\tau_{0,1}$	Tensão de aderência para 0,1 mm de deslizamento
$\tau_{1,0}$	Tensão de aderência para 1,0 mm de deslizamento
$\tau_{d,máx}$	Tensão de aderência máxima
$\tau_{d,média}$	Tensão média de aderência de acordo com Eurocódigo 2 (2010)
$\tau_{máx}$	Tensão de aderência máxima segundo Model Code 2010

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

A motivação para a realização do estudo descrito na presente dissertação surge da preocupação crescente em assegurar a sustentabilidade do sector da construção, o que pode ser conseguido reduzindo a quantidade de materiais com maior pegada ecológica, o que no caso do betão é o cimento Portland, mas tendo igualmente como prioridade assegurar o bom desempenho do produto final.

Estando regulamentada a quantidade mínima de cimento a adotar numa mistura de betão em função do ambiente a que a estrutura irá estar exposta, e sabendo-se que as misturas desenvolvidas no âmbito da presente dissertação têm quantidades de ligante significativamente inferiores a essa, a utilização de varões de aço inoxidável foi a opção adotada para garantir a durabilidade dos elementos estruturais.

1.2. Âmbito e objetivos

O principal objetivo definido para esta dissertação foi caracterizar a aderência entre varões de aço inoxidável e betão com baixa dosagem de ligante (LBC).

Como o conhecimento sobre LBC é ainda limitado, foi necessário iniciar os trabalhos com um estudo sobre o tema, através da formulação de diversas misturas e sua caracterização.

Tanto para as misturas de LBC, como em relação à aderência entre varão de aço inoxidável e LBC, foram considerados materiais correntes, para servirem de referência, e estudos de outros autores e expressões regulamentares, para confronto e discussão de resultados e, finalmente, para formulação de conclusões.

1.3. Organização da dissertação

A dissertação está estruturada em seis capítulos, correspondendo a diferentes etapas do trabalho de investigação realizado, começando pelo estado-da-arte dos dois grandes temas abordados, passando pelas diferentes fases experimentais e terminando com as principais conclusões do trabalho desenvolvido.

No capítulo 1 apresenta-se o enquadramento do tema, o âmbito e os objetivos do trabalho realizado, e a organização da dissertação.

O capítulo 2 inclui o resultado da pesquisa bibliográfica efetuada sobre o tema de betões com baixa dosagem de ligante, tanto a nível nacional como internacional, evidenciando as principais variáveis que condicionam este tipo de misturas e as características que é expectável apresentarem no estado endurecido.

No capítulo 3, apresenta-se o resultado de uma pesquisa bibliográfica referente ao tema da aderência entre varões de aço e betão, de igual modo evidenciando-se as principais variáveis que condicionam este parâmetro, as quais foram posteriormente alvo de estudo na parte experimental da dissertação.

O capítulo 4 descreve o estudo efetuado sobre LBC, começando pela caracterização dos materiais utilizados, passando pela descrição da formulação das misturas e do programa experimental para as duas fases e terminando com a apresentação e análise dos resultados obtidos.

O capítulo 5 foca-se na caracterização da aderência entre varões de aço inoxidável – LBC, sendo a sua organização muito semelhante à do capítulo anterior. Começa-se pela caracterização dos varões de aço utilizados no estudo da aderência e a escolha das misturas de betão, passando pela apresentação das características do equipamento e de todos os elementos necessários para efetuar os ensaios de arrancamento, descrição do programa experimental e, novamente em último lugar, a apresentação e análise dos resultados.

No capítulo 6 faz-se uma breve síntese do trabalho realizado, apresentando-se as principais conclusões relativas ao LBC e à aderência de varões de aço inoxidável a este tipo de betões. Por forma a aprofundar o trabalho efetuado, são ainda apresentadas sugestões para estudos futuros.

Por fim, incluem-se cinco anexos. Em A1 encontra-se a composição de diversas misturas estudadas por Fennis (2011), com bastante relevância para o capítulo 2.

Em A2 apresentam-se os resultados individuais das misturas de betão estudadas em todas as fases experimentais.

Nos anexos A3 e A4 encontram-se o mapa de identificação utilizado para os provetes de arrancamento e a calendarização da última fase experimental, incluindo os ensaios de compressão, tração e arrancamento, respetivamente.

Em A5 são fornecidos os resultados individuais dos ensaios de arrancamento realizados e é apresentado o estudo estatístico efetuado no tratamento dos resultados dos ensaios.

2. BETÃO COM BAIXA DOSAGEM DE LIGANTE

Neste capítulo apresenta-se o resultado de uma revisão bibliográfica sobre os aspetos mais relevantes das misturas de betão com baixa dosagem de ligante. De referir que um betão é denominado como de 'baixa dosagem de ligante (LBC)', quando a quantidade de cimento é inferior à recomendada no Anexo F da NP EN 206-1:2007, onde o valor mínimo de cimento é de 260 kg por m³ de betão.

Numa primeira parte estuda-se a influência que a composição tem na compacidade da mistura, tornando possível formular este tipo de betão (LBC), enquanto na parte final relata-se o comportamento expectável em estado fresco, como a trabalhabilidade, e em estado endurecido.

2.1. Motivação

Diversos estudos têm sido desenvolvidos para criar betões com menor impacte ambiental, originando o aparecimento de duas metodologias. Na primeira existe a substituição de parte dos agregados tradicionais por outros, como por exemplo agregados reciclados de betão ou de resíduos de outras indústrias, enquanto a segunda metodologia foca-se em diminuir a quantidade total de cimento, mas sem perder as suas características.

Com efeito, o cimento Portland é o constituinte da mistura de betão com maior pegada ecológica, porque o processo de calcinação implica a libertação de uma quantidade de CO₂ para a atmosfera equivalente (em massa) a metade da quantidade de cimento produzida, sem contabilizar as emissões da queima de combustível para se efetuar este processo Fennis (2011). Damineli *et al.* (2010) defendem que, para reduzir as emissões de CO₂, é necessário um aumento da eficiência do uso do cimento.

Costa e Appleton (2002) afirmam que ao aumentar a compacidade das composições granulométricas diminui-se o volume de vazios entre partículas e, portanto, uma menor quantidade de pasta de cimento é necessária.

A redução da dosagem de cimento na formulação das misturas de betão pode ser conseguida através da sua substituição por sub-produtos industriais, razão pela qual este tipo de betão é frequentemente denominado como 'betão ecológico'. Nesta dissertação é dado ênfase a betões deste tipo, ou seja, com uma baixa dosagem de ligante.

2.2. Composição da mistura

2.2.1. Compacidade

A compacidade está fortemente ligada à composição da mistura, dependendo em grande parte do tamanho e quantidade dos agregados utilizados. Fennis *et al.* (2009) afirmam que as partículas devem ser selecionadas para preencher os vazios entre as partículas maiores, e assim sucessivamente, de forma a aumentar a compacidade.

Para melhor estudar este efeito, Fennis *et al.* (2009) compararam o efeito da substituição de cimento por pó de quartzo de dimensões diferentes, M6, M300 e M600, na compacidade e resistência da mistura, cujas curvas granulométricas estão representadas na Figura 2.1. Concluíram que, ao adicionar o primeiro tipo de fíler, M6, houve um ligeiro aumento na compacidade e que, ao adicionar M300, a compacidade diminuiu ligeiramente. Relativamente à substituição de cimento por pó de quartzo M600, verificou-se um aumento de compacidade significativo, sendo superior a 10 % para taxas de substituição de 25 e 51 %.

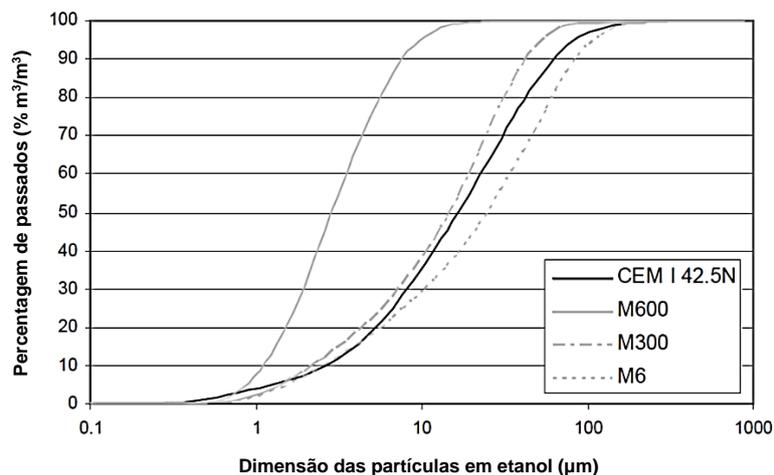


Figura 2.1 - Curvas granulométricas dos diferentes tipos de pó de quartzo comparando com a curva do cimento CEM I 42,5N, adaptado de Fennis *et al.* (2009)

No estudo, Fennis *et al.* (2012b), afirma-se que os fíleres que são selecionados para substituir parte do cimento devem contribuir para o aumento da compacidade porque, de outra forma, o uso do novo material irá aumentar a água necessária, prejudicando as propriedades da mistura.

Fennis *et al.* (2012a) referem ainda que, se uma mistura for desenvolvida para ter um elevado grau de compacidade, irá reduzir o volume de vazios entre partículas e, assim, o espaço entre as partículas de cimento será menor, reduzindo deste modo o espaço que necessita ser preenchido pelos produtos de cimento hidratados.

Enquanto Proske *et al.* (2014) sugerem que adicionar fíleres minerais à mistura proporciona um volume de pasta ideal, Fennis *et al.* (2012b) relembram que o comportamento das micropartículas difere do comportamento das partículas maiores devido à relação área de superfície/massa. Contrariamente às partículas grandes, no caso das micropartículas a compacidade é influenciada, não só pela sua geometria e forma como são depositadas e misturadas e a correspondente energia de compactação, mas também pelas forças de superfície, tais como as de Van der Waals e as electroestáticas, que podem ser superiores à força gravítica, acabando por formar aglomerados.

Uma elevada compacidade da mistura de betão faz com que as partículas estejam mais próximas umas das outras, tendo influência direta nas propriedades do betão endurecido, como se indica no subcapítulo 2.3.

2.2.2. Arranjo das partículas

A otimização do arranjo das partículas é importante para selecionar os tamanhos e quantidades certas para que as partículas mais pequenas possam preencher os vazios entre as maiores, de forma a aumentar a compacidade. Esta metodologia permitiu a introdução de novos betões, tais como os betões de elevado desempenho, os betões auto-compactáveis e os betões ecológicos (LBC), tratados neste estudo. Estes métodos podem ser agrupados em:

- Curvas de otimização;
- Modelos analíticos;
- Modelos de elementos discretos.

Neste trabalho só se faz referência à utilização das curvas de otimização por ser a abordagem utilizada na preparação das misturas desenvolvidas para posterior estudo da aderência entre varões de aço e betão. As curvas devem representar a distribuição do tamanho das partículas com maior compacidade.

2.2.2.1. Curvas de Otimização

Segundo Fennis e Walraven (2012), depois de em 1892 Feret ter afirmado que a escolha dos agregados influencia a resistência do betão, muitos investigadores tentaram encontrar a curva granulométrica ótima, i.e., aquela que conduz à mistura com maior compacidade. Surgiu a curva de Fuller, em 1907, que ainda hoje é utilizada para o cálculo de misturas e, de acordo com Talbot e Richart (1923), a curva é descrita pela equação (2.1) e o parâmetro de ajustamento toma o valor de 0,5. Por sua vez, Andreasen e Andersen (1930) melhoraram a curva de Fuller (1907) propondo que o parâmetro de ajuste possa estar entre 0,33 e 0,50, sendo determinado experimentalmente, dependendo por isso das características das partículas. Mais tarde, Funk e Dinger (1980) reconheceram que qualquer distribuição real de partículas tem um tamanho mínimo finito, d_{min} , e modificaram a curva de Andreasen e Andersen (1930) para a curva traduzida pela equação (2.2), propondo um fator de ajustamento de 0,37. Em contraste com a curva descrita na equação (2.1), a curva (2.2) depende dos diâmetros máximo e mínimo das partículas, fazendo uma melhor representação das partículas finas.

$$P(d) = \left(\frac{d}{d_{m\acute{a}x}} \right)^q \times 100 \quad (2.1)$$

$$P(d) = \frac{d^q - d_{m\acute{i}n}^q}{d_{m\acute{a}x}^q - d_{m\acute{i}n}^q} \times 100 \quad (2.2)$$

$P(d)$ – Percentagem acumulada;

d – Diâmetro da partícula a ser considerado;

$d_{m\acute{a}x}$ – Diâmetro máximo da partícula;

d_{min} – Diâmetro mínimo da partícula;

q – Parâmetro de ajuste da curva – 0,5 segundo Fuller (1907); 0,33-0,5 segundo Andreasen e Andersen (1930); 0,37 segundo Funk e Dinger (1980).

Na Figura 2.2, encontram-se representadas as três curvas anteriormente referidas.

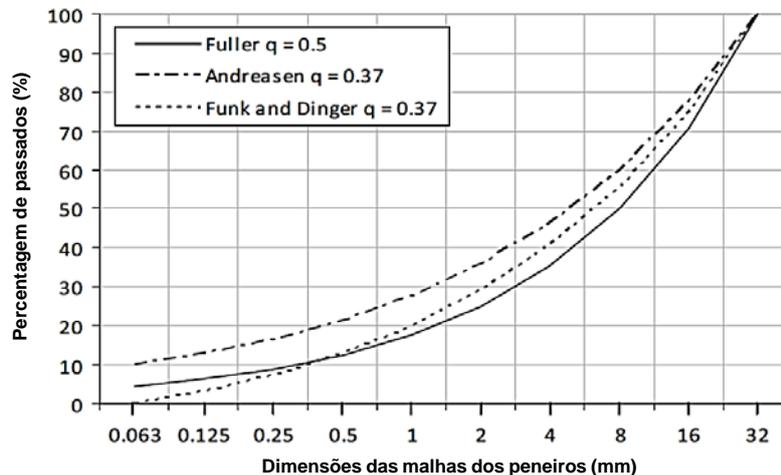


Figura 2.2 – Curvas de otimização para um diâmetro máximo de 32 mm e mínimo de 63 μ m, adaptado de Fennis e Walraven (2012)

Estas curvas não têm em consideração a forma das partículas, apesar da sua influência no valor da compactidade, principalmente quando estão a ser usadas diversas classes de tamanho de partículas e com características diferentes estão a ser usadas. Segundo Fennis e Walraven (2012), as curvas de otimização não têm em consideração as diferentes formas e compactidades das partículas dos diferentes grupos, podendo não conduzir à mistura com a máxima compactidade, fazendo referência aos estudos apresentados por Palm e Wolter (2009) e Stroeven *et al.* (2003) que indicam que a aplicação de *gap graded mixtures* pode levar a compactidades superiores.

Fennis (2011) efetuou um estudo exploratório para avaliar a influência de quatro curvas de otimização diferentes na resistência das misturas à compressão e à tração e no módulo de elasticidade. Obteve resultados semelhantes em todas as misturas, pelo que concluiu que a otimização do tamanho dos agregados não conduz a diferenças significativas na resistência das misturas, mas pode originar grandes diferenças na trabalhabilidade.

2.2.3. Volume de Água

O volume de água numa mistura de betão está diretamente relacionado com a compactidade, fazendo-se a distinção entre a água necessária para preencher os vazios entre as partículas e o seu excesso que fornece trabalhabilidade.

Segundo Fennis e Walraven (2012), se a composição da mistura for otimizada por forma a aumentar a sua compactidade, será necessária uma menor quantidade de água para preencher os vazios. Desta forma, é possível desenvolver misturas de betão com a mesma trabalhabilidade e com uma relação água/cimento inferior. O mesmo conceito pode ser aplicado no desenvolvimento de misturas

ecológicas, mas desta vez fixando-se a relação água/cimento e diminuindo-se a quantidade de cimento e, conseqüentemente, também a de água.

Fennis *et al.* (2012c) analisaram a trabalhabilidade e a compactidade em função do volume de água numa mistura, representada na Figura 2.3. Concluíram que o aumento da compactidade é sempre vantajoso para a quantidade total de água na mistura e que é necessário um maior volume relativo de excesso de água, para garantir fluidez à mistura, devido ao maior atrito existente entre as partículas.

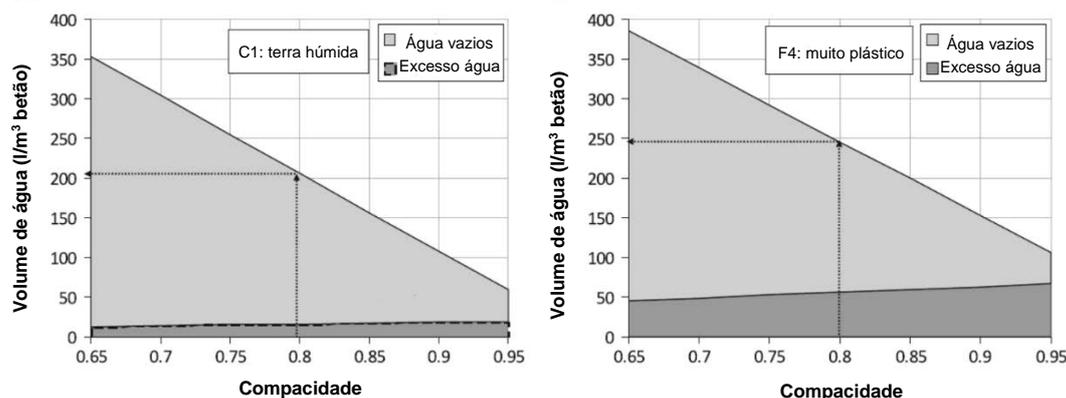


Figura 2.3 – Comparação do volume de água necessária em função da compactidade e da trabalhabilidade, adaptado de Fennis *et al.* (2012c)

De acordo com Fennis *et al.* (2012a), neste tipo de misturas ecológicas, com baixa quantidade de cimento, ou grandes quantidades de cimento substituído por adições, é muito importante controlar a quantidade de água, pois um pequeno desvio no seu valor tem um efeito na relação água/cimento muito mais significativo do que numa mistura de betão normal. Proske *et al.* (2014) reforçam que é de extrema importância efetuar um controlo rigoroso da qualidade e da quantidade dos materiais, especialmente no que se refere à humidade dos agregados.

Yu *et al.* (2015) desenvolveram várias misturas ecológicas de betão de ultra elevado desempenho usando cimento e adições e concluíram que, quando a relação água/ligante é relativamente pequena, grande parte da quantidade de água adicionada é absorvida pelos materiais mais finos (cimento e adições), não conseguindo reagir na sua totalidade com o cimento, o que origina uma quantidade de cimento hidratado limitada e conseqüentemente uma resistência restrita.

O volume de água inicial tem influência nas propriedades da mistura de betão, tanto no estado fresco como endurecido, afirmando Fennis *et al.* (2012b) que a relação água/ligante e o tipo de ligante e fíler são os principais fatores que influenciam o processo de hidratação e o resultado da microestrutura do betão e desta forma as características do material.

2.2.4. Superplastificantes

O volume de água necessário também pode ser reduzido com o uso de superplastificantes pois estes ajudam a dispersar as partículas de cimento e, ao mesmo tempo, reduzem a quantidade de água necessária. De acordo com Yu *et al.* (2015) o efeito do superplastificante difere de mistura para mistura.

Uma opção já estudada por Kapelko (2006) consiste no uso de dispersantes. Neste estudo concluiu-se que a utilização de superplastificante na ordem de 1,5 % da massa de cimento, permite a redução do cimento e da quantidade de água.

Fennis *et al.* (2012b) afirmam que a aglomeração das partículas pequenas (<125 µm) dificultam a mistura e sua compactação fazendo diminuir o valor da compacidade. Estes aglomerados podem ser minimizados em parte ao aplicar energia de compactação suficiente ou ao usar superplastificantes.

Coutinho (1988) apresenta um gráfico (Figura 2.4) que compara as resistências à compressão de três misturas com a mesma quantidade de ligante, mas diferindo entre si na quantidade de água e superplastificantes. Conclui que uma mistura com um superplastificante necessita de uma menor quantidade de água e conseqüentemente tem uma compacidade superior e atinge uma tensão de rotura superior à mistura padrão (sem superplastificante).

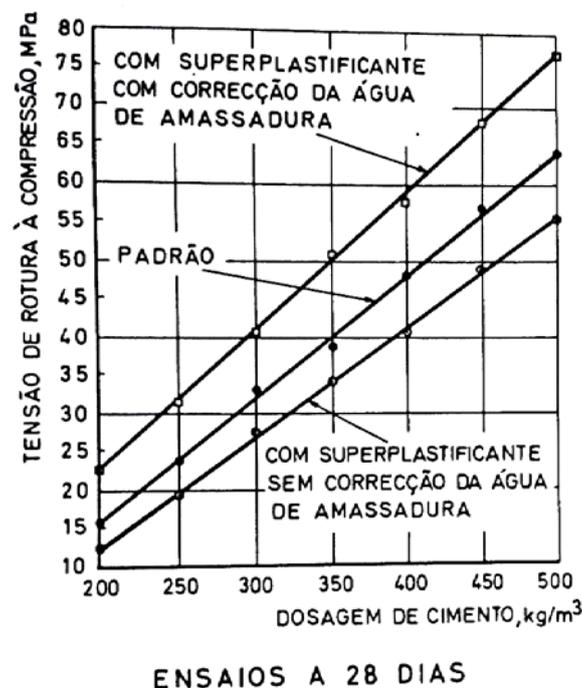


Figura 2.4 - Resistência à compressão com e sem uso de superplastificante e com e sem correção da água (Coutinho 1988)

A cláusula 5.2.6 da NP EN 206-1:2007 propõe algumas especificações para as quantidades máxima e mínima de adjuvante e afirma que betões com consistências superiores ou iguais a S4, V4, C3 e superiores ou iguais a F4 devem ser produzidos com recurso a superplastificantes.

2.3. Propriedades do Betão

Segundo Popovics (2011), citado por Fennis *et al.* (2012b), as propriedades do betão não são apenas influenciadas pela relação água/cimento, mas também por outros fatores tais como: tipos de cimento, uso dos agregados (quantidade, diâmetros máximos, condições de superfície) ou idade.

2.3.1. Trabalhabilidade

Como se viu anteriormente, se o volume de água se mantiver constante e a compacidade da mistura for aumentada, irá aumentar a trabalhabilidade devido à maior quantidade de água em excesso. Desta forma, pode-se diminuir a quantidade de água e manter constante a relação água/cimento, desenvolvendo assim uma mistura com a mesma fluidez que a de referência e com uma menor quantidade de cimento, de acordo com (Fennis *et al.* 2012a).

De acordo com Fennis (2011) a trabalhabilidade de uma mistura pode ser melhorada quando se inclui cinzas volantes e, desta forma, também se pode diminuir a quantidade de água.

Yu *et al.* (2015) verificaram que, ao aumentar a quantidade de água de uma mistura, o abaixamento do betão, medido no cone de Abrams aumenta linearmente e, comparando a mistura de referência com outras três misturas com adições, a água necessária segue a seguinte ordem crescente: cinzas volantes, filer calcário, escória de alto-forno e, por fim, a mistura de referência. Quanto mais esféricas são as partículas, melhor é a trabalhabilidade da mistura.

Proske *et al.* (2014) também recomendam o uso de cinzas volantes para melhorar a trabalhabilidade e referem que este tipo de misturas necessita de um maior tempo de mistura, ao utilizar o método normal.

2.3.2. Resistência à compressão

Segundo Coutinho (1988), uma mistura com elevada resistência é obtida com o máximo de compacidade e o mínimo de água. Refere também que se deve utilizar areia grossa, sem elementos inferiores a 0,5 mm, mas que a ausência de elementos finos deve ser compensada com uma dosagem de cimento compatível e com o uso de plastificantes.

A previsão da resistência à compressão é tradicionalmente efetuada através da Expressão de Feret, que se baseia na relação água/cimento, classe de resistência do cimento e quantidade de ar na mistura, como se observa na equação (2.3). Também Fennis *et al.* (2012b) compararam a resistência à compressão de diversas misturas com esta lei e observaram que esta não explica a diferença de valores de resistência à compressão em misturas com a mesma relação água/cimento, chegando a ter variações de 20 MPa, como se pode observar na Figura 2.5.

$$f_c = k_{28} \left(\frac{V_c}{V_c + V_w + V_a} \right)^2 \quad (2.3)$$

onde:

k_{28} é o coeficiente de Feret para a classe de resistência do cimento;

V_c é o volume das partículas de cimento (m^3);

V_w é o volume de água (m^3);

V_a é o volume de vazios (m^3).

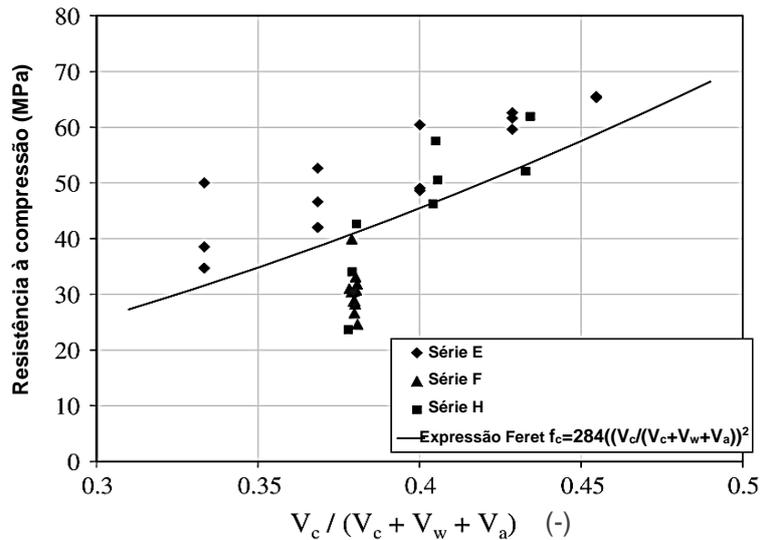


Figura 2.5 - Previsão da resistência à compressão segundo a Expressão de Feret, adaptado de Fennis *et al.* (2012b)

Como abordado anteriormente, otimizar a compacidade é benéfico para a quantidade de água necessária, bem como para diminuir o espaço entre as partículas de cimento, fazendo com que um menor espaço tenha de ser preenchido pelos produtos hidratados.

Fennis (2011) admitiu que a resistência de uma mistura está relacionada com a compacidade, mas devido à variação de água presente nas misturas, foi difícil obter uma relação direta entre estes dois parâmetros. Avançou a hipótese de que a resistência deve estar relacionada com a distância volumétrica entre as partículas de cimento, concluindo que elevadas relações de água/cimento e baixos valores de compacidade conduzem a distâncias maiores entre as partículas de cimento e consequentemente a resistência inferiores.

De acordo com Fennis e Walraven (2012) quando o cimento é substituído por fíler grosso, com uma dimensão semelhante à do cimento, o espaço entre as partículas de cimento aumenta, ao passo que adicionar fíler fino cria uma elevada compacidade e as partículas de cimento ficam mais próximas umas das outras, conforme se ilustra na Figura 2.6.

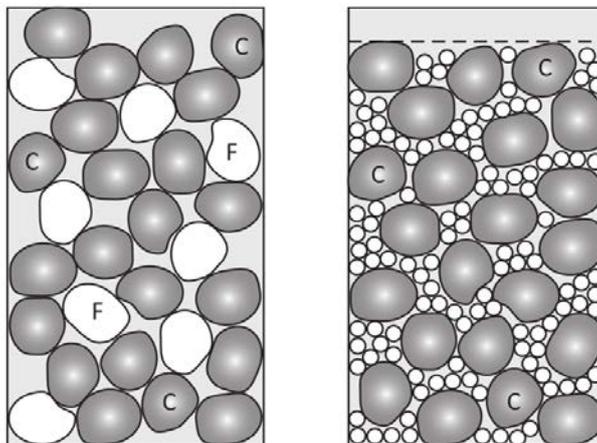


Figura 2.6 - Volume ocupado por uma estrutura de cimento (C) estável com fíler grosso, F, à esquerda comparado com fíler fino à direita (Fennis e Walraven, 2012)

Os ensaios efetuados por Fennis *et al.* (2009) mostraram que, mantendo uma relação água/cimento constante e substituindo 20 % de cimento por pó de quartzo M600, a resistência à compressão da mistura aumenta 15 %. Concluíram que são expectáveis maiores resistências quando o aumento da compactação é utilizado na formulação de novas misturas.

Proske *et al.* (2014) concluíram que a perda de resistência à compressão, devido à redução do cimento, pode ser compensada pela diminuição da quantidade de água ou utilização de um cimento de maior resistência.

Neste tipo de misturas, parte do cimento é normalmente substituído por material pozolânico. Fennis (2011) efetuou um estudo em que variou a composição do ligante mas manteve a mesma curva de otimização e a mesma quantidade de ligante (250 kg/m^3), como se pode consultar no Anexo A1. Em relação ao tipo de cimento utilizou CEM I 32,5 R e CEM III/B 42,5 N, com taxas de substituição por cinzas volantes em 30, 50 e 70 %. Concluiu, que para estas misturas que incluem cinzas volantes, foi possível diminuir a quantidade de água mantendo a mesma trabalhabilidade. Na Figura 2.7 está representada a resistência média à compressão das diferentes misturas ao longo do tempo e também da mistura de referência A3. Observa-se um desenvolvimento de resistência a partir dos 28 dias de idade, influenciado pelas reações pozolânicas. Concluiu que, quando as cinzas volantes são combinadas com cimento Portland, existe um acréscimo de resistência a longo prazo, como se pode observar nas misturas B3 e B5 após os 56 dias comparado com o desenvolvimento de resistência para as misturas com escória de alto-forno B4 e B6. Ao fim de 365 dias a mistura B5 atingiu 43,5 MPa enquanto a B6 apenas atingiu 23,7 MPa, podendo esta diferença estar relacionada com uma menor quantidade de hidróxido de cálcio presente nas misturas B2, B4 e B6.

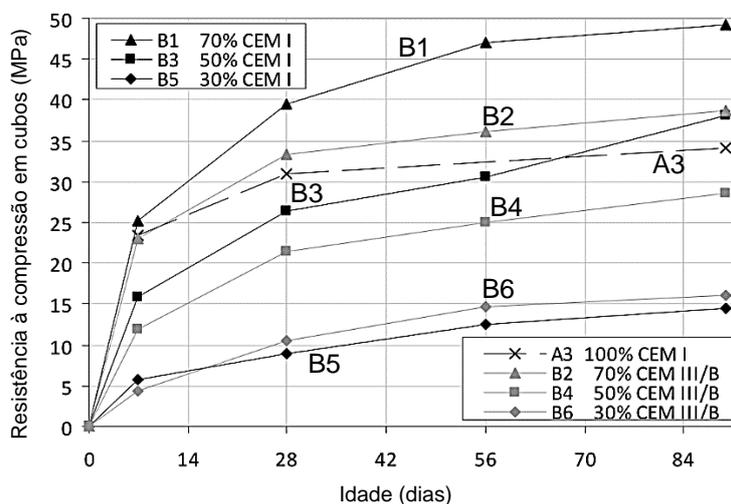


Figura 2.7 - Resistência média à compressão em provetes cúbicos para diferentes misturas, adaptado de Fennis (2011)

2.3.3. Resistência à tração

A relação entre a resistência à compressão e a resistência à tração das misturas ecológicas avaliadas por Fennis (2011) é equivalente à relação definida para betões correntes, como se verifica da Figura 2.8.

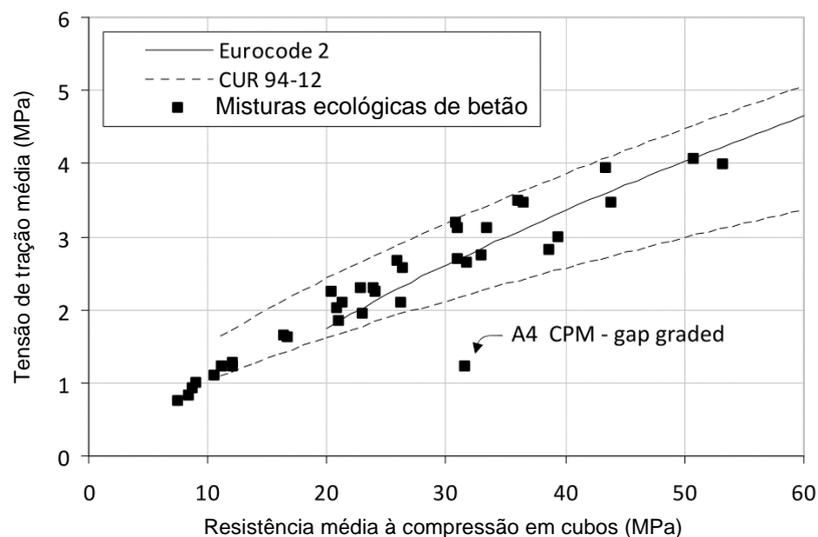


Figura 2.8 - Correlação entre a resistência média à compressão e a resistência à tração, adaptado de Fennis (2011)

2.3.4. Módulo Elasticidade

Fennis (2011) concluiu que a relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade avaliada para as misturas exploratórias de LBC consideradas, segue a relação sugerida pelo Eurocódigo 2 (2010), equação (2.4), para betão normal.

$$E_{cm} = 22000 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} \quad (2.4)$$

De acordo com Proske *et al.* (2014), o aumento do módulo de elasticidade deve-se à baixa porosidade da matriz, pelo facto da relação água/ligante ser baixo.

2.4. Considerações finais

As principais conclusões que se retiram dos estudos analisados neste capítulo, com relevância para a definição do trabalho experimental desenvolvido no âmbito da presente dissertação, são as que se sintetizam nos parágrafos seguintes.

É necessário controlar o volume de água a utilizar nas misturas de betão, pois esta variável influencia de forma direta diversos parâmetros como: a compacidade, a trabalhabilidade e a resistência. Em relação aos fileres, considera-se que são adequados para substituir parte do cimento, se aumentarem a compacidade da mistura.

A resistência à compressão pode continuar a ser o parâmetro adotado para classificar o tipo de betão, visto que os outros parâmetros em estado endurecido, como por exemplo a resistência à tração ou o módulo de elasticidade, seguem as mesmas relações que um betão normal.

3. ADERÊNCIA: ESTADO DA ARTE

Neste capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre os aspetos mais relevantes que influenciam a aderência entre varões de aço e betão, a principal propriedade em estudo na presente dissertação.

3.1. Introdução

Tal como descrito no *fib* Model Code 2010, a aderência é o fenómeno através do qual há interação e transferência de forças entre varões de aço e betão, o qual influencia muito significativamente o desempenho das estruturas de betão. Em estado limite de utilização, condiciona a abertura e o espaçamento das fissuras transversais, enquanto que em estado limite último é responsável pela amarração adequada da armadura e a capacidade de rotação nas regiões com rótula plástica.

A aderência no Eurocódigo 2 (2010) e no *fib* Model Code 2010 é dada em termos do valor de cálculo da tensão de rotura de aderência (f_{bd}), cujo valor depende de diversos fatores, conforme se abordará nesta secção.

De acordo com a expressão (3.1) do Eurocódigo 2 (2010), a aderência depende das condições de aderência (η_1), do diâmetro do varão (η_2) e do valor de cálculo da resistência à tracção do betão (f_{ctd}).

$$f_{bd} = 2,25 \times \eta_1 \times \eta_2 \times f_{ctd} \quad (3.1)$$

onde η_1 toma o valor de 1,0, para condições de boa aderência (ver Figura 3.1) e de 0,7, para outros casos e quando se utilizam cofragens deslizantes; η_2 toma o valor de 1,0, para diâmetros inferiores ou iguais a 32 mm, e de $(132 - d)/100$ caso contrário.

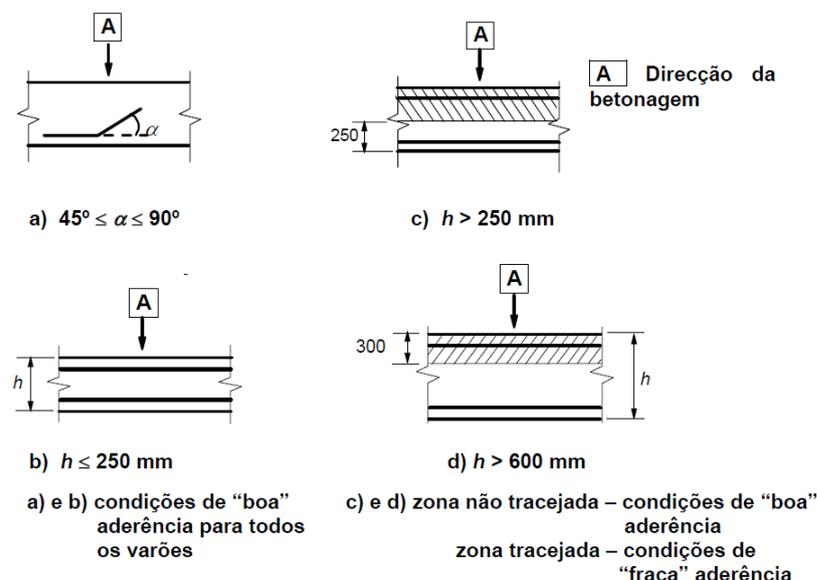


Figura 3.1 – Condições de aderência Eurocódigo 2 (2010)

De acordo com a expressão (3.2) do Model Code 2010, a aderência depende da superfície do varão (η_1), das condições de aderência (η_2), do diâmetro do varão (η_3), da resistência dos varões utilizados

(η_4), do valor característico da resistência à compressão do betão (f_{ck}) e de um factor de segurança $\gamma_{cb} = 1,5$.

$$f_{bd} = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \eta_4 \times \left(\frac{f_{ck}}{25} \right)^{0,5} / \gamma_{cb} \quad (3.2)$$

onde η_1 toma o valor de 1,75 para varões nervurados (estando incluídos varões galvanizados e de aço inoxidável), 1,40 para varões nervurados com revestimento epoxídico de proteção, e 0,90 para varões lisos; η_2 toma o valor de 1,0 para as mesmas condições de boa aderência apresentadas na Figura 3.1, de 0,7 para os restantes casos onde se utilizam varões nervurados e de 0,5 quando se utilizam varões lisos, η_3 toma o valor de 1,0 para varões de diâmetro igual ou inferior a 25 mm e de $(25/\varnothing)^{0,3}$ caso contrário. Para o valor do quarto termo, η_4 , deve ser efectuada uma interpolação entre os valores:

$\eta_4 = 1,20,$	para $f_{yk} = 400 \text{ MPa}$
$\eta_4 = 1,00,$	para $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$
$\eta_4 = 0,85,$	para $f_{yk} = 600 \text{ MPa}$
$\eta_4 = 0,75,$	para $f_{yk} = 700 \text{ MPa}$
$\eta_4 = 0,68,$	para $f_{yk} = 800 \text{ MPa}$

Os regulamentos definem os comprimentos de amarração a partir do valor da tensão de rotura de aderência.

3.2. Modelos de aderência

A aderência é composta por três parcelas, normalmente designadas na literatura por: adesão (aderência química) entre os dois materiais, atrito entre as superfícies de contacto, e pela aderência mecânica associada à existência de nervuras, não tendo sido possível até à data determinar experimentalmente cada parcela isoladamente (Fernandes 2000).

Ainda assim, alguns autores apresentam curvas esquemáticas tensão de aderência – deslizamento com estas parcelas, como se verifica na Figura 3.2, onde se ilustra o comportamento local de uma barra lisa e nervurada e onde a rotura se dá pelo arrancamento da barra.

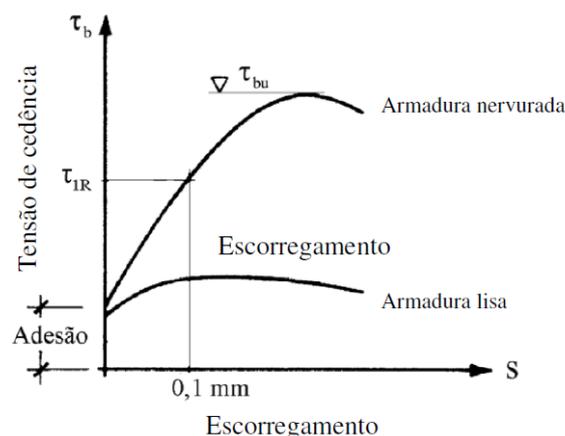


Figura 3.2 – Curvas esquemáticas tensão de aderência – escorregamento de Leonhardt e Mönning (1977), citados por Louro (2011)

De acordo com Louro (2011), a variação inicial corresponde à adesão, seguida do trecho que corresponde à aderência mecânica, enquanto o trecho plano corresponde à aderência por atrito, sendo esta última parcela típica de varões lisos.

O *fib* bulletin 10 (2000) resume quatro etapas para o caso dos ensaios de arrancamento, ilustradas na Figura 3.3, e que se resumem em seguida.

Etapa I

O betão encontra-se não fendilhado e está-se na presença de pequenas tensões de aderência, $\tau \leq \tau_1 = (0,2 - 0,8)f_{ct}$. Nesta fase, não existe escorregamento e a tensão é assegurada em grande parte pela adesão. Existe uma pequena parcela referente à interação mecânica associada à rugosidade microscópica da superfície do varão.

Etapa II

Nesta etapa tem-se valores de tensão superiores, $\tau > \tau_1$, e a adesão perde-se. Surgem as primeiras fendas transversais ao eixo do varão, devido às nervuras do varão introduzirem grandes tensões no betão, o que permite que haja escorregamento.

Etapa III

Para valores de tensão de aderência $\tau \leq (1 - 3)f_{ct}$, as fissuras alastram radialmente devido à maior ação das nervuras sobre o betão, esmagando o betão e provocando um estado de tração. Desta forma, o betão circundante tem um papel fundamental ao garantir confinamento ao varão, pelo que a tensão de aderência e a rigidez são asseguradas pelo bloqueio mecânico das nervuras e pelo betão exterior não danificado. No caso em que a armadura transversal é reduzida, ou até inexistente, esta etapa termina assim que as fissuras radiais atingem a face exterior do betão, ocorrendo a rotura por *splitting* (etapa IVb).

Para a situação em que a armadura transversal ou o recobrimento são significativos, a rotura por *splitting* vai ser impedida pelo confinamento e ocorre rotura por arrancamento (etapa IVc).

Etapa IVa

Para varões lisos, esta fase sucede à perda de adesão, onde a tensão de aderência tem um valor reduzido e é apenas garantida pelo atrito entre os dois materiais, provocado pela pressão transversal, retração do betão e rugosidade do varão.

Etapa IVb

No caso em que o confinamento é reduzido, a fissura longitudinal ocorre em todo o recobrimento e a aderência tende a perder-se abruptamente. Também é referido que, no caso de betões leves e de betões de elevada resistência, a rotura por *splitting* é mais preocupante devido ao facto da fissura não ocorrer apenas na pasta de cimento, atravessando os agregados e provocando assim fissuras mais planas.

Etapa IVc

Como referido na Etapa III, quando a *splitting* não ocorre devido ao forte confinamento, irá ocorrer a rotura por arrancamento.

De referir que, em estruturas reais, as roturas mencionadas anteriormente não ocorrem separadamente, pelo facto de não existir um comportamento isolado como nos ensaios realizados em laboratório.

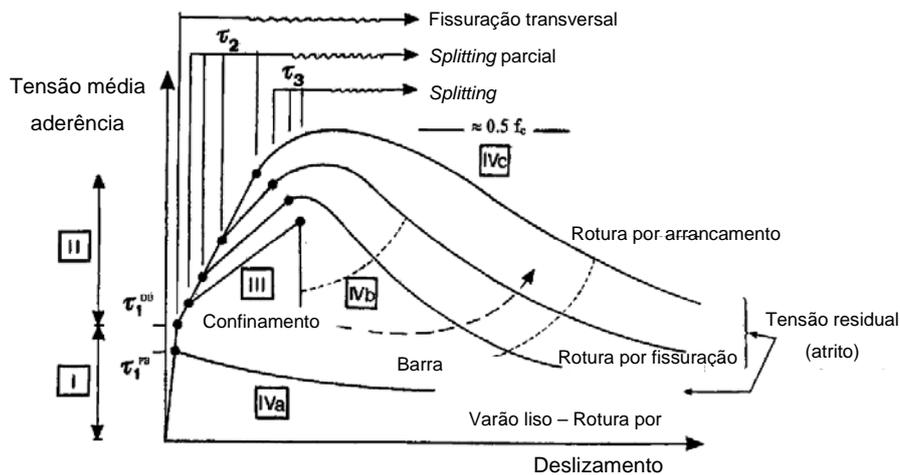


Figura 3.3 – Esquema da tensão de aderência para as diferentes fases, adaptado de *fib* bulletin 10 (2000)

3.3. Tipos de ensaio

A aderência pode ser caracterizada com recurso a dois tipos de ensaios normalizados, os ensaios de arrancamento (*pull-out tests*) e os ensaios com vigas (*beam tests*). O primeiro consiste em tracionar um varão inserido num bloco de betão e, de acordo com Lúcio e Marreiros (2005), o escorregamento é o deslocamento relativo entre o aço e o betão devido a um escorregamento real entre os dois materiais, assim como a pequenas deformações na camada de betão junto à interface. Neste ensaio, apenas determinado comprimento do varão está aderente ao betão e pode ser ensaiado com um comprimento aderente curto ou longo. No primeiro caso, tem-se uma resposta local, enquanto no segundo obtém-se uma resposta global.

Normalmente este ensaio é efetuado em provetes com comprimento aderente curto, de forma a obter tensões uniformes ao longo do comprimento aderente e serve para obter a relação da tensão de aderência – escorregamento.

Relativamente ao ensaio com viga, esta é uma alternativa ao ensaio de arrancamento com comprimento longo e as características gerais do provete estão representadas na Figura 3.4.

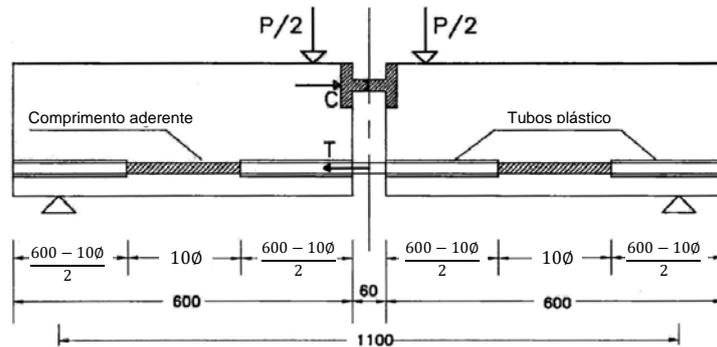


Figura 3.4 – Características gerais do ensaio de viga de Rilem (1983), adaptado de Lúcio e Marreiros (2005)

3.4. Parâmetros que afetam a aderência varão-betão

A aderência varão-betão é influenciada por diversos parâmetros relacionados com as características dos materiais, como o diâmetro do varão, o seu perfil nervurado e a resistência do betão à compressão e à tração, mas também têm sido alvo de investigação outros fatores, como a velocidade de aplicação da força, ou a corrosão e o recobrimento do varão. Seguidamente, apresentam-se as principais conclusões desses estudos. Estas referem-se a cada parâmetro individualmente mas, no capítulo 5, os resultados são analisados e comparados tendo igualmente em conta o que de seguida é exposto.

3.4.1. Influência da velocidade

De acordo com Louro (2014), a velocidade de aplicação de uma ação influencia o valor da tensão de aderência obtida, aumentando à medida que se aumenta a velocidade, de acordo com os estudos realizados por Hjorth (1976), Tassios (1979) e Eligehausen *et al.* (1983), conforme se pode observar na Figura 3.5. Esta autora refere ainda o trabalho de Lowes (1999), onde estima que a velocidade de escorregamento das armaduras numa ponte é de cerca de 0,08 mm/s na presença de um sismo e que, face à velocidade de ensaio proposta por Eligehausen *et al.* (1983), de 0,03 mm/s, o acréscimo da tensão de aderência quando sujeito à ação sísmica é inferior a 5 %, podendo por isso ser desprezado.

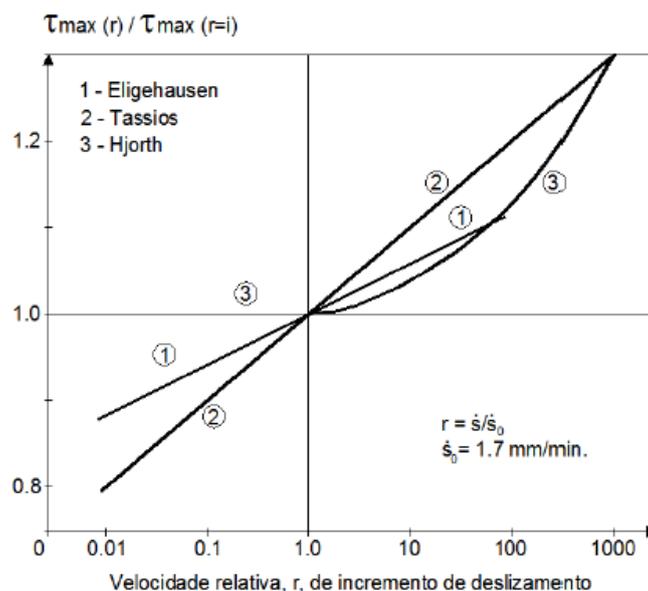


Figura 3.5 – Influência da velocidade de ensaio, adaptado de Eligehausen *et al.* (1983), citado por Louro (2014)

3.4.2. Influência do diâmetro

Diversos autores reconhecem que existe uma maior eficiência na aderência no caso de varões de diâmetro inferior e este facto é tido em conta no Eurocódigo 2 (2010) para varões de diâmetro superior a 32 mm, onde se prevê uma redução do valor da tensão de rotura da aderência.

Eligehausen *et al.* (1983), citado por Louro (2014), consideram a existência de um efeito moderado devido ao diâmetro dos varões, em que varões de 19 mm apresentam uma tensão de aderência superior a varões de 25 mm em 10 %, e que para varões de 31 mm existe uma redução na tensão de aderência também em 10 %.

Bazant & Sener (1988), citados por Muttoni & Ruiz (2012), afirmam que a influência do diâmetro encontra-se presente na rotura por fissuração, no caso dos varões nervurados, porque é a resistência à tração que governa este tipo de rotura. Isto pode ser explicado pela maior solicitação do betão envolvente, introduzida por diâmetros e nervuras transversais maiores.

3.4.3. Influência das características do perfil nervurado

O bloqueio mecânico entre os dois materiais, betão e superfície do varão, é conseguido através das nervuras. De acordo com diversos estudos, estas melhoram significativamente a ancoragem do varão ao betão e restringem os deslocamentos relativos entre os elementos, aumentando o valor da tensão de aderência, como se observa no estudo apresentado por Louro (2011) onde a tensão de aderência máxima em varões nervurados é doze vezes superior à dos varões lisos, para varões de 12 mm de diâmetro.

De acordo com André e Pipa (2010), o valor da tensão de aderência é influenciado por diversos parâmetros, referindo-se que segundo o CEB-FIP Model Code 90 são dez, incluindo a rugosidade e a configuração geométrica do varão. Estes autores estudaram a influência da presença da sigla 'ARCER' no comprimento aderente, em gamas de diâmetros baixa, média e alta, e concluíram que a alteração local da configuração geométrica das nervuras, com a introdução da sigla 'ARCER' tem influência negativa nos valores de tensão máxima e média de aderência.

Lorrain *et al.* (2010) referem o trabalho de Hamad (1995) que investigou a aderência numa série de varões com a geometria de nervuras bastante variável, onde tinha espaçamento de nervuras entre 35 e 60 % do diâmetro do varão, altura das nervuras entre 5 e 12,5 % do diâmetro do varão e com uma inclinação das nervuras de 30° até 90°, observando que a configuração que conduz a maior tensão de aderência corresponde ao varão com uma inclinação da nervura de 60°, espaçamento entre nervuras de 50 % e altura da nervura de 10 % do diâmetro do mesmo. Também referem que Lutz e Gergeley (1967) concluíram que inclinações de nervuras entre 40° e 105° são suficientes para evitar deslocamentos relativos entre os dois materiais e que, quando este valor é inferior a 30°, o modo de rotura e a curva tensão-deslizamento são afetados.

Lorrain *et al.* (2010), compararam a tensão de aderência de cinco varões, com diâmetro de 12,5 mm e com diferentes características geométricas das nervuras, através de ensaios de arrancamento,

atendendo a que os varões de aço produzidos por diferentes fabricantes e em diferentes países tendem a ter diferenças significativas na geometria das nervuras. As variáveis consideradas neste estudo foram a altura, espaçamento e orientação das nervuras (ângulo em relação ao varão e inclinação). Observaram que, para as duas últimas variáveis, não existe relação direta com os resultados. Relativamente à altura das nervuras, concluíram que uma relação linear se ajusta bastante bem aos resultados de tensão de aderência obtidos, como se verifica na Figura 3.6. Quanto à influência do espaçamento das nervuras na tensão de aderência, a relação entre resultados tende a ser exponencial, mas existe uma maior discrepância.

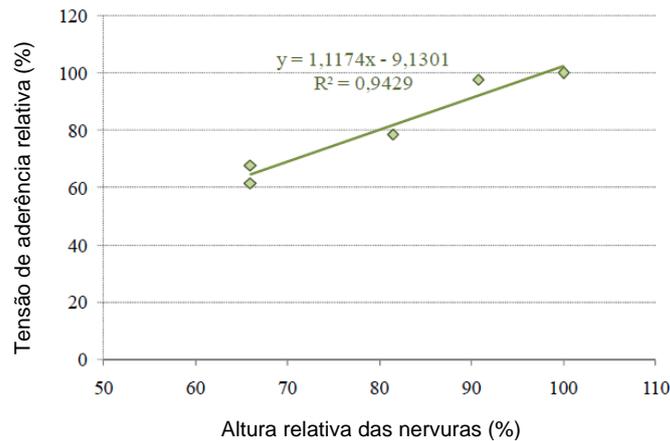


Figura 3.6 – Relação entre altura das nervuras relativa e tensão de aderência relativa, adaptado de Lorrain *et al.* (2010)

Seguindo o mesmo raciocínio, Filho *et al.* (2012) analisaram a tensão de aderência em oito configurações de nervuras, também em varões com diâmetro de 12,5 mm. No seu estudo referem que muitos investigadores realçam o uso da área relativa de nervuras (f_R) para combinar o efeito de vários parâmetros geométricos das nervuras. Ao analisar os resultados, reforçam a ideia de que a geometria das nervuras é fundamental na aderência entre os dois materiais e que a altura das nervuras é o parâmetro geométrico que mais influencia a tensão de aderência.

Por outro lado, Louro (2014) cita as conclusões obtidas por Darwin e Graham (1993) em diversos provetes com combinações de altura e espaçamento de nervuras transversais diferentes e onde os resultados apontam para uma relação direta entre tensão de aderência e f_R , mas que é independente da combinação de altura e espaçamento das nervuras. Cita também o estudo de Mayer (2001) onde este refere que, de acordo com os resultados encontrados na literatura, a rigidez inicial da relação entre tensão de aderência-deslizamento é dependente da área relativa das nervuras transversais. Afirma que, para alcançar o comportamento rígido da aderência, é necessário um valor elevado de f_R , sendo independente da combinação entre altura das nervuras, espaçamento entre nervuras, inclinação das nervuras transversais em relação ao eixo do varão e ângulo das nervuras.

3.4.4. Influência da resistência do betão

O betão entre nervuras está sujeito a tensões elevadas, ocorrendo fissuração e esmagamento, e por isso as suas propriedades têm grande influência na resposta da ligação entre os dois materiais.

Segundo Lúcio e Marreiro (2005), a aderência depende da resistência do betão à compressão e à tração, sendo que a resistência do betão à compressão é importante para roturas por arrancamento, enquanto a resistência à tração influencia a rotura por *splitting*.

De acordo com Louro (2014), Eligehausen *et al.* (1983) concluíram que existe uma relação inversamente proporcional entre a resistência à compressão do betão e o deslizamento e que existe uma relação proporcional entre a resistência do betão à compressão e a tensão de aderência.

3.4.5. Influência da corrosão

A corrosão dos varões de aço é a principal causa de deterioração das estruturas de betão armado, tendo como efeito direto a perda da secção transversal dos varões e a fissuração do betão de recobrimento devido ao aumento de volume associado à geração de produtos da corrosão na superfície dos varões.

O *fib* bulletin 10 (2000) afirma ainda que se regista um aumento inicial da tensão de aderência, a qual se atribui à expansão do óxido de ferro, enquanto o decréscimo posterior está relacionado com a acumulação da camada fraca dos produtos da corrosão na interface dos materiais.

Cairns *et al.* (2007), referem igualmente um aumento inicial na tensão de aderência acompanhado de uma diminuição acentuada, como se observa na Figura 3.7. No seu estudo atribuem o aumento de tensão de aderência ao aumento de atrito entre o varão e o betão e concluíram que os produtos da corrosão não prejudicam as características da ligação varão/betão onde a largura das fissuras não exceda 1,0 mm e que mudanças na interface dos dois materiais devido à corrosão não é a causa principal da redução da tensão de aderência entre varão aço e o betão desde que o recobrimento não se tenha destacado.

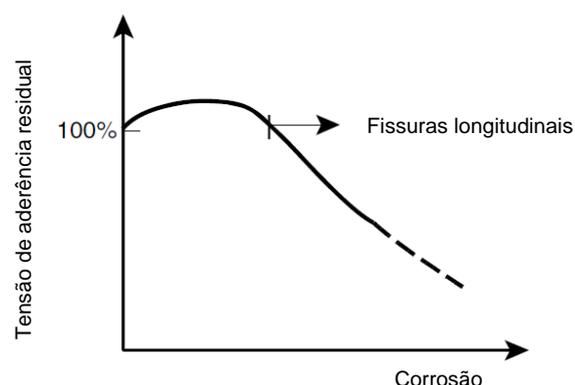


Figura 3.7 – Influência da corrosão na tensão de aderência residual, adaptado de Cairns *et al.* (2007)

Segundo Cairns *et al.* (2007), Cabrera e Ghodussi (1992) sugerem que o produto da corrosão entre o varão e o betão irá ser parcialmente responsável pela redução da tensão de aderência, mas Al-Sulaimani *et al.* (1990) defendem que uma camada firmemente aderente dos produtos da corrosão pode contribuir para um aumento da aderência em estados pouco avançados de corrosão.

O meio ambiente onde a corrosão se desenvolve parece influenciar as propriedades na interface, podendo ser esta a causa da inconsistência de resultados da tensão de aderência reportada por outros estudos.

Fischer e Ožbolt (2012) afirmam que os efeitos da corrosão na resposta da aderência tem sido investigada por diversos autores, como Almusallam *et al.* (1996), Auyeung *et al.* (2000), Fang *et al.* (2004) e Cabrera & Ghodussi (1992), concluindo que a pressão devida à expansão volumétrica dos produtos da corrosão pode resultar num aumento do valor da aderência para profundidades de penetração da corrosão $\chi_{corr} < 25 - 50 \mu m$, dependendo da relação recobrimento/diâmetro. Com o aumento da corrosão, o estado de tensão de tração no betão envolvente aumenta e dá origem às primeiras fissuras longitudinais e ao decréscimo da aderência.

Fischer e Ožbolt (2012) expõem ainda que o decréscimo da aderência pode ser reduzida ou aumentada em função da armadura transversal, de acordo com Al-sulaimani *et al.* (1990), Cabrera & Ghodussi (1992), Rodriguez *et al.* (1994), Berra *et al.* (1997) e Mangat & Elgraf (1999).

Louro (2014) refere que o trabalho realizado por Almusallam (1996) indica que, numa fase inicial de corrosão (até 4 % medido em perda de peso), esta tem um efeito benéfico no valor da tensão máxima de aderência e uma diminuição do escorregamento.

3.4.6. Influência da superfície do varão

Jorge *et al.* (2012) estudaram a influência da aplicação da pintura anticorrosiva em varões de aço na aderência destes a argamassas de reparação. No seu estudo consideraram varões lisos e nervurados, com proteção e sem proteção, oxidados e não oxidados, determinando a tensão de aderência através de três ensaios de arrancamento para cada conjunto de variáveis.

Em relação aos varões lisos, concluíram que os varões oxidados apresentam valores superiores de tensão de aderência, mas quando se aplica uma pintura de proteção do tipo esmalte, o valor da tensão é inferior.

No caso dos varões nervurados, a aplicação de pinturas de proteção diminuiu a tensão de aderência para valores entre 30 e 40 % à medida que se aumenta a espessura da pintura e conseqüentemente se reduz a área das nervuras transversais em contacto com a argamassa.

3.4.7. Influência do recobrimento no tipo de rotura

Gavilán *et al.* (2014) investigaram a relação entre o recobrimento e o diâmetro do varão e o tipo de rotura. Analisaram diversos trabalhos efetuados entre 2010 e 2013 com um total de 782 resultados de ensaios e compararam os resultados por gamas de valor da resistência do betão, sendo apresentados na Tabela 3.1. Concluíram que, com um recobrimento 4,5 vezes superior ao diâmetro do varão, o provete não apresenta *splitting*, independentemente da resistência do betão.

Muttoni e Ruiz (2012) mencionam que, quando o recobrimento é insuficiente, ou seja, quando é inferior a três vezes o diâmetro, a rotura por *splitting* é a mais expectável.

Tabela 3.1 – Valores limites da relação recobrimento/diâmetro no tipo de rotura, adaptado de Gavilán *et al.* (2014)

Resistência média à compressão (MPa)	Deslizamento		Splitting
	Relação c_{nom}/\varnothing mín	Relação c_{nom}/\varnothing máx	Relação c_{nom}/\varnothing mín
$f_{cm} \leq 20$	4,5	3,5	3,5
$20 < f_{cm} \leq 30$	4,5	4,2	2,9
$30 < f_{cm} \leq 40$	4,5	4,19	3,5
$40 < f_{cm} \leq 50$	4,5	4,5	2,6
$f_{cm} > 50$	4,5	3,67	3,67

3.5. Considerações finais

A análise dos estudos anteriormente expostos revela que a relação entre a tensão de aderência e o deslizamento é fortemente influenciada por diversos parâmetros.

Conclui-se que, de entre os parâmetros que influenciam o valor da aderência, citados ao longo do presente capítulo, para além da resistência do betão e do diâmetro do varão, aquele que tem uma influência mais direta e proporcional está relacionado com o perfil nervurado. Assim, para um perfil com maior área relativa de nervuras transversais espera-se um maior valor da tensão de aderência.

Como o principal objetivo desta dissertação é a caracterização da aderência entre varões de aço inoxidável e LBC, no estudo descrito no capítulo 5 optou-se por selecionar o diâmetro do varão, o perfil nervurado e a resistência do betão, como os parâmetros a estudar. Relativamente ao primeiro, selecionaram-se diâmetros correntes, de 12 e 16 mm. No que diz respeito ao segundo, optou-se por analisar os resultados da tensão de aderência em função da área relativa das nervuras transversais e da altura das mesmas. Sobre o terceiro, decidiu-se usar uma mistura de referência e selecionar duas misturas de LBC com resistências à compressão distintas, após a caracterização de diversas misturas, descrita no capítulo 4.

4. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE MISTURAS LBC

Ao longo deste capítulo descreve-se um estudo experimental desenvolvido com vista à formulação e caracterização de diferentes composições de LBC. O trabalho foi desenvolvido em duas fases. Na primeira, de carácter exploratório, efetuou-se um estudo prévio das propriedades do LBC que permitiu ajustar melhor alguns parâmetros da composição destas misturas, definir quatro composições e proceder à sua caracterização detalhada.

Apresentam-se, em primeiro lugar, os materiais e suas características, passando em seguida pela descrição das misturas e do procedimento adotado para a sua formulação. Depois, enumeram-se os ensaios efetuados em cada fase experimental e termina-se com a apresentação e análise dos resultados obtidos.

4.1. Objetivos

Para que este tipo de misturas possa ser utilizado, e assim reduzir o impacte ambiental da construção de estruturas em betão, é necessário estudar diversas composições, verificar se o seu comportamento responde às exigências regulamentares e se o conhecimento existente consolidado para estruturas em betão corrente pode ser aplicado na análise e dimensionamento de estruturas em LBC.

Em todas as misturas estudadas utilizou-se uma quantidade de ligante inferior ao limite de 260 kg/m³ de betão estabelecido pela NP EN 206-1:2007 e efetuou-se a caracterização detalhada das suas propriedades no estado fresco e endurecido. Desta forma, fixou-se a quantidade de ligante em 250 kg/m³ de betão. Além disso, estudaram-se composições em que a quantidade de cimento foi reduzida através da sua substituição por fíler calcário e cinzas volantes, mantendo sempre um total de 250 kg de ligante, conforme indicado na Tabela 4.1. A quantidade de fíler calcário é sempre igual à quantidade de cimento presente na mistura.

Tabela 4.1 – Composição do ligante para as misturas estudadas

Composição		RC250	LBC125	LBC100	LBC75
CEM I – 52,5 R	(kg/m ³)	250	125	100	75
Fíler Calcário	(kg/m ³)	-	125	100	75
Cinzas Volantes	(kg/m ³)	-	-	50	100

4.2. Materiais utilizados

Os materiais utilizados nas misturas LBC já tinham sido anteriormente caracterizados, apresentando-se seguidamente os elementos relevantes.

4.2.1. Caracterização dos agregados

4.2.1.1. Curvas granulométricas

Neste estudo foram utilizadas duas areias, um areão e uma brita, com as características granulométricas que se encontram resumidas na Tabela 4.2 e Figura 4.1. A análise granulométrica

seguiu a NP EN 933-1:2000 e utilizaram-se os peneiros da série principal e secundária europeia, descritos na NP EN 933-2:1999, estando a primeira assinalada na tabela com um fundo cinza claro.

Tabela 4.2 – Percentagem de massa passada nos peneiros para cada agregado utilizado

malha	areia fina 0/3 (%)	areia média 0/4_I (%)	Areão (%)	brita1 6/14 (%)
0,063	0,3	0,8	0,2	0,1
0,125	6,6	3,6	0,2	0,1
0,25	27,6	9,2	0,2	0,1
0,5	48,3	20,9	0,2	0,1
1	64,5	45,7	0,2	0,1
2	86,5	72,9	0,4	0,1
3,15	95,1	89,5	1,6	0,2
4	98	94,3	4,9	0,24
5,6	99,1	98,8	50,6	1,32
6,3	99,6	99,5	83,8	8,4
8	100	100	99,6	29
10	100	100	100	56,3
11,2	100	100	100	71,3
12,5	100	100	100	87,3
14	100	100	100	97,8
16	100	100	100	100
20	100	100	100	100
22,4	100	100	100	100
31,5	100	100	100	100

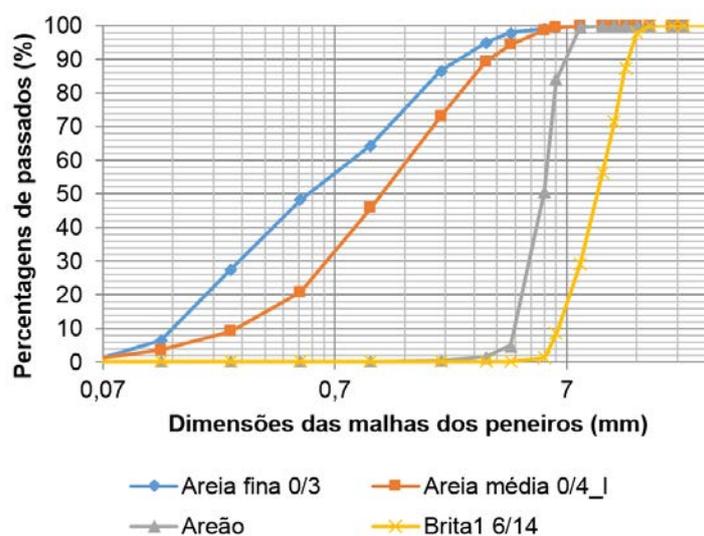


Figura 4.1 – Curvas granulométricas dos agregados utilizados nas misturas de betão

4.2.1.2. Dimensão máxima do agregado

Segundo Lourenço *et al.* (2004), para o cálculo da máxima dimensão da classe grossa de agregados pode-se seguir dois critérios, o proposto pela A.S.T.M. (American Society for Testing Materials) ou o proposto por Faury.

De acordo com o critério da A.S.T.M., a máxima dimensão do agregado, $d_{m\acute{a}x}$, corresponde à menor abertura do peneiro através da qual passa pelo menos 90 % da massa do agregado. Por outro lado, Faury, segundo Coutinho (1988), defende que a máxima dimensão deverá ser a dimensão fictícia da malha onde apenas não passa a parcela de grossos. Assim Faury, propõe uma extrapolação de $d_{m\acute{a}x}$ a partir das variações das percentagens de passados dos dois primeiros peneiros onde fica retido material, através da expressão (4.1):

$$d_{m\acute{a}x} = d_1 + (d_1 - d_2) \times \frac{x}{y} \quad (4.1)$$

onde:

- d_1 é a dimensão do primeiro peneiro onde fica retido material;
- d_2 é a dimensão da malha do peneiro seguinte;
- x é a percentagem de partículas retidas no peneiro da malha d_1 ;
- y é a percentagem de partículas retidas no peneiro da malha d_2 .

Lourenço *et al.* (2004) refere também que o primeiro critério deve ser usado sempre que a massa de passado do primeiro peneiro não é um valor próximo de 90 %. Na brita 1 6/14, utilizada nas misturas, a percentagem de massa passada no primeiro peneiro em que fica retido algum material é de 97,8 %.

Assim sendo, $d_{m\acute{a}x}$ é dado pelo primeiro critério e tem o valor de 14 mm.

4.2.1.3. Módulo de finura

Os módulos de finura dos agregados utilizados nas misturas encontram-se na Tabela 4.3 e foram calculados através da expressão (4.2), que considera apenas os peneiros correspondentes à série principal e até ao peneiro de malha de 0,125 mm.

$$MF = \frac{\sum \text{Retidos acumulados da série principal}}{100} \quad (4.2)$$

Tabela 4.3 – Módulo de finura dos agregados utilizados nas misturas de betão

	Areia 0/3	Areia 0/4_I	Areão	Brita1 6/14
MF	2,69	3,53	5,94	6,70

4.2.1.4. Massa volúmica

Para o cálculo da quantidade de cada agregado na mistura de betão é necessário saber a sua massa volúmica. A metodologia utilizada seguiu a NP EN 1097-3:2003 e os resultados encontram-se na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Massa volúmica absoluta dos agregados utilizados nas misturas de betão

	Areia 0/3	Areia 0/4_I	Areão	Brita1 6/14
Massa Volúmica absoluta (kg/l)	2,69	3,53	5,94	6,70

4.2.2. Caracterização do ligante

A constituição do ligante numa mistura de betão pode ser muito variável, dependendo do tipo de ligante, da sua quantidade e do uso ou não de adições.

O cimento utilizado tem como origem a Secil Maceira sendo do tipo CEM I e da classe 52,5 R. Já no que diz respeito às adições tem-se dois tipos, sendo o primeiro um fíler calcário de origem Omya, enquanto o segundo são cinzas volantes de origem Secil. De acordo com a NP EN 206-1:2007 as cinzas volantes são do tipo II.

As suas massas volúmicas estão resumidas na Tabela 4.5:

Tabela 4.5 - Massa volúmica dos constituintes do ligante

	CEM I 52,5 R	Fíler calcário	Cinzas volantes
Massa volúmica (kg/l)	3,12	2,7	2,3

4.2.3. Caracterização do adjuvante

Como o betão utilizado tem baixa quantidade de ligante, recorreu-se ao uso de um adjuvante para conseguir produzir betões com baixo volume de água. O adjuvante utilizado é do tipo superplastificante, com a designação comercial, *BASF Glenium sky 526* com massa volúmica de 1,06 kg/l. Este plastificante foi utilizado em todas as misturas e a sua dosagem foi ajustada através de amassaduras exploratórias, realizadas na primeira fase experimental.

4.3. Formulação das misturas

Para o desenvolvimento de todas as misturas adotou-se o procedimento descrito por Lourenço *et al.* (2004). A definição da quantidade de agregados a utilizar através nas misturas foi obtida através de uma curva de otimização.

4.3.1. Curvas de otimização

Para a composição da mistura granulométrica estudou-se a influência que as curvas Faury e Funk e Dinger (1980) têm na quantidade dos agregados necessários para que se obter uma curva próxima da teórica. A curva de Funk e Dinger, equação (2.2), foi apresentada na secção 2.2.2.1 e depende das dimensões mínimas e máximas dos agregados constituintes da mistura.

A curva de Faury é composta por dois segmentos de reta. As abcissas destes três pontos, em escala logarítmica, são 0,0065, metade da dimensão máxima e a dimensão máxima, para os pontos inicial, intermédio e final, respetivamente. Em relação às ordenadas, estas seguem uma escala linear e representam a percentagem de material retido em cada peneiro.

Esta curva depende da dimensão máxima definida em 4.2.1.2 (14 mm) e dos parâmetros A e B que dependem do tipo de agregado e da trabalhabilidade desejada. Como as misturas têm baixa dosagem de ligante e, conseqüentemente, baixo volume de água, o betão irá ter uma trabalhabilidade muito seca,

habitualmente denominada de terra húmida. Desta forma, os parâmetros A e B são 26 e 1,5, respetivamente, acordo com Lourenço *et al.* (2004) e Coutinho (1988).

Outro parâmetro necessário para a determinação do valor das ordenadas é $p_{d_{m\acute{a}x}/2}$, que segue a equação (4.3) e na qual, Lourenço *et al.* (2004), aconselham a considerar a situação limite $R=d_{m\acute{a}x}$.

$$p_{d_{m\acute{a}x}/2} = A + 17\sqrt[5]{d_{m\acute{a}x}} + \frac{B}{\frac{R}{d_{m\acute{a}x}} - 0,75} \quad (4.3)$$

Esta curva corresponde ao volume de sólidos da mistura composta por agregados e ligante. Como a composição do ligante foi previamente definida, fez-se uma correção para que a curva apenas refletisse o volume de agregados retidos em cada peneiro. Desta forma, a percentagem de ligante é dada pela equação (4.4):

$$p_{c+s} = \frac{V_c + V_s}{1 - I_v} \times 100 \quad (4.4)$$

onde:

- V_c é o volume de cimento (m^3);
- V_s é o volume das adições (m^3);
- I_v é o índice de vazios (m^3).

Sobrepondo as curvas de Funk e Dinger (1980) e a de Faury corrigida no mesmo gráfico constata-se que a curva de Faury se encontra à direita da primeira para os agregados de maior dimensão, fazendo com que a mistura utilize uma maior percentagem de agregados grossos, como se pode verificar na Figura 4.2 e na Tabela 4.6. Ao utilizar uma maior quantidade de agregados grossos, é necessário compensar a falta de finos com uma maior quantidade de ligante, o que vai contra o objetivo desta dissertação. Por este motivo adotou-se a curva de Funk e Dinger (1980).

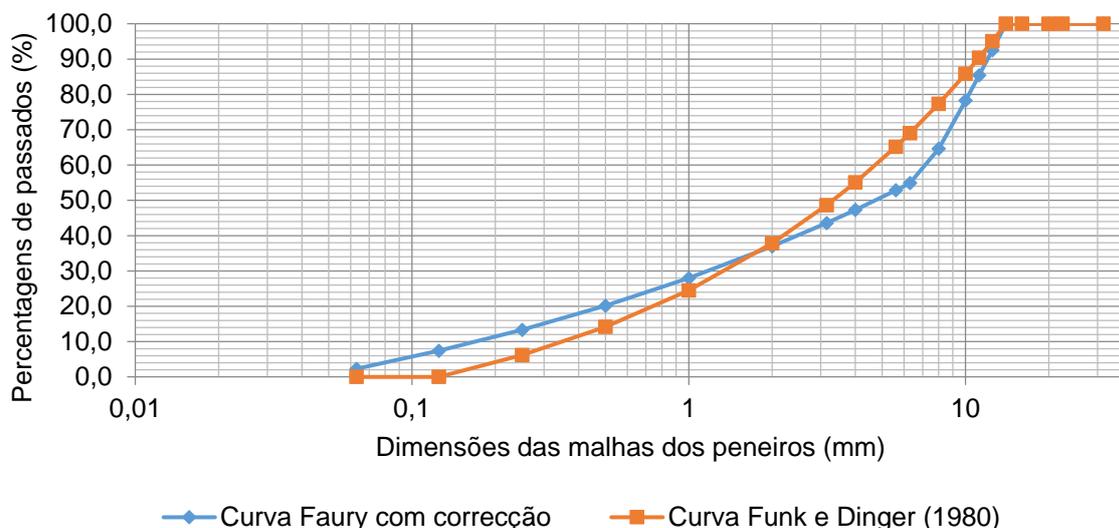


Figura 4.2 - Sobreposição das curvas granulométricas de Faury e de Funk e Dinger (1980)

Tabela 4.6 – Composição dos agregados para as curvas de Faury e de Funk e Dinger (1980)

Composição		Faury	Funk e Dinger (1980)
Areia fina 0/3	(kg/m ³)	793,9	233,4
Areia média 0/4_I	(kg/m ³)	157,6	879,9
Areão	(kg/m ³)	98,9	296,8
Brita1 6/14	(kg/m ³)	985,4	627,8

Após a definição da curva que se assumiu como sendo a ótima, foi necessário calcular as quantidades dos diferentes agregados de forma a obter uma curva real que fosse o mais próximo possível da curva de referência. Com as curvas granulométricas dos agregados, e utilizando o método dos mínimos quadrados, obtém-se uma curva ajustada à real e obtém-se uma estimativa do quadrado das diferenças da mistura de referência e da mistura real, através da equação (4.5). Na Tabela 4.7 apresenta-se uma síntese das diferentes curvas granulométricas.

$$\Delta^2(d) = (P_{Funk\ and\ Dinger} - P_{mistura})^2 \quad (4.5)$$

Obteve-se uma boa aproximação e esta pode ser observada na Figura 4.3. Com a informação da Tabela 4.7 conseguiu-se obter as quantidades de cada agregado necessárias para obter a curva real, ficando assim definida a composição dos agregados para todas as misturas. Como as misturas foram desenvolvidas para uma composição de ligante e compacidade conhecidas, o volume absoluto de agregados fica assim igualmente determinado. Desta forma, como a curva granulométrica utilizada em todas as misturas é a mesma, tem-se pequenas diferenças nas quantidades de agregados devido à variação de volume ocupado pelas partículas de cimento e adições utilizadas nas diversas misturas.

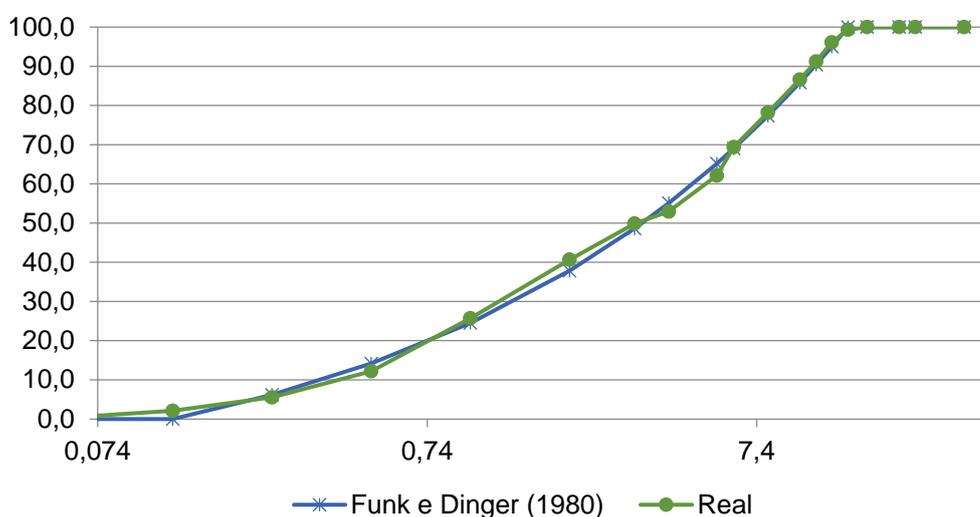


Figura 4.3 - Aproximação da curva real à de referência

Tabela 4.7 – Quadro resumo da curva granulométrica real

Malha	P _{Funk e Dinger (1980)}	P _{mistura}	$\Delta^2 (d)$
0,063	0,0	0,5	0,24
0,125	0,0	2,1	4,46
0,25	6,2	5,5	0,41
0,5	14,2	12,2	3,88
1	24,5	25,7	1,50
2	37,8	40,7	8,00
3,15	48,6	49,9	1,52
4	55,1	52,9	4,51
5,6	65,2	62,1	9,20
6,3	69,0	69,4	0,13
8	77,3	78,2	0,71
10	85,8	86,6	0,62
11,2	90,4	91,2	0,65
12,5	95,0	96,1	1,17
14	100,0	99,3	0,45
16	100,0	100,0	0,00
20	100,0	100,0	0,00
22,4	100,0	100,0	0,00
31,5	100,0	100,0	0,00
MF:	4,8	4,83	$\sqrt{\sum \Delta^2(d)/19} = 1,404$

4.3.2. Superplastificante

A quantidade de superplastificante utilizado em cada mistura foi ajustado durante a primeira fase experimental, na qual se fizeram duas misturas exploratórias.

4.3.3. Volume de água

O cálculo da quantidade de água foi efetuado de acordo com o proposto por Lourenço *et al.* (2004), a partir da compacidade pretendida. Com base no volume do superplastificante e nas estimativas para o volume da parte fluída e para o volume de vazios, calculou-se o volume de água através da equação (4.6).

$$V_{parte\ fluída} = V_w + V_a + V_{sp} \quad (4.6)$$

4.3.4. Composição das misturas

Para uma fácil identificação de cada mistura de betão, optou-se pela seguinte designação 'Tipo de Betão' seguida da 'quantidade de cimento'. Tem-se um betão de referência, RC (*Reference Concrete*), com o limite máximo de cimento, e três betões com variações de ligante, com a denominação LBC (*Low*

Binder Concrete). A indicação da dosagem de cimento presente na denominação da mistura é suficiente para a completa definição do ligante. Nas misturas exploratórias, efetuadas na primeira fase experimental, adicionou-se “_v1” à sua designação. Na segunda fase da parte experimental, a mistura de referência tem a denominação “_v2”. Como exemplo, a mistura LBC125_v1 refere-se a uma mistura LBC, com 125 kg de cimento e caracterizado na primeira fase experimental.

Na Tabela 4.8, encontra-se a composição de todas as misturas estudadas nas duas fases experimentais.

Tabela 4.8 – Composição das misturas estudadas em ambas as fases experimentais

Composição	1ª fase		2ª fase				
		RC250_v1	LBC125_v1	RC250_v2	LBC125	LBC100	LBC75
CEM I - 52,5 R	(kg/m ³)	250,00	125,00	250,00	125,00	100,00	75,00
Fíler calcário	(kg/m ³)	-	125,00	-	125,00	100,00	75,00
Cinzas volantes	(kg/m ³)	-	-	-	-	50,00	100,00
Basf Glenium Sky 526 (% kg/kg CEM I)	(%)	1,50	2,00	0,50	2,00	2,20	3,00
Areia 0/3	(kg/m ³)	122,80	121,80	218,20	44,00	43,70	43,50
Areia 0/4_I	(kg/m ³)	984,10	976,20	817,10	1080,10	1073,90	1067,60
Areão 4/8	(kg/m ³)	296,60	294,20	277,60	287,20	285,50	283,90
Brita1 6/14	(kg/m ³)	628,30	623,30	587,00	630,60	626,90	623,30
Água	(kg/m ³)	126,50	127,60	178,80	117,64	118,10	117,90
Água/Cimento ratio	(-)	0,51	1,02	0,72	0,94	1,18	1,57
Água/ligante ratio	(-)	0,51	0,51	0,72	0,47	0,47	0,47
Compacidade	(-)	0,85	0,85	0,80	0,86	0,86	0,86
Ar	(%)	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00

4.4. Ensaios realizados

4.4.1. Ensaios do betão no estado fresco

Nos ensaios de caracterização do betão no estado fresco a amostra deve ser representativa do volume total de amassadura e deve estar protegida, de forma a conservar as suas características, como referido na NP EN 12350-1:2002.

O dispositivo utilizado para compactação do betão foi, em todos os casos, uma mesa vibratória, com frequência mínima de 40 Hz (2 400 ciclos/minuto), devido à referida pouca plasticidade que o betão apresentava no estado fresco.

Efetuarão-se os seguintes ensaios, segundo as normas igualmente indicadas:

- Abaixamento Cone de Abrams – NP EN 12350-2:2002;
- Grau de compactabilidade – NP EN 12350-4:2002;
- Massa volúmica – NP EN 12350-6:2002;
- Determinação do teor de ar – NP EN 12350-7:2002.

4.4.1.1. Abaixamento do Cone de Abrams

O resultado deste ensaio é a medida do abaixamento (h) que o provete sofre ao ser desmoldado. A mesma norma afirma que o ensaio só é válido caso o provete mantenha a sua forma, ou seja, que tenha um abaixamento verdadeiro como exemplificado na situação da esquerda na Figura 4.4. Caso o provete tenha um abaixamento como o representado do lado direito da mesma figura, será necessário colher outra amostra e repetir o ensaio. Também é referido que se o provete se desmoronar duas vezes consecutivas, este tipo de ensaio não é adequado para analisar a trabalhabilidade da mistura.

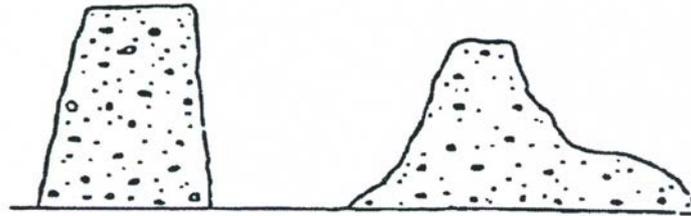


Figura 4.4 - Abaixamento verdadeiro (à esquerda) e abaixamento deformado (à direita) (NP EN 12350-2:2002)

4.4.1.2. Grau de compactabilidade

Como este tipo de misturas tem na sua composição uma quantidade limitada de água, determinou-se a consistência do betão pelo grau de compactabilidade, sendo que este deverá estar no intervalo entre 1,04 e 1,46 para que este ensaio seja adequado à consistência da mistura.

O grau de compactabilidade é dado pela distância entre a superfície do betão compactado e o bordo superior do recipiente, cujas dimensões são 200x200x400 mm, e é calculado através da expressão (4.7):

$$c = \frac{h_1}{h_1 - s_c} \quad (4.7)$$

em que,

h_1 é a altura interior do recipiente (mm)

s_c é o valor médio, com aproximação ao milímetro, das quatro distâncias entre a superfície do betão compactado e o bordo superior do recipiente.

4.4.1.3. Massa volúmica

A massa volúmica, D, é dada pela expressão (4.8):

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (4.8)$$

onde:

D é a massa volúmica do betão fresco (kg/m^3);

m_1 é a massa do recipiente (kg);

m_2 é a massa do recipiente com o provete de betão fresco (kg);

V é o volume do recipiente (m^3).

4.4.1.4. Determinação do teor de ar

Para a determinação do volume de vazios utilizou-se o procedimento descrito na secção 5 da NP EN 12350-7:2002.

O volume do recipiente utilizado foi de 1 l em vez do volume nominal mínimo de 5 l como descrito na norma. Desta forma, pode-se registar um erro na determinação do teor de ar, devido ao efeito de parede, o qual é tanto mais notório quanto menor é a relação entre a área de superfície e o volume total.

Este grau de imprecisão é aceite, porque a determinação do teor de ar serve apenas de controlo ao volume de vazios definido aquando da composição das misturas de betão. O volume de vazios também é validado através do volume de betão que resta após encher os moldes.

4.4.2. Ensaios de betão no estado endurecido

Para os ensaios no estado endurecido, a geometria e dimensões dos provetes devem respeitar o previsto na NP EN 12390-1:2002 e as condições de execução e cura dos mesmos devem respeitar o previsto na NP EN 12390-2:2002.

O dispositivo utilizado para compactação do betão foi, em todos os casos, a mesa vibratória e utilizou-se uma prensa hidráulica, com capacidade de 3000 kN, para a realização dos ensaios.

Efetuaram-se os seguintes ensaios, segundo as normas igualmente indicadas:

- Resistência à compressão aos 1, 3, 7, 28 e 56 dias – NP EN 12390-3:2002;
- Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias – NP EN 12390-6:2011;
- Módulo de elasticidade aos 28 dias – especificação LNEC E 397:1993.

4.4.2.1. Resistência à compressão

Para avaliar a capacidade resistente do betão à compressão uniforme, os provetes são submetidos a um carregamento crescente até se atingir a rotura. Este ensaio realiza-se em provetes cúbicos de 150 mm de aresta a diferentes idades. Na presente campanha de caracterização do betão à compressão foi ensaiado um provete às 24 h, dois provetes aos 3 dias, dois provetes aos 7 dias, cinco provetes aos 28 dias (três com cura e dois sem), e dois provetes aos 56 dias. Todos os provetes foram desmoldados às 24 horas, tendo sido de seguida colocados numa câmara de cura húmida até à data do ensaio.

Antes do ensaio, o provete deve ser pesado e, depois de ensaiado, deve ser inspecionado para verificar se a rotura não ocorreu devido a um erro de posicionamento do provete no centro da prensa, originando trações.

A resistência à compressão de um dado provete é dada pela seguinte expressão:

$$f_j = \frac{F}{A_c} \quad (4.9)$$

onde:

f_j é a resistência à compressão do provete à data do ensaio (MPa);

F é a força máxima aplicada no provete (N);

A_c é a área da secção transversal do provete na qual a força é aplicada (mm^2).

A resistência à compressão de cada mistura e para cada idade é dada pela média aritmética simples dos resultados obtidos de acordo com a Eq. (4.9).

4.4.2.2. Resistência à tração por compressão diametral

A metodologia adotada na presente campanha é a descrita na NP EN 12390-6:2011, sendo a tensão de rotura obtida por compressão diametral, em que se aplica uma carga de faca ao longo da geratriz do provete, originando tensões de tração ortogonais ao plano de carregamento até o provete atingir o colapso, Figura 4.5.

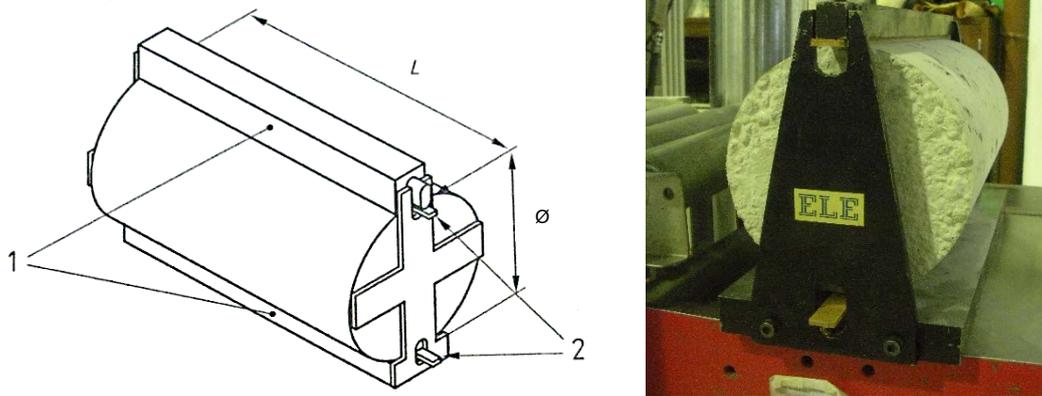


Figura 4.5 – Esquema de ensaio segundo a NP EN 12390-6:2011 (à esquerda) e provete em ensaio (à direita)

onde,

1 – Peças em aço para aplicação da força;

2 – Faixas de cartão prensado;

L – Comprimento do provete;

Ø – Diâmetro do provete.

Realiza-se o ensaio em provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Na presente campanha de caracterização do betão à tração foram ensaiados três provetes aos 28 dias. Todos os provetes foram desmoldados às 24 horas e de seguida foram colocados numa câmara de cura húmida até à data do ensaio.

A resistência à tração é dada pela seguinte expressão:

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad (4.10)$$

onde:

f_{ct} é a resistência à tracção por compressão diametral (MPa);

F é a força máxima aplicada aos provetes (N);

L é o comprimento da geratriz do provete (mm);

d é o diâmetro da secção transversal do provete (mm).

A resistência à tração de cada mistura é dada pela média aritmética simples dos resultados de acordo com a Eq. (4.10).

4.4.2.3. Módulo de elasticidade

A determinação do módulo de elasticidade realizou-se de acordo com a especificação LNEC E 397, utilizando provetes prismáticos de 100x100x400 mm³, aos 28 dias de idade. As deformações longitudinais são medidas através de um alongâmetro, após se ter colado os *demec's* de fixação nas faces exteriores do provete. O ensaio termina quando a diferença da variação da extensão, entre ciclos consecutivos, é inferior ao erro especificado.

Todos os provetes foram desmoldados às 24 horas e de seguida foram colocados numa câmara de cura húmida até à data do ensaio.

4.5. Apresentação e análise dos resultados experimentais obtidos

Neste subcapítulo são apresentados os resultados obtidos nas diferentes fases experimentais, tentando sempre que possível compará-los com os valores expectáveis e com os valores correspondentes à mistura de referência. Também se efetuou uma análise comparativa com os valores previstos pelo Eurocódigo 2 (2010) e pelo Model Code 2010.

4.5.1. Resultados da primeira fase experimental

Na primeira fase da campanha experimental pretendeu-se realizar um pequeno estudo sobre o comportamento de LBC em estado fresco e endurecido. Procedeu-se à formulação de quatro misturas, com a mesma quantidade de ligante, mas com diferentes quantidades de cimento. Inicialmente, produziram-se duas misturas, RC250_v1 e LBC125_v1, que serviram para testar as quantidades mínimas de água e adjuvante e calcular a resistência à compressão aos 7 e 28 dias, tendo-se produzido dois provetes cúbicos para cada idade, por mistura.

Nesta fase exploratória não se efetuou um estudo muito aprofundado das características mecânicas enunciadas no subcapítulo anterior, porque as misturas aqui ensaiadas podiam sofrer alterações na sua composição e dessa forma alterar as suas propriedades mecânicas.

4.5.1.1. Resultados do estudo do betão no estado fresco

4.5.1.1.1. Abaixamento do Cone de Abrams

O valor do abaixamento do cone de Abrams variou entre os 160 e 190 mm, mas observou-se que os provetes em ambas as misturas se desmoronavam (Figura 4.6), não tendo por isso um abaixamento verdadeiro. Como em cada mistura se verificou o desmoronamento em dois ensaios consecutivos, de acordo com a NP EN 12350-2:2002, o betão não apresenta a plasticidade e coesão adequadas para este ensaio.



Figura 4.6 – Ilustração do abaixamento deformado do cone de Abram's

4.5.1.1.2. Massa volúmica

A massa volúmica para a mistura RC250_v1 foi de 2429 kg/m³.

4.5.1.1.3. Determinação do teor de ar

O teor de ar foi definido em simultâneo com a composição das misturas, tendo sido feita apenas a verificação do mesmo através do volume de betão restante. Como o resto da mistura foi de 90 % do volume expectável, concluiu-se que ambas as misturas têm uma compacidade ligeiramente superior ao definido.

4.5.1.2. Resultados do betão no estado endurecido

4.5.1.2.1. Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi efetuado apenas em quatro provetes por mistura, dois provetes aos 7 dias e dois provetes aos 28 dias. Na Tabela 4.9 encontram-se os valores médios obtidos, salientando-se a resistência obtida para a mistura RC250_v1, de 60 MPa aos 28 dias, contendo apenas 250 kg/m³ de cimento. Os valores dos ensaios individuais encontram-se no Anexo A2.

Tabela 4.9 - Resistência à compressão das misturas RC250_v1 e LBC125_v1

Resistência à compressão		RC250_v1	LBC125_v1
Resistência de compressão - 7 dias	(MPa)	50,31	18,98
Resistência de compressão - 28 dias	(MPa)	59,48	25,05

Na Tabela 4.10 indicam-se os valores de resistência média obtidos aos 28 dias com os valores previstos pela Expressão de Feret, presente na equação (2.3), e observa-se uma diferença de 25 % e 44 % nas misturas RC250_v1 e LBC125_v1, respetivamente.

Fennis (2011) também obteve resultados superiores aos teóricos e atribui esta diferença à elevada compacidade da mistura. Com efeito, aumentando a compacidade de uma mistura, aproximam-se as partículas de cimento, aumentando assim o valor da resistência à compressão do betão. Para o coeficiente de Feret, k_{28} , relativo a um cimento CEM I 52,5 R, foi adotado o valor de 380, sendo este empírico e não dependente da relação cimento/ligante, de acordo com Popovics (1998), citado por Guerra (2013), Lourenço *et al.* (2004) e Costa (2012).

Tabela 4.10 - Comparação da resistência aos 28 dias com a previsão pela Expressão de Feret

	RC250_v1	LBC125_v1
k_{28}	380	380
V_c	0,0801	0,0401
V_w	0,1265	0,1276
V_a	0,02	0,02
f_c (MPa)	47,48	17,34
f_{cm} (MPa)	59,48	25,05
Δ (%)	25,27	44,43

As misturas estudadas nesta fase têm na sua composição quantidades de cimento inferiores às regulamentares e sendo o coeficiente de Feret apenas influenciado pelo tipo de cimento que se utiliza nas misturas, é expectável que a diferença entre a resistência teórica, f_c , e a obtida nos resultados experimentais aumente, com a diminuição do uso de cimento ou pela sua substituição por adições.

4.5.1.3. Consequências para a segunda fase experimental

As compacidades das duas misturas são ligeiramente superiores a 0,85, porque o volume do restante de material foi inferior ao previsto (0,9 l), estando a mistura a ocupar um volume inferior. Desta forma, para a 2ª fase experimental previu-se uma alteração da composição das misturas, passando a compacidade de 0,85 para 0,86.

Em relação à mistura LBC125_v1, observou-se uma ligeira exsudação, pelo que se considera que se pode diminuir a quantidade de adjuvante para 1,5 % da massa do cimento ou a quantidade de água.

Como a resistência à compressão aos 28 dias da mistura RC250_v1 é da ordem dos 60 MPa, optou-se por diminuir a compactidade e assim obter uma resistência aos 28 dias da mesma ordem de grandeza da mistura LBC125_v1. Assim sendo, a mistura terá uma relação de água/cimento superior, sendo necessária uma menor quantidade de superplastificante.

4.5.2. Resultados da segunda fase experimental

Nesta fase fabricaram-se todas as misturas para posterior realização de ensaios de caracterização do betão, tanto no estado fresco como no estado endurecido. A composição de todas as misturas realizadas nesta fase podem ser consultadas na Tabela 4.8.

Na Tabela 4.11 encontra-se um resumo do número total de ensaios realizados, bem como a forma e dimensão de cada provete.

Tabela 4.11 – Resumo do número de provetes para cada tipo de ensaio

Ensaio	Idades (dias)	Nº de provetes	Forma	Dimensões (mm)	Total de provetes (x4)
Resistência à compressão	1	1	Cubo	150	48
	3	2			
	7	2			
	28 c/ cura	3			
	28 s/ cura	2			
	56	2			
Resistência à tração por compressão diametral	28	3	Cilindro	d=150 ; h=300	12
Módulo de elasticidade	28	2	Prisma	a=b=100 ; h=400	8

4.5.2.1. Resultados do betão no estado fresco

4.5.2.1.1. Abaixamento do cone de Abrams

Como referido anteriormente, a avaliação da consistência pelo cone de Abrams não se aplica a misturas de LBC. Desta forma e de acordo com o estudo desenvolvido por Alves (2016), a avaliação da consistência foi feita através do ensaio de compactabilidade, cujos resultados se apresentam no ponto 4.5.2.1.2.

4.5.2.1.2. Ensaio de compactabilidade

Os resultados obtidos para o grau de compactabilidade das misturas estudadas nesta fase encontram-se na Tabela 4.12 e conclui-se que todas são de classe C2, de acordo com a NP EN 206-1:2007.

Tabela 4.12 – Grau de compactabilidade das misturas RC250_v1, LBC125, LBC100 e LBC75

Tipo betão	c
LBC125	1,23
LBC100	1,21
LBC75	1,21

4.5.2.1.3. Massa volúmica

A massa volúmica destas misturas é ligeiramente superior ao valor corrente, devido à maior compactidade das misturas, e é da mesma ordem de grandeza que os valores obtidos por Fennis (2011). A massa volúmica foi medida em dois provetes, para cada mistura, e os seus valores médios encontram-se indicados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Massa volúmica das misturas RC250_v2, LBC125, LBC100, LBC75 e LBC125_V2

Tipo betão	Massa volúmica média (kg/m ³)
RC250_v2	2350
LBC125	2450
LBC100	2390
LBC75	2370
LBC125_V2	2400

O valor da massa volúmica para a mistura LBC125 é superior às restantes devido à maior quantidade do agregado designado por "brita1".

4.5.2.1.4. Teor de ar

Nesta fase, para além da verificação do volume de vazios através do resto da mistura, também se efetuou a medição do teor de ar através do método manométrico e os valores obtidos para o teor de ar aparente nas quatro misturas variou entre 2,4 e 2,6 %. Assim sendo, e como já referido na secção 4.4.1.4, o facto de se usar um recipiente de 1 l de capacidade aumenta a ocorrência do efeito de parede e faz com que este valor tenha um grau de incerteza associado. Como os valores obtidos pelo método experimental são semelhantes ao adotado durante a composição da mistura, considera-se que o valor de 2 % é uma boa estimativa para o volume de ar em todas as misturas.

4.5.2.2. Resultados do betão no estado endurecido

4.5.2.2.1. Resistência à compressão

Na Tabela 4.14, encontram-se as resistências médias à compressão em várias idades e para as quatro misturas.

Destaca-se que a mistura LBC125 obteve um aumento de 24 % na resistência média à compressão aos 28 dias comparativamente à mistura LBC125_v1, devido ao aumento da compactidade em 1 %.

Na Figura 4.7, encontra-se representada a evolução da resistência à compressão média para as misturas ensaiadas em ambas as fases experimentais. Salienta-se o facto das misturas que contêm material pozolânico, misturas LBC100 e LBC75, terem um acréscimo de resistência a partir dos 28 dias de idade superior às restantes misturas, como referido pelos autores Coutinho (1988) e Fennis (2011).

Tabela 4.14 - Propriedades médias para as misturas RC250_v2, LBC125, LBC100 e LBC75

Propriedades mecânicas		RC250_v2	LBC125**	LBC100	LBC75
Resistência de compressão - 1 dias		7,91	12,27	7,17	4,39
Resistência de compressão - 2 dias*		15,25	17,90	-	-
Resistência de compressão - 4 dias*		-	-	13,41	8,54
Resistência de compressão - 7 dias	(MPa)	25,68	25,40	16,35	11,64
Resistência de compressão - 28 dias		33,83	31,06	24,90	20,33
Resistência de compressão - 56 dias		34,30	33,86	28,00	26,47

* Os provetes não foram ensaiados aos 3 dias de idade como estipulado no programa experimental, porque as amassaduras foram realizadas à quarta e quinta-feira, não sendo possível realizar o ensaio de compressão durante o fim-de-semana;

** Ocorreu um erro na medição da brita, fazendo com que esta mistura tivesse uma quantidade superior de brita na sua composição. Validou-se a mistura após comparação da resistência à compressão aos 7 dias de idade com a mistura LBC125_v2, verificando que são da mesma ordem de grandeza (variação de 4 %).

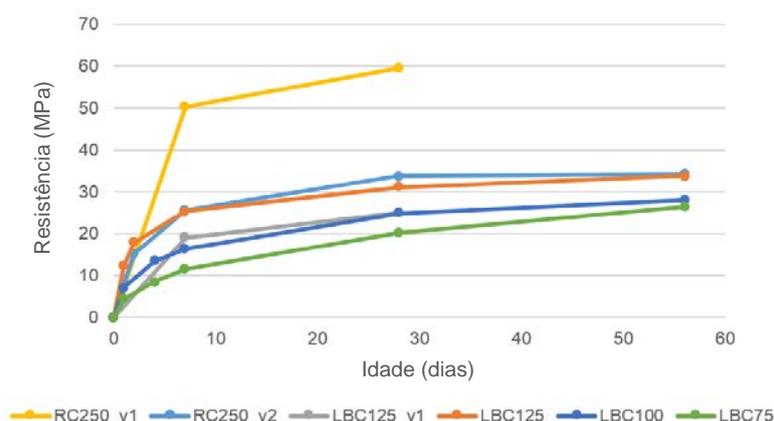


Figura 4.7 - Desenvolvimento da resistência à compressão das misturas RC250_v1, RC250_v2, LBC125_v1, LBC125, LBC100 e LBC75

Refere-se também que a resistência atingida aos 56 dias pelas misturas LBC100 e LBC75 é idêntica, apesar desta última ter menos 25 kg de cimento por metro cúbico de betão.

Nas misturas que contêm cinzas volantes, é necessário considerar uma quantidade de cimento equivalente, utilizando o conceito do fator-k como proposto na NP EN 206-1:2007.

Desta forma, a quantidade máxima de cinzas volantes, em massa, que pode ser considerada para o cálculo da razão $\frac{\text{água}}{\text{cimento} + k \times \text{cinzas volantes}}$ é:

$$\frac{\text{cinzas volantes}}{\text{cimento}} \leq 0,33 \quad (4.11)$$

Como se utilizou uma quantidade superior de cinzas volantes, a sua totalidade não poderá ser considerada. Já para o valor de k, a EN 197-1 indica que para um cimento CEM I 52,5 se deve considerar 0,4. Toda a informação encontra-se resumida na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 - Quantidade de cimento equivalente pelo fator-k

	CEM I 52,5 R (kg/m ³)	Cinzas (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Máx. Cinzas (4.11) (kg/m ³)	k (-)	Cinzas eq. (kg/m ³)	C _{eq} (kg/m ³)	A/C (-)	A/C _{eq} (-)
RC250_v1	250	0	126,5	0,00	0,4	0,00	250,0	0,51	0,51
RC250_v2	250	0	179,3	0,00	0,4	0,00	250,0	0,72	0,72
LBC125_v1	125	0	127,6	0,00	0,4	0,00	125,0	1,02	1,02
LBC125	125	0	117,7	0,00	0,4	0,00	125,0	0,94	0,94
LBC100	100	50	118,1	33,00	0,4	13,20	113,2	1,18	1,04
LBC75	75	100	117,9	24,75	0,4	9,90	84,9	1,57	1,39

Na Tabela 4.16, apresenta-se uma comparação entre as resistências à compressão, aos 28 dias, medidas experimentalmente, com a correspondente previsão de acordo com a Expressão de Feret (2.3) e conclui-se que esta expressão não é adequada para misturas em que a compactidade é elevada e quando existe substituição de cimento por materiais pozolânicos.

Tabela 4.16 - Comparação dos resultados experimentais com a previsão pela Expressão de Feret

	RC250_v1	RC250_v2	LBC125_v1	LBC125	LBC100	LBC75
k ₂₈	380	380	380	380	380	380
V _c	0,0801	0,0801	0,0401	0,0401	0,03779	0,02834
V _w	0,1265	0,1793	0,1276	0,1176	0,1176	0,1179
V _a	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
f _c (MPa)	47,48	31,23	17,34	19,34	17,63	11,05
f _{cm} (MPa)	59,48	33,83	25,05	31,06	24,90	20,33
Δ (%)	25,27	8,31	44,43	60,59	41,21	84,04

Como referido anteriormente, verifica-se o aumento da diferença entre f_c e f_{cm} à medida que a quantidade de cimento vai sendo reduzida. A diferença é mínima para a mistura RC250_v2 devido ao facto de se ter uma quantidade de cimento perto da mínima regulamentada (260 kg/m³) e pela trabalhabilidade da mistura ser idêntica à do betão corrente.

Nesta fase, também se comparou a influência da cura na resistência à compressão do betão aos 28 dias e concluiu-se que quanto menor for a quantidade de cimento numa mistura de betão, maior importância se deve dar à cura do betão, como se pode verificar pela diferença de resistência em percentagem na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 - Comparação da resistência média à compressão aos 28 dias com e sem cura

Tipos	Com cura (MPa)	Sem cura (MPa)	Δ (%)
RC250_v2	33,83	30,91	-8,63
LBC125	31,06	30,51	-1,76
LBC100	24,90	21,89	-12,10
LBC75	20,33	17,40	-14,41

As diferenças obtidas são inferiores às obtidas por Fennis (2011) para uma mistura com 125 kg de cimento e 125 kg de cinzas volantes, em que a diferença da resistência à compressão com e sem cura se encontra entre os 20 e os 10 % para provetes com um e três dias de cura, respetivamente.

4.5.2.2. Resistência à tração por compressão diametral

Na Tabela 4.18 encontra-se a resistência média à tração por compressão diametral e a relação entre esta e a resistência à compressão para as quatro misturas. A resistência à tração das misturas diminui à medida que aumenta a parte do cimento que é substituído por adições, mas a relação entre as resistências à tração e à compressão mantém-se na ordem dos 10 %, tal como nas misturas de betão corrente.

Tabela 4.18 - Resistência à tração por compressão diametral para RC250_v2, LBC125, LBC100 e LBC75

		RC250_v2	LBC125	LBC100	LBC75
f_{ctm}	(MPa)	3,45	2,80	2,55	2,25
f_{ctm} / f_{cm}		0,10	0,09	0,10	0,11

4.5.2.2.3. Módulo de elasticidade

O valor médio do módulo de elasticidade obtido para cada mistura encontra-se na Tabela 4.19 e destacam-se os seus elevados valores, conforme já evidenciado por Proske *et al.* (2014). O valor para a mistura LBC125 encontra-se a vermelho, pois atribui-se o seu elevado valor à presença de uma maior quantidade de brita1 na sua composição.

As expressões presentes nos regulamentos Eurocódigo 2 (2010) e Model Code 2010 são as equações (4.12) e (4.13), respetivamente. Os dois regulamentos têm em consideração a influência do tipo de agregado utilizado na composição das misturas no seu módulo de elasticidade. O valor da primeira expressão deverá ser reduzido em 10 % quando se utilizarem agregados do tipo calcário, enquanto na segunda expressão a referida influência é traduzida no valor dos parâmetros E_{c0} e α_E .

$$E_{cm} = 22 \left[f_{cm} / 10 \right]^{0,3} \quad (4.12)$$

$$E_{ci} = E_{c0} \times \alpha_E \left(f_{cm} / 10 \right)^{1/3} \quad (4.13)$$

onde,

f_{cm} é a resistência do betão à compressão aos 28 dias, em MPa;

$E_{c0} \times \alpha_E$ toma o valor de 19400 MPa, para agregados de origem calcária.

Tabela 4.19 - Módulo de elasticidade para as misturas RC250_v2, LBC125, LBC100 e LBC75

	RC250_v2	LBC125	LBC100	LBC75
Valores obtidos (GPa)	38,1	42,3	36,0	37,4
Eurocódigo 2 (2010) (GPa)	26,7	26,0	24,3	22,9
Model Code 2010 (GPa)	27,0	26,3	24,4	22,8

Conclui-se que todas as misturas apresentam um valor do módulo de elasticidade superior ao previsto pelos regulamentos. Na Figura 4.8 faz-se uma comparação gráfica entre as curvas teóricas dos dois regulamentos e os valores obtidos para as quatro misturas.

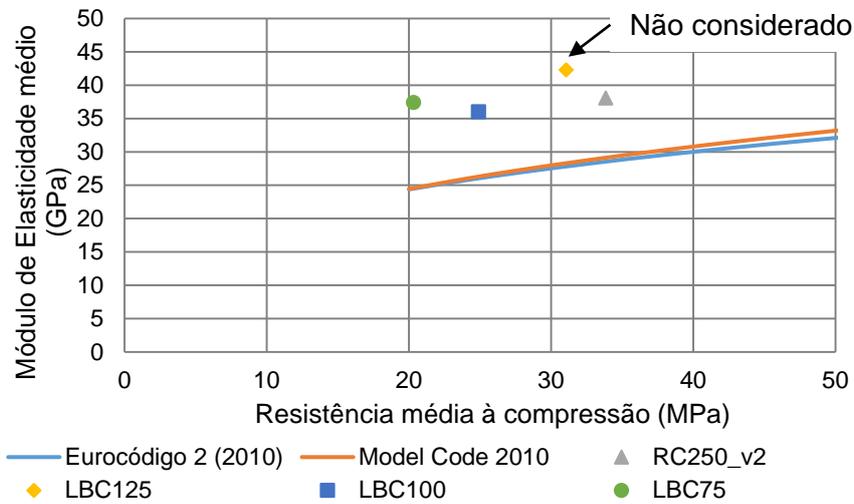


Figura 4.8 – Comparação dos valores do módulo de elasticidade obtidos com os teóricos

4.6. Considerações finais

Durante a vibração do betão colocado nos moldes observou-se que as misturas LBC necessitavam de maior energia de vibração do que o betão corrente, corroborando as observações de Proske *et al.* (2014). Também se concluiu que o ensaio do cone de Abrams não pode ser utilizado para avaliar a trabalhabilidade destas misturas. A baixa trabalhabilidade dos LBC é o único parâmetro negativo destas misturas, observado neste estudo.

Relativamente às características em estado endurecido, observou-se que a resistência à compressão aos 28 dias prevista pela Expressão de Feret não se adequa às misturas LBC, mesmo fazendo uso do conceito de cimento equivalente. Atribui-se esta diferença entre os resultados experimentais e os obtidos com a Expressão de Feret à elevada compacidade que estas misturas possuem.

A influência da quantidade de água na resistência à compressão dos LBC é verificada quando se comparam as misturas RC250_v1 e RC250_v2, onde o valor da resistência à compressão aos 28 dias diminuiu de 60 para 34 MPa.

Nas misturas LBC100 e LBC75, observou-se um ganho de resistência à compressão a partir dos 28 dias devido à presença de cinzas volantes na composição destas misturas.

Em relação à resistência à tração, avaliada através de ensaios de compressão diametral, observa-se que estas misturas mantêm a relação de 10 % entre a resistência à tração e à compressão presente nas misturas correntes.

Quando se comparam os resultados experimentais com os previstos pelos regulamentos Eurocódigo 2 (2010) e Model Code 2010, constata-se que o módulo de elasticidade dos LBC é superior ao do betão corrente, provavelmente devido à densa matriz formada pelos agregados.

5. CARACTERIZAÇÃO DA ADERÊNCIA

Ao longo deste capítulo descreve-se o estudo experimental desenvolvido com vista à caracterização da aderência entre varões de aço inoxidável e diferentes composições de LBC, principal objetivo desta dissertação.

Relativamente ao LBC utilizado nos ensaios, escolheram-se as misturas com a maior e menor resistências à compressão, de forma a caracterizar o melhor possível a influência desta propriedade na aderência. Para referência utilizou-se um betão corrente, C250 com 250 kg de cimento por m³ de betão.

Utilizaram-se dois tipos de varões de aço inox com diâmetros 12 e 16 mm e, para servir de referência, armaduras correntes de aço A500 NR SD com os mesmos diâmetros.

Apresenta-se em primeiro lugar o programa experimental adotado para cumprir os objetivos propostos, descrevendo as variáveis presentes, a instalação e a metodologia de ensaio, passando em seguida pela caracterização dos materiais e misturas empregues e termina-se com a apresentação e análise dos resultados obtidos.

5.1. Programa experimental para caracterização da aderência

A realização dos ensaios de arrancamento pretende explorar o comportamento da aderência neste tipo de betões, impondo à partida a variação de diversos parâmetros considerados neste trabalho.

Para reduzir a dispersão de resultados, típica dos programas experimentais de caracterização de aderência, e para não existirem dúvidas na análise de resultados, foram preparados cinco provetes nas mesmas condições, ou seja, com o mesmo diâmetro (12 e 16 mm), o mesmo tipo de aço (AISI ou A500) e a mesma amassadura de betão (1^a e 2^a amassadura de cada tipo de betão – C250; LBC125; LBC75).

Para uma fácil identificação de cada provete, optou-se pela seguinte designação “Tipo Betão_Tipo Aço e Diâmetro_nº Provete”. Como exemplo, o provete com a designação LBC125_i12_3, refere-se ao provete número 3 executado com betão LBC125 com um varão de aço inoxidável e diâmetro 12 mm.

5.1.1. Variáveis a ensaiar

No presente estudo, as variáveis envolvidas são a resistência do betão à compressão, o tipo de aço dos varões, o diâmetro dos varões e o perfil nervurado, onde se estuda a influência do valor da área relativa das nervuras transversais, f_R , e a altura máxima das nervuras.

5.1.2. Tipo de ensaio adotado

O ensaio escolhido para caracterizar a aderência entre os dois materiais foi o ensaio de arrancamento, conhecido na literatura como *pull-out test*. Este ensaio tem como princípio a imposição de uma força de tração a um varão embebido em betão, num determinado comprimento aderente.

Para avaliar a tensão de aderência entre os dois tipos de varões de aço nervurados e as três misturas de betão, seguiu-se o método descrito no Anexo D da EN 10080:2005, que por sua vez se baseia nas recomendações RILEM-Recommendation RC 6 Bond test for reinforcement steel – 2. Pull-out test, 1983.

Para este ensaio utilizam-se provetes cúbicos de betão onde o varão se encontra posicionado no centro, com um comprimento aderente de cinco vezes o diâmetro, ficando a restante parte do varão desligada do betão. O varão, cuja aderência se pretende caracterizar, prolonga-se para fora das duas faces de betão, sendo a tração aplicada na extremidade mais comprida, enquanto o equipamento de medição do escorregamento se encontra na extremidade mais curta e livre. Na Figura 5.1 representa-se o princípio do ensaio de arrancamento.

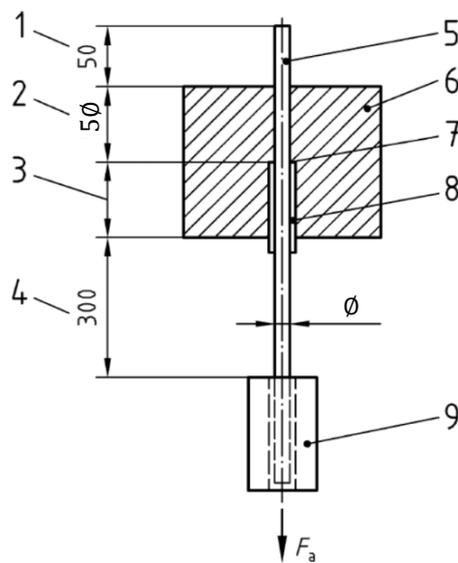


Figura 5.1 – Esquema do ensaio de arrancamento (EN10080:2005 – Anexo D)

As dimensões são indicadas em mm e os números têm o significado a seguir indicado:

1. Ponta do varão livre para se fixa o aparelho para medição do escorregamento;
2. Zona aderente do varão;
3. Zona não aderente do varão;
4. Ponta do varão mais comprida onde se aplica a força de tração;
5. Varão;
6. Cubo de betão;
7. Obturação;
8. Filme de plástico;
9. Zona de amarração das garras;

F_a representa o sentido a força de tração.

A força máxima de rotura é transformada em tensão de aderência segundo (5.1):

$$\tau_{dm} = \frac{F_a}{5 \times \pi \times \phi^2} \frac{f_{cm}}{f_j} \quad (5.1)$$

onde,

F_a representa a força máxima em kN;

\emptyset representa o diâmetro do varão;

f_{cm} representa o valor médio da resistência à compressão aos 28 dias;

f_j representa a resistência média à compressão à data do ensaio.

O valor de resistência média à compressão à data do ensaio é obtido a partir da curva de evolução da resistência do betão à compressão, tendo em conta os resultados dos ensaios de dois provetes aos 3, 7, 14, 56 e 84 dias e de três provetes aos 28 dias de idade para a primeira amassadura. Em relação à segunda amassadura esta segue a mesma metodologia, mas passa pelo ponto da resistência média à compressão dos três provetes ensaiados aos 28 dias com o betão produzido na segunda amassadura. Em relação ao valor de f_{cm} , utilizou-se a resistência média à compressão aos 28 dias para a primeira amassadura. Nas Figuras 5.2 e 5.3 encontram-se as características gerais dos provetes para os varões de diâmetro 12 e 16 mm, respetivamente.

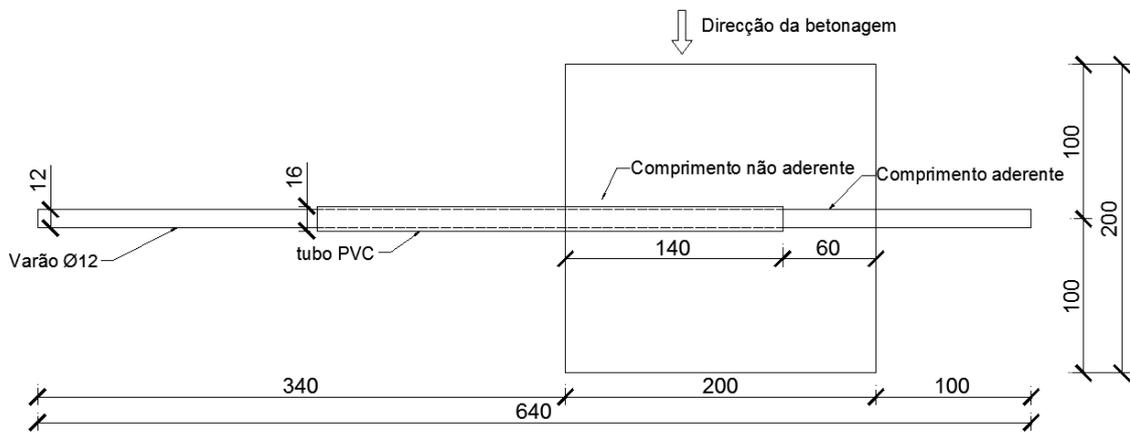


Figura 5.2 – Características gerais dos provetes com varões Ø12 mm

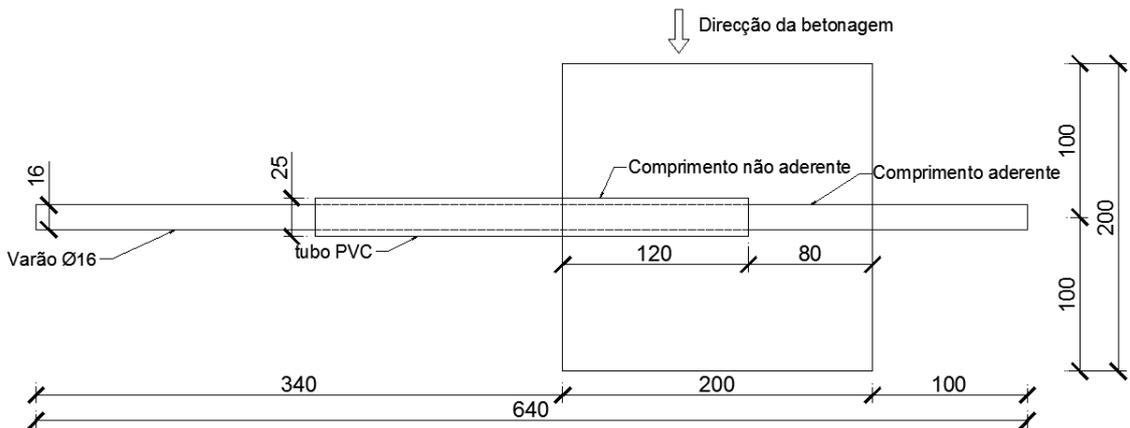


Figura 5.3 – Características gerais dos provetes com varões Ø16 mm

5.1.3. Sistema de ensaio

O sistema de ensaio utilizado para os ensaios de arrancamento é constituído por uma máquina hidráulica servo-controlada com 1000 kN de capacidade máxima, um acessório para instalação dos

provetes, um calço de madeira, um sistema de medição constituído por um transdutor de deslocamentos e uma unidade de aquisição automática de dados e um acessório para ligar o transdutor de deslocamentos ao varão.



Figura 5.4 – Aspeto geral do sistema de ensaio de arrancamento

5.1.3.1. Máquina hidráulica servo-controlada

A máquina hidráulica servo-controlada, Schenck LPM EQ 02, utilizada permite a aplicação de forças de compressão e tração com uma capacidade de 1000 kN em regime estático e de 800 kN em regime dinâmico. O curso do êmbolo é de ± 125 mm e a distância máxima entre garras é de 1500 mm.

De acordo com a última calibração realizada pela Unidade de Metrologia do LNEC no dia 20 de Fevereiro de 2015, este equipamento é da classe 0,5 de acordo com a EN ISO 7500-1:2006 e o valor relativo máximo da incerteza expandida em cada intervalo de medição é de 0,48 % da força medida, para os níveis de força envolvidos nos ensaios deste estudo.

5.1.3.2. Acessório para instalação dos provetes

Para que a realização dos ensaios de arrancamento fossem efetuados na máquina descrita no ponto anterior recorreu-se à utilização de um acessório de ensaio, utilizado num estudo anterior [Louro, 2014], que se encontra aparafusado ao cabeçote inferior do equipamento de ensaio.

O acessório foi dimensionado, no âmbito de um estudo [Louro, 2014] anteriormente referido, para que permanecesse aproximadamente indeformável para o nível de força expectável durante a realização

dos ensaios, sendo as quatro colunas roscadas executadas em aço 42 Cr Mo 4, de elevado limite elástico, e as chapas em aço C 45 E Pb.

Para minimizar o erro relativo à posição dos provetes no interior do acessório, fez-se uma marcação no topo da chapa inferior, de forma a que a posição de todos os cubos de betão fosse a correta e que o varão estivesse centrado com o sistema de amarração. Também se verificou o nivelamento da chapa superior em duas direções perpendiculares, garantindo assim a horizontalidade da mesma, como exemplificado na Figura 5.5.

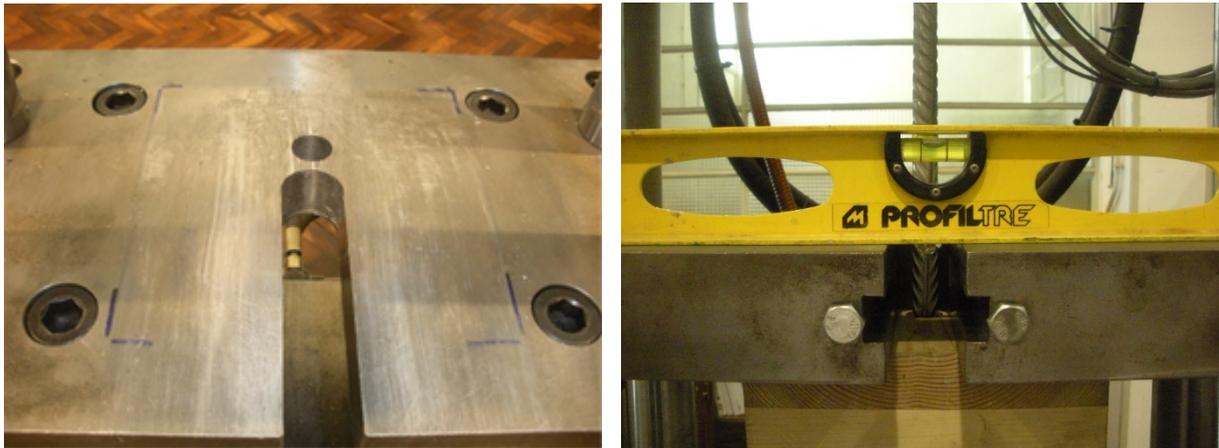


Figura 5.5 – Marcação da correta posição dos provetes na chapa inferior do acessório (à esquerda) e verificação da horizontalidade da chapa superior do acessório (à direita)

Como a altura interior deste acessório é de cerca de 300 mm e os provetes utilizados nesta dissertação são cubos de 200 mm de lado, foi necessário ter outro acessório para ocupar a folga de 100 mm entre o provete e a chapa superior.

Criou-se assim um calço de madeira em pinho, com 100 mm de altura, 200 mm de lado e um orifício no centro da peça com um diâmetro de 32 mm para que se pudesse realizar ensaios com o tubo de plástico no interior do provete.

5.1.3.3. Sistema de medição

Para a medição do deslocamento relativo entre a extremidade livre do varão e a face de betão recorreu-se à utilização de um transdutor de deslocamento do tipo indutivo HMB W10, nº 15039, que tem um alcance de 20 mm e que se encontrava devidamente calibrado.

A fixação do medidor efetuou-se através de dois suportes, um para cada diâmetro de varão, executado em perspex, que através de um sistema de ajuste por parafusos ficam solidários ao varão, como se pode ver na Figura 5.6. Para fixar a ponta do medidor à face do betão, optou-se por utilizar fita adesiva de dupla face que, após limpeza da superfície do betão com acetona, fica aderente. Outra razão que motivou a utilização desta fita foi a facilidade de colocação e o pequeno tempo de colagem face à outra solução, que passava por se utilizar cola "AKEMI".



Figura 5.6 – Sistema de suporte do equipamento de medição

Fez-se a aquisição de dados através de uma unidade multicanal de aquisição automática de dados (Spider 8) comandada pelo software Catman32 e foram efetuadas cinco leituras por segundo em todo o programa experimental.

5.1.3.4. Velocidade de ensaio

A velocidade de ensaio foi inicialmente estimada segundo a proposta do Anexo D da EN 10080:2005, para a realização de ensaios de arrancamento em regime monotónico, de acordo com a equação (5.2).

$$v_p = 0,56 \times \varnothing^2 \quad (5.2)$$

onde \varnothing , representa o diâmetro do varão a ensaiar em milímetros. A unidade da velocidade vem em N/s, ou seja, a velocidade é controlada por unidade de força.

Para que os ensaios em ambos os diâmetros fossem realizados com a mesma velocidade, não acrescentando mais uma variável, e por forma a se ter um maior controlo durante o ensaio, optou-se por realizar todos os ensaios com controlo de deslocamento, utilizando a velocidade de ensaio utilizada por Eligehausen *et al.* (1983) de 0,03 mm/s.

A velocidade de ensaio influencia a tensão de aderência, estando valores de velocidades superiores associados a valores de tensão de aderência superiores. Assim sendo, com a velocidade acima mencionada garante-se valores conservativos de tensão.

No sentido de eliminar a influência deste parâmetro, todos os ensaios foram realizados com a mesma velocidade até ser atingido um deslizamento de cerca de 20 mm, obtendo-se a relação tensão de aderência-deslizamento em regime monotónico.

5.1.4. Produção dos provetes

Para os provetes de arrancamento utilizaram-se moldes com 200x200x600 mm³, produzindo-se um total de dois provetes por molde. As divisórias de aço foram substituídas por quatro divisórias em contraplacado marítimo com um furo no centro, do mesmo diâmetro exterior dos tubos de PVC utilizados para proteger a zona não aderente. Na Figura 5.7 apresenta-se um molde com os varões posicionados, pronto a ser preenchido com betão.



Figura 5.7 – Molde preparado para a betonagem de dois provetes

Em seguida, enumeram-se os passos para montagem dos moldes, de acordo com o esquema da Figura 5.9:

- Corte dos varões com comprimento de 640 mm;
- Identificação de todos os varões (anexo A3);
- Limagem das pontas cortadas;
- Marcação da zona aderente no varão;
- Colocação da fita adesiva 1 e 2 a delinear a zona aderente até ter o mesmo diâmetro interior do furo do compartimento 2 e do interior do tubo de PVC;
- Verificação do comprimento da zona aderente (Figura 5.8);
- Colocação da fita adesiva 3, para que o varão fique centrado no interior do tubo de PVC;
- Colocação do óleo descofrante entre fita adesiva 2 e 3;
- Colocação do tubo de PVC;
- Colocação da fita adesiva zona de fixação 1 Conjunto Varão + PVC;
- Inserção dos dois compartimentos pela ponta que tem o tubo de PVC, previamente untados com óleo descofrante;
- Inserção do conjunto no molde de aço;
- Colocação da fita na zona fixação 2 Conjunto Varão + PVC;
- Verificação que o varão se encontra fixo;
- Fixação PVC ao varão com o auxílio de fita adesiva;
- Colocação do óleo descofrante no exterior do tubo de PVC;
- Verificação do comprimento da zona aderente;
- Limpeza da zona aderente com acetona;



Figura 5.8 – Comprimento aderente Ø12 (em cima) e Ø16 (em baixo)

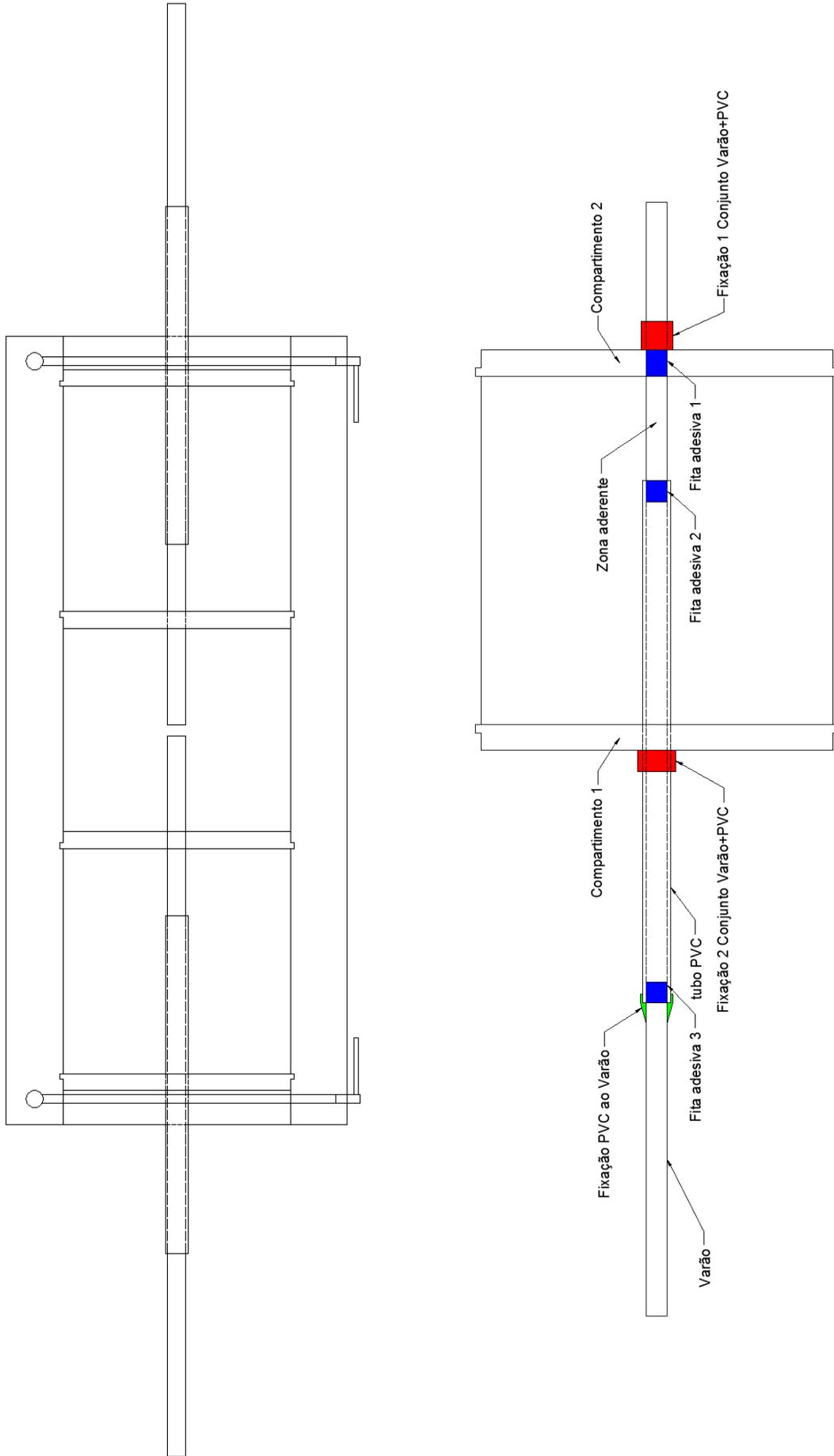


Figura 5.9 – Esquema do molde (em cima) e pormenorização de todos os elementos usados na preparação do proвете de arrancamento (em baixo)

5.1.5. Fabrico dos provetes

Atendendo a que a misturadora tem uma capacidade máxima de 130 l e que, em cada mistura de betão, o volume necessário para produzir os provetes para o ensaio de arrancamento e os cubos para definir a evolução da resistência do betão à compressão com o tempo é superior a este valor, dividiu-se a betonagem em duas amassaduras. A este volume de betão acrescentou-se 10 % para ter em conta os desperdícios, indicando-se na Tabela 5.1 os volumes finais produzidos. Os provetes cúbicos para o ensaio de resistência à compressão apenas foram preparados após o enchimento de todos os provetes para caracterização da aderência.

Tabela 5.1 – Número de provetes e volume de betão envolvido

	C250		LBC125		LBC75	
	1ª amassadura	2ª amassadura	1ª amassadura	2ª amassadura	1ª amassadura	2ª amassadura
Ensaio de arrancamento	10	10	10	10	10	10
Ensaio de compressão	13	3	13	3	13	3
Volume betão (l)	123,9	90,1	123,9	90,1	123,9	90,1
Volume final betão (l)	136	100	136	100	136	100

Para eliminar a influência de uma eventual diferença de características entre as duas amassaduras, decidiu-se considerar os varões de diâmetro 12 mm na primeira amassadura e os de 16 mm na segunda.

O tempo de mistura foi igual para as seis amassaduras, sendo que os agregados e ligantes foram misturados a seco durante 45 segundos, adicionando de seguida cerca de 80 % da quantidade de água. A restante água foi adicionada em simultâneo com o superplastificante e deixou-se misturar durante quatro minutos.

Em relação à forma como os moldes foram cheios e vibrados salienta-se que os moldes para os provetes cúbicos (200 mm e 150 mm) foram cheios em duas etapas, de forma a que a mistura de betão ficasse o mais homogénea possível. Como observado em fases anteriores, as misturas de LBC apresentam pouca trabalhabilidade e, para que a energia de compactação fosse superior, optou-se por fazer uso de uma mesa vibratória (Figura 5.10) e de uma agulha vibratória.



Figura 5.10 – Mesa vibratória usada para fornecer energia de compactação suficiente (à esquerda) e primeira etapa de enchimento dos moldes (à direita)

Todos os provetes foram desmoldados ao terceiro dia, e permaneceram no laboratório com cura ao ar, até à data de ensaio.

As betonagens foram efetuadas em 3 dias, como se pode consultar na calendarização que se apresenta no Anexo A4.

5.2. Caracterização dos materiais adotados

5.2.1. Misturas de Betão

Relativamente aos LBC, selecionaram-se as duas misturas caracterizadas no capítulo anterior com a maior e a menor resistência à compressão, 31 e 20 MPa, respetivamente para as misturas LBC125 e LBC75.

Para o betão de referência, utilizou-se a mistura caracterizada por Alves (2016) com a denominação C250, que apresenta uma trabalhabilidade S3 e uma resistência da ordem dos 39 MPa aos 28 dias. As suas propriedades encontram-se discriminadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Características da mistura de referência C250, adaptado de Alves (2016)

Composição		C250
CEM I - 52,5 R	(kg/m ³)	250
Fíler Calcário	(kg/m ³)	100
Cinzas Volantes	(kg/m ³)	-
<i>BASF Glenium Sky 526</i> (% kg/kg CEM I)	(%)	0,4
Areia fina 0/1	(kg/m ³)	492,0
Areia média 0/4_II	(kg/m ³)	427,4
Areão	(kg/m ³)	116,4
Brita1 - Br6/14	(kg/m ³)	795,4
Água	(kg/m ³)	169,1
Relação água/cimento	(-)	0,676
Relação água/ligante	(-)	0,483
Compacidade	(-)	0,81
Volume de vazios	(%)	2
Propriedades mecânicas		
Resistência de compressão - 7 dias	(MPa)	34,9
Resistência de compressão - 28 dias	(MPa)	39,1
Resistência de compressão – 56 dias	(MPa)	41,5
Resistência à tração por compressão diametral – 28 dias	(MPa)	4,77
Módulo de elasticidade – 28 dias	(GPa)	36,5

5.2.2. Varões

Para este estudo utilizaram-se os diâmetros 12 e 16 mm de aço corrente e aço inoxidável, indicados na Tabela 5.3. Os varões de aço inoxidáveis usados para caracterizar a aderência entre estes e o LBC 52

são os vulgarmente designados por AISI304 para o diâmetro 12 e AISI316 para o diâmetro 16 mm, tendo este último sido utilizado e caracterizado por Louro (2008). Como os varões Ø16 aqui utilizados pertencem ao mesmo lote, apenas se transcreve e se faz referência à metodologia utilizada e aos resultados obtidos. Os varões de aço inoxidável de diâmetro 12 mm foram obtidos a partir de varões lisos por endurecimento a frio e apresentam quatro séries de nervuras transversais, enquanto os varões de diâmetro 16 mm foram obtidos por laminagem a quente e apresentam duas séries de nervuras transversais. Para os varões de referência adotou-se aço A500 NR SD, por ser o mais habitualmente adotado na construção. Os dois diâmetros deste tipo de aço foram obtidos por laminagem a quente e nas Figuras 5.11 e 5.12 apresentam-se imagens ilustrativas dos quatro tipos de varões.

Tabela 5.3 – Tipo de aço utilizado por diâmetro para caracterizar a aderência

Diâmetro (mm)	Tipo de aço
12	A500 NR SD
	AISI304
16	A500 NR SD
	AISI316



Figura 5.11 – Representação dos varões de aço inoxidável Ø12 (em cima) e Ø16 (em baixo)



Figura 5.12 – Representação dos varões de aço A500 NR SD Ø12 (em cima) e Ø16 (em baixo)

5.2.3. Ensaio de caracterização dos materiais envolvidos

5.2.3.1. Misturas de betão

Para a caracterização da resistência de cada uma das misturas de betão, determinou-se a curva de evolução da resistência à compressão com o tempo das várias amassaduras de betão através de ensaios de compressão em cubos a diferentes idades.

Para além da execução dos provetes acima descritos, procedeu-se ainda à medição da temperatura ambiente, à temperatura do betão e ao abaixamento do cone de Abrams, antes de se iniciar o enchimento dos moldes e, na mistura LBC75, à medição do tempo Vêbê, com vista a detetar eventuais diferenças entre amassaduras e entre resultados das fases experimentais anteriores.

5.2.3.2. Varões nervurados de aço

Caracterizaram-se os varões através da realização de ensaios de tração e medição de nervuras, no Laboratório de Ensaios de Produtos Metálicos (LPM) do LNEC, com vista à obtenção de valores médios das características do material, com uma amostragem de 3 como apresentado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Número de provetes a ensaiar por cada diâmetro e tipo de aço

Tipo de ensaio	Ø12		Ø16	
	AISI304	A500 NR SD	AISI316	A500 NR SD
Medição nervuras	3	3	3 [Louro, 2008]	3
Tração	3	3	3 [Louro, 2008]	3

5.2.3.2.1. Medição das nervuras

O ensaio para caracterização das nervuras fez-se de forma automática, como representado na Figura 5.13, segundo a EN ISO 15630-1:2010 – secção 10 e a especificação LNEC E460:2010. Seguiram-se os seguintes passos, para cada amostra de varão:

- Identificação de todos os varões;
- Introdução do varão na máquina de medição automática de nervuras;
- Seleção no programa o número de faces do varão (2 ou 4);
- Seleção da fórmula para cálculo de f_R (Regra de Simpson ou Fórmula da parábola).

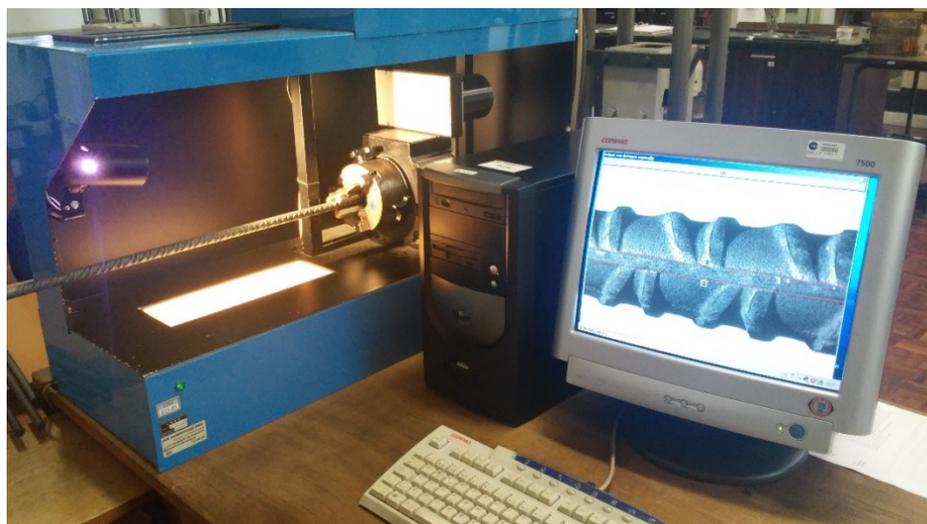


Figura 5.13 – Máquina para medição automática das nervuras

Louro (2008) considera que a regra de Simpson é a expressão que melhor se adequa à geometria das nervuras dos aços inoxidáveis, conduzindo a valores mais próximos dos valores reais da área relativa das nervuras transversais. Relativamente aos varões de aço A500 NR SD, esta autora verificou que a utilização da Fórmula da Parábola constitui uma boa aproximação para se obter a respetiva área relativa das nervuras.

Pelas razões expostas, para os aços inoxidáveis utilizou-se a Regra de Simpson (5.3) e, para os aços A500 NR SD, recorreu-se à Fórmula da Parábola (5.4), a seguir indicadas:

$$f_R = (2 \times a_{1/4} + a_{1/2} + 2 \times a_{3/4}) \times (\pi \times \varnothing - \sum e_i) \times \frac{1}{6 \times \pi \times \varnothing \times c_{livre}} \quad (5.3)$$

$$f_R = \frac{2 \times a_{1/2}}{3 \times \pi \times \varnothing \times c_{livre}} \times (\pi \times \varnothing - \sum e_i) \quad (5.4)$$

em que,

- $a_{1/4}$, $a_{1/2}$ e $a_{3/4}$ representam as alturas da nervura em cada posição;
- c_{livre} representa o afastamento das nervuras transversais;
- $\sum e_i$ representa o perímetro sem nervuras transversais;
- \varnothing representa o diâmetro do varão.

5.2.3.2.2. Ensaio de tração

As amostras para o ensaio de tração foram as utilizadas para medição das nervuras de acordo com a EN ISO 15630-1:2010 – secção 5 e ISO 6892:2009 e ainda a especificação LNEC E460:2010. Para cada amostra seguiram-se os seguintes passos:

- Identificação de todos os varões;
- Medição do comprimento do varão;
- Pesagem do varão;
- Marcação com espaçamento de 10 mm de todo o varão (Figura 5.14);
- Realização do ensaio até à rotura;
- Medição da extensão permanente na força máxima ao longo de 10 espaçamentos, medida a partir da quinta marcação contada a partir da zona de rotura e na amostra com maior comprimento (Figura 5.15).



Figura 5.14 – Marcação da amostra com espaçamento de 10 mm



Figura 5.15 – Medição da extensão permanente na força máxima

5.2.4. Equipamento utilizado

5.2.4.1. Ensaio de compressão do betão

Utilizou-se a máquina hidráulica servo-controlada Form+Test (EQ B 113), a qual permite a aplicação de compressão com uma capacidade de 3000 kN.

De acordo com a última calibração realizada pelo Laboratório de Metrologia de Forças no dia 20 de Outubro de 2014, este equipamento é da classe 2 de acordo com a NP 4015-1:1990 e o valor relativo máximo da incerteza expandida em cada intervalo de medição é de 1,10 % da força medida, para os níveis de força envolvidos nos ensaios deste estudo.

5.2.4.2. Ensaio de tração dos varões nervurados

Utilizou-se a máquina hidráulica servo-controlada Instron (LPM EQ 49), a qual permite a aplicação de tração com uma capacidade de 600 kN em regime estático.

De acordo com a última calibração realizada pelo Laboratório de Metrologia de Forças no dia 6 de Fevereiro de 2015, este equipamento é da classe 0,5 de acordo com a EN ISO 7500-1:2006 e o valor relativo máximo da incerteza expandida em cada intervalo de medição é de 0,43 % da força medida, para os níveis de força envolvidos nos ensaios deste estudo.

5.2.5. Apresentação e análise dos resultados de caracterização dos materiais

Neste subcapítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos referentes à caracterização dos materiais isoladamente, sendo os resultados considerados em 5.3.1.

5.2.5.1. Misturas de betão

Como referido anteriormente, a vibração do betão foi efetuada com recurso a uma mesa vibratória e, enquanto que na mistura de referência esta foi suficiente para envolver a pasta de ligante aos agregados, o mesmo não sucedeu para as misturas LBC. Com efeito, para além da mesa vibratória, nestas foi ainda necessário o uso de uma agulha vibratória, conforme se ilustra na Figura 5.16.



Figura 5.16 – Vibração do betão com recurso a mesa e agulha vibratória

5.2.5.1.1. Estado fresco

Os resultados obtidos para as características do betão no estado fresco, nomeadamente a temperatura, o abaixamento do cone de Abrams e o tempo Vêbê encontram-se na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Resultados obtidos para as características do betão em estado fresco

	C250		LBC125		LBC75	
	1ª amassadura	2ª amassadura	1ª amassadura	2ª amassadura	1ª amassadura	2ª amassadura
Temperatura ambiente (°C)	22,7	22,9	23,8	24,0	23,1	23,3
Temperatura betão (°C)	25,8	24,9	24,8	24,5	25,2	24,7
Abaixamento (mm)	60	110	140*	160*	-	-
Vêbê (s)	-	-	-	-	13	14

*Não representam um abaixamento verdadeiro.

A mistura C250 apresentou um abaixamento de 60 e 110 mm, o que significa que se está perante um betão de consistência S2/S3, segundo a norma do ensaio. Para a mistura LBC75, realizou-se o ensaio Vêbê, tendo-se obtido uma classe de consistência V2.

Na Figura 5.17 encontra-se um exemplo do abaixamento do cone de Abrams para a mistura C250, em que o abaixamento determinado é considerado representativo da consistência da mistura.



Figura 5.17 – Medição do abaixamento do cone de Abrams da 1ª amassadura da mistura C250

5.2.5.1.2. Resistência à compressão

Os valores médios da resistência à compressão para diferentes idades encontram-se indicados na Tabela 5.6, sendo mais à frente apresentadas as curvas de evolução deste parâmetro com o tempo, considerando a curva preconizada na secção 3.1.2 do Eurocódigo 2 (2010).

Tabela 5.6 – Resistência à compressão média para cada idade e para cada amassadura

Idade (dias)	Nº	C250		LBC125		LBC75	
		1ª amassadura	2ª amassadura	1ª amassadura	2ª amassadura	1ª amassadura	2ª amassadura
3	2	27,7	-	22,7	-	-	-
4	2	-	-	-	-	10,6	-
7	2	32,3	-	26,0	-	14,5	-
14	2	35,7	-	29,4	-	17,4	-
28	3	38,4	33,7	31,9	31,8	20,9	19,1
56	2	40,0	-	32,9	-	24,4	-
84	2	40,8	-	33,8	-	24,6	-

A curva proposta pelo Eurocódigo 2 (2010), equação (5.5), depende apenas do tipo de cimento utilizado e da resistência média aos 28 dias (f_{cm}).

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \times f_{cm} \quad (5.5)$$

onde,

$$\beta_{cc}(t) = e^{\left\{s \left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{1/2}\right]\right\}} \quad (5.6)$$

O Eurocódigo 2 (2010) recomenda que se tome 0,20 para o valor de s , dado que o cimento utilizado nas misturas é do tipo CEM I 52,5 R. Como as misturas utilizadas no trabalho aqui descrito têm reduzida quantidade de cimento, e sabendo que os valores aconselhados para s são empíricos, optou-se por encontrar o valor que melhor se ajusta aos resultados experimentais da primeira amassadura. O valor de s é assim diferente para cada tipo de mistura.

Como o valor de resistência média à compressão aos 28 dias entre as duas amassaduras e as misturas C250 e LBC75 diferem, utilizou-se o valor de resistência à compressão aos 28 dias de cada amassadura, ficando-se assim com duas curvas de evolução da resistência com o tempo. A primeira curva diz respeito à primeira amassadura, que nos ensaios de arrancamento apenas interfere com os resultados dos varões de menor diâmetro, e a segunda curva diz respeito à segunda amassadura com o fator de correção s calculado a partir da curva anterior.

Para a mistura C250, o coeficiente que minimiza o erro quadrático tem o valor de 0,16, ligeiramente inferior ao indicado no Eurocódigo 2 (2010). Os elementos necessários ao cálculo da curva encontram-se indicados na Tabela 5.7 e a representação dos resultados experimentais e das duas curvas de evolução da resistência à compressão do betão é apresentada na Figura 5.18.

Tabela 5.7 – Tabela de cálculo do coeficiente s e erro quadrático para a mistura C250

Idade	Resultados Experimentais	Curva 1ª amassadura	Δ^2	Curva 2ª amassadura
0	0,0	0,0	0,00	0,0
3	27,7	27,5	0,02	24,2
7	32,3	32,7	0,17	28,7
14	35,7	35,9	0,07	31,5
28	38,4	38,4	0,00	33,7
56	40,1	40,3	0,04	35,3
84	40,8	41,1	0,13	36,1

$\sqrt{\sum \Delta^2 / 6} = 0,27$

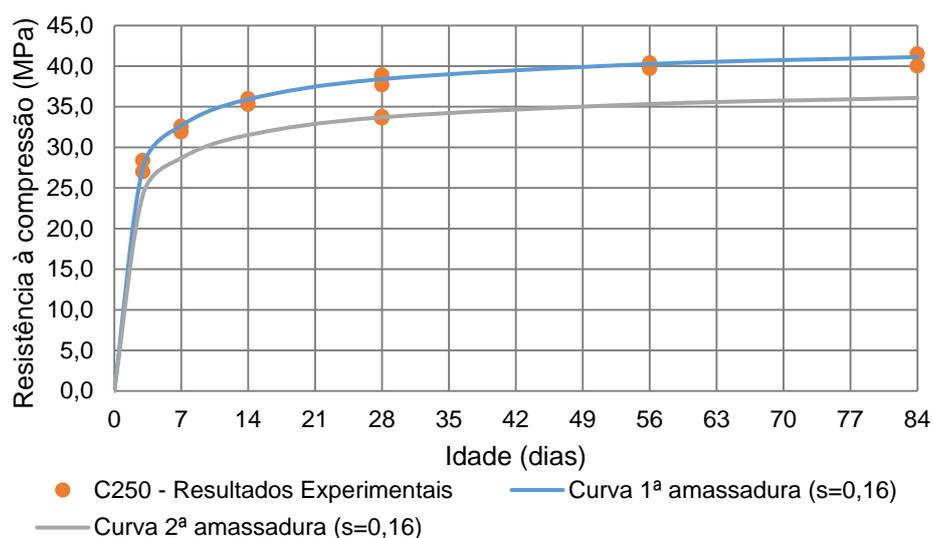


Figura 5.18 – Curvas de endurecimento para a mistura C250

Na mistura LBC125 considerou-se uma única curva, porque os resultados da resistência média à compressão aos 28 dias para as duas amassaduras são praticamente iguais. O cálculo do coeficiente que minimiza o erro quadrático foi calculado da mesma forma que para a curva anterior, mas considerando os resultados dos seis provetes ensaiados aos 28 dias e tem o valor de 0,17. Os elementos necessários ao cálculo da curva encontram-se indicados na Tabela 5.8 e a representação dos resultados experimentais e da curva de evolução da resistência à compressão é apresentada na Figura 5.19.

Tabela 5.8 – Tabela de cálculo do coeficiente s e erro quadrático para a mistura LBC125

Idade	Resultados Experimentais	Curva	Δ^2
0	0,0	0,0	0,00
3	22,7	22,4	0,09
7	26,0	26,9	0,73
14	29,4	29,7	0,09
28	31,9	31,9	0,00
56	32,9	33,5	0,39
84	33,8	34,3	0,23

$\sqrt{\sum \Delta^2 / 6} = 0,50$

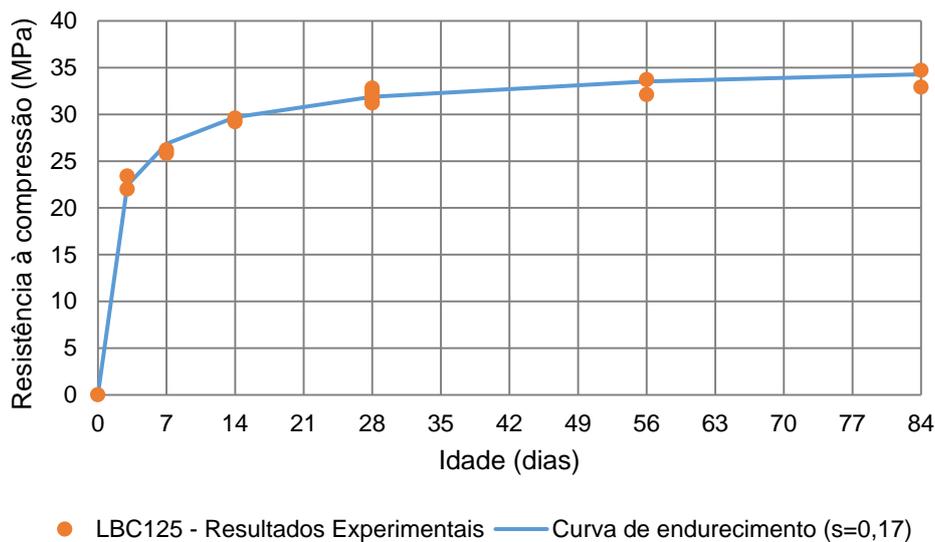


Figura 5.19 – Curva de endurecimento para a mistura LBC125

Para a mistura LBC75, tal como para a mistura C250, optou-se por utilizar duas curvas de endurecimento para as amassaduras. O cálculo do coeficiente que minimiza o erro quadrático foi calculado da mesma forma que nas misturas anteriores e tem o valor de 0,41. Os elementos necessários ao cálculo da curva encontram-se indicados na Tabela 5.9 e a representação dos resultados experimentais e das curvas de evolução da resistência à compressão é apresentada na Figura 5.20.

Tabela 5.9 - Tabela de cálculo do coeficiente s e erro quadrático para a mistura LBC75

Idade	Resultados Experimentais	Curva 1ª amassadura	Δ^2	Curva 2ª amassadura
0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	10,6	10,6	0,01	9,7
7	14,5	13,9	0,35	12,7
14	17,4	17,6	0,06	16,1
28	20,9	20,9	0,00	19,1
56	24,4	23,6	0,60	21,6
84	24,6	24,9	0,14	22,8
$\sqrt{\sum \Delta^2 / 6} = 0,41$				

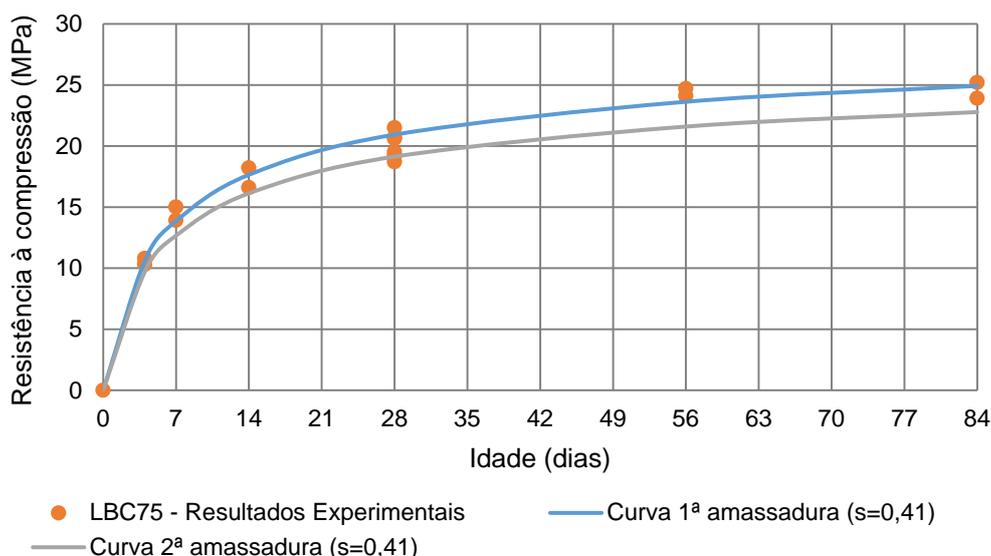


Figura 5.20 – Curvas de endurecimentos para a mistura LBC75

O valor de s aumenta à medida que a quantidade de cimento presente nas misturas diminui. Tal como no Eurocódigo 2 (2010), em que o valor de s aumenta à medida que se utiliza cimento com resistência mais baixa, também neste caso o valor que melhor se aproxima dos resultados experimentais aumenta à medida que se tem misturas mais pobres em cimento.

5.2.5.2. Varões

5.2.5.2.1. Medição das Nervuras

Na Tabela 5.10, apresentam-se os valores médios obtidos (três amostras) nos ensaios de caracterização do perfil nervurado dos diversos tipos varões utilizados.

Tabela 5.10 – Características geométricas das nervuras dos varões em estudo

Diâmetro (mm)	Classe	$a_{1/4}$ (mm)	$a_{1/2}$ (mm)	$a_{3/4}$ (mm)	$C_{livre,méd}$ (mm)	$\sum f_i$ (mm)	f_R , médio
12	A500 NR SD	-	1,07	-	7,80	3,60	0,082
	AISI304	0,55	0,67	0,54	6,67	7,20	0,058
16	A500 NR SD	-	1,18	-	10,80	4,87	0,066
	AISI316	0,80	1,06	0,93	10,18	4,89	0,066

Para os varões de 12 mm de diâmetro, o valor de f_R que se obteve para os varões de aço A500 NR SD é significativamente superior ao obtido para os varões de aço inox, sendo por isso expectável que nos ensaios de aderência os primeiros apresentem tensões de aderência igualmente superiores.

Em relação aos varões de 16 mm diâmetro, obtiveram-se valores iguais de área relativa das nervuras transversais, pelo que é expectável que a tensão de aderência também seja semelhante.

Todos os provetes satisfazem os valores mínimos da área relativa de nervuras transversais especificados no Anexo C do Eurocódigo 2 (2010) e na especificação do LNEC E460:2010, cujos valores se indicam na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Valores de referência para área relativa de nervuras transversais

Diâmetro (mm)	Eurocódigo 2 (2010)	LNEC E460 (2010)
12	0,056	0,056
16	0,056	0,056

5.2.5.2.2. Caracterização mecânica dos varões

A caracterização mecânica das armaduras foi efetuada através de ensaios de tração, realizados de acordo com a secção 5 da EN ISO 15630-1. Os valores da tensão de cedência (f_y), da tensão de rotura (R_m) e da extensão total na força máxima (A_{gt}) obtidos apresentam-se na Tabela 5.12, correspondendo à média dos valores obtidos no ensaio de três provetes de cada um dos diversos tipos de varões utilizados.

Salienta-se que a extensão total na força máxima é superior nos varões de aço inoxidável e em especial para o varão de 16 mm, cujo valor é 2,5 vezes superior ao do varão correspondente em aço A500 NR SD.

Tabela 5.12 – Características mecânicas dos varões em estudo

Diâmetro (mm)	Classe	f_y (MPa)	R_m (MPa)	A_{gt} (%)
12	A500 NR SD	543	630	13,4
	AISI304	651	757	19,8
16	A500 NR SD	536	633	11,2
	AISI316	573	760	28,3

5.3. Apresentação e análise dos resultados experimentais dos ensaios de aderência

Nesta secção apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos referentes à caracterização da aderência entre os varões e os diferentes tipos de betão.

5.3.1. Caracterização da aderência varão-betão

Como referido anteriormente, os resultados da tensão de aderência que em seguida se apresentam foram determinados com base na tensão de aderência local, através da equação (5.1).

Como o objetivo era avaliar a influência de cada tipo de mistura de betão e da sua resistência na tensão de aderência, utilizou-se um valor corretivo diferente para cada mistura, referido ao valor médio da resistência à compressão da primeira amassadura de cada composição de betão aos 28 dias.

Em relação à resistência à compressão do betão, à data dos ensaios de arrancamento, esta foi calculada através das curvas de endurecimento apresentadas em 5.2.5.1.2.

Para a caracterização da aderência em regime monotónico, determinou-se a tensão máxima de aderência (τ_1) e o respetivo deslizamento (s_1), assim como a tensão média de aderência ($\tau_{d,média}$), de acordo com a equação (5.7), presente no Anexo C do Eurocódigo 2 (2010). O resultado da tensão média representa a inclinação do ramo ascendente até se atingir a tensão de aderência máxima.

$$\tau_{d,média} = \frac{\tau_{0,01} + \tau_{0,1} + \tau_{1,0}}{3} \quad (5.7)$$

em que, $\tau_{0,01}$, $\tau_{0,1}$ e $\tau_{1,0}$ representam a tensão de aderência para deslizamentos de 0,01 mm, 0,1 mm e 1 mm, respetivamente.

Para um tratamento mais cuidado dos resultados agruparam-se os ensaios com as mesmas características e eliminaram-se os que apresentavam resultados que não se encontravam com o mesmo padrão dos restantes. Numa primeira análise, utilizaram-se os valores máximo, mínimo, mediana e desvio padrão para a tensão média e máxima, e aos conjuntos de resultados em que o desvio padrão era superior a 1 MPa aplicaram-se limites extremos por forma a eliminar os resultados que se encontravam fora destes limites. Burke (2005) cita a especificação ISO 3534:1993 onde esta sugere que, num conjunto de resultados, valores extremos, muito separados dos restantes, aparentando pertencer a uma população diferente ou resultar de um erro de medição, devem ser eliminados.

Como alternativa à média utilizou-se a mediana, porque Burke (2005) descreve que métodos estatísticos robustos são aqueles que não são afetados pela presença de valores extremos, o que pode ser conseguido usando a mediana, onde a tendência central é medida. Para se obterem os limites inferior e superior, utilizou-se a distribuição *t-student* para um intervalo de confiança de 99 %. A escolha da distribuição teve em consideração a pequena amostra (família de cinco resultados).

Na totalidade eliminaram-se seis resultados, num total de sessenta ensaios realizados. Na Figura 5.21 apresenta-se o exemplo do provete número 4 da série C250_A12, o qual foi eliminado por não pertencer ao intervalo definido pelos limites superior e inferior de controlo para o caso da tensão média de aderência.

Todos os resultados da análise estatística encontram-se na secção 2 do Anexo A5, onde estão presentes os diferentes limites de controlo para cada série e os provetes que são eliminados. O tratamento de resultados é apresentado por tipo de mistura, diâmetro e tipo de aço.

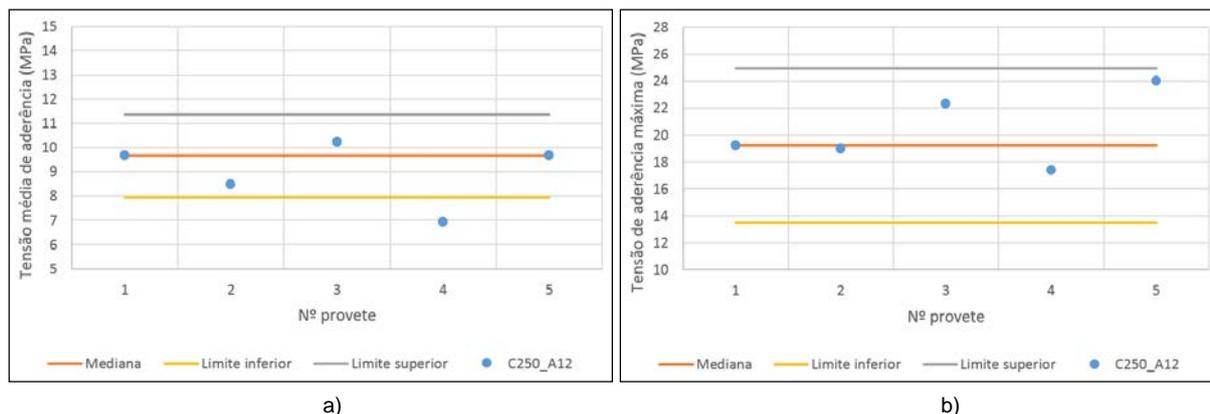


Figura 5.21 – Exemplo do tratamento estatístico efetuado para a série C250_A12 através de limites de controle: a) tensão de aderência média; b) tensão de aderência máxima

Na Tabela 5.13 apresentam-se os valores médios da tensão de aderência média e máxima, após análise estatística.

Tabela 5.13 – Valores médios da tensão média e máxima de aderência após análise estatística

Valores médios			
	f_{cm} (MPa)	$\tau_{d,média}$ (MPa)	$\tau_{d,máx}$ (MPa)
C250_A12	38,4	9,50	21,13
C250_i12		6,79	15,68
C250_A16		7,68	19,19
C250_i16		7,35	17,63
LBC125_A12	31,9	11,21	24,76
LBC125_i12		9,80	21,84
LBC125_A16		10,77	22,59
LBC125_i16		10,68	21,73
LBC75_A12	20,9	9,23	22,49
LBC75_i12		6,55	15,89
LBC75_A16		8,81	18,93
LBC75_i16		7,42	16,69

De seguida apresentam-se os gráficos obtidos para cada conjunto de provetes, após tratamento de resultados.

Para a mistura de betão C250, obtiveram-se os gráficos da Figura 5.22, sendo de realçar que o varão de aço A500 NR SD e com 12 mm de diâmetro foi o que registou valores mais elevados de tensão de aderência máxima. Atribui-se que o varão “A12” tem valores de tensão de aderência superiores aos restantes devido a um superior valor de f_R e $a_{1/2}$.

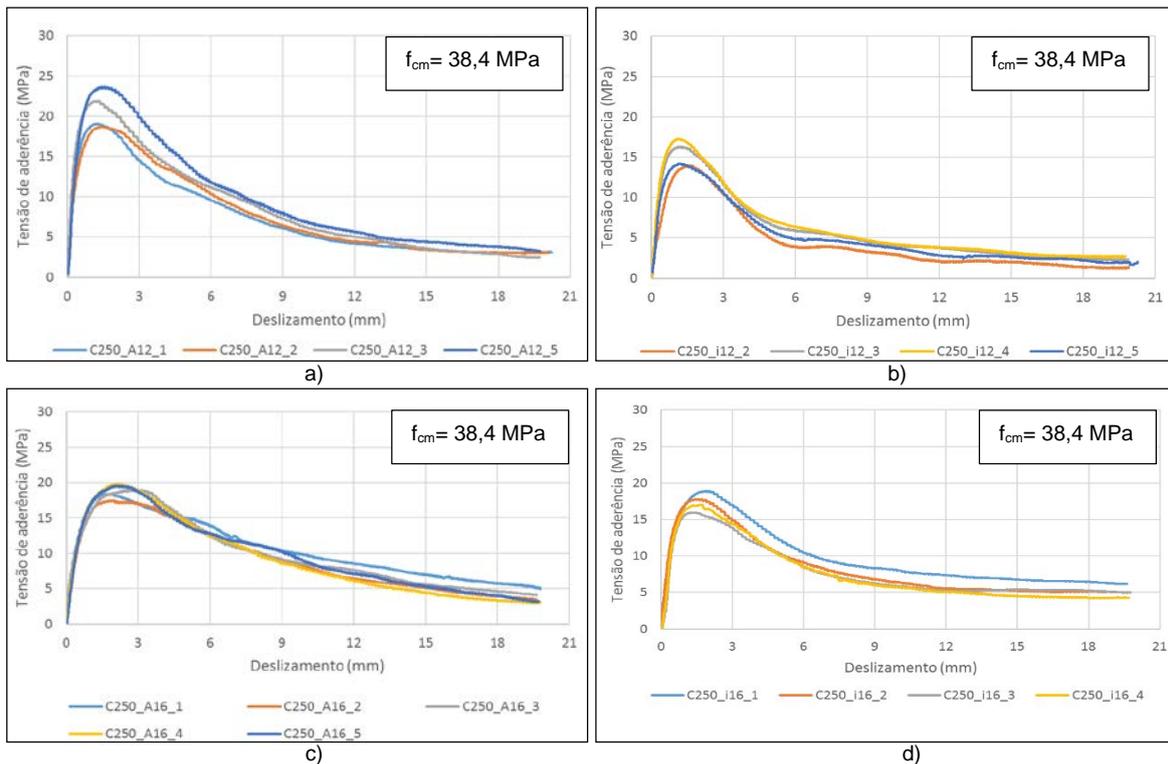


Figura 5.22 – Resultados experimentais tratados para a mistura C250 com varões a) Ø12 A500 NR SD; b) Ø12 AISI304; c) Ø16 A500 NR SD; d) Ø16 AISI316

Para a mistura de betão LBC125 e LBC75, obtiveram-se os gráficos da Figura 5.23 e da Figura 5.24, respetivamente, destacando-se os gráficos obtidos para os provetes com varões de maior diâmetro, onde ocorreu um abaixamento súbito do valor da tensão de aderência e que será abordado em seguida.

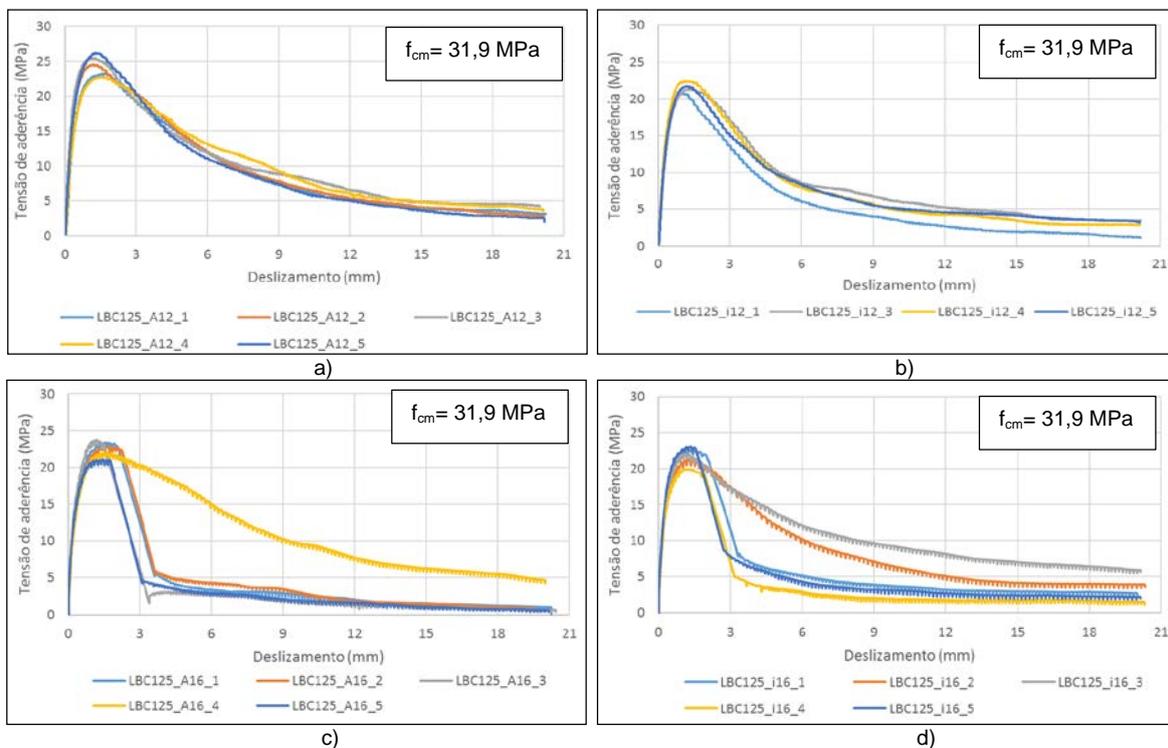


Figura 5.23 - Resultados experimentais tratados para a mistura LBC125 com varões a) Ø12 A500 NR SD; b) Ø12 AISI304; c) Ø16 A500 NR SD; d) Ø16 AISI316

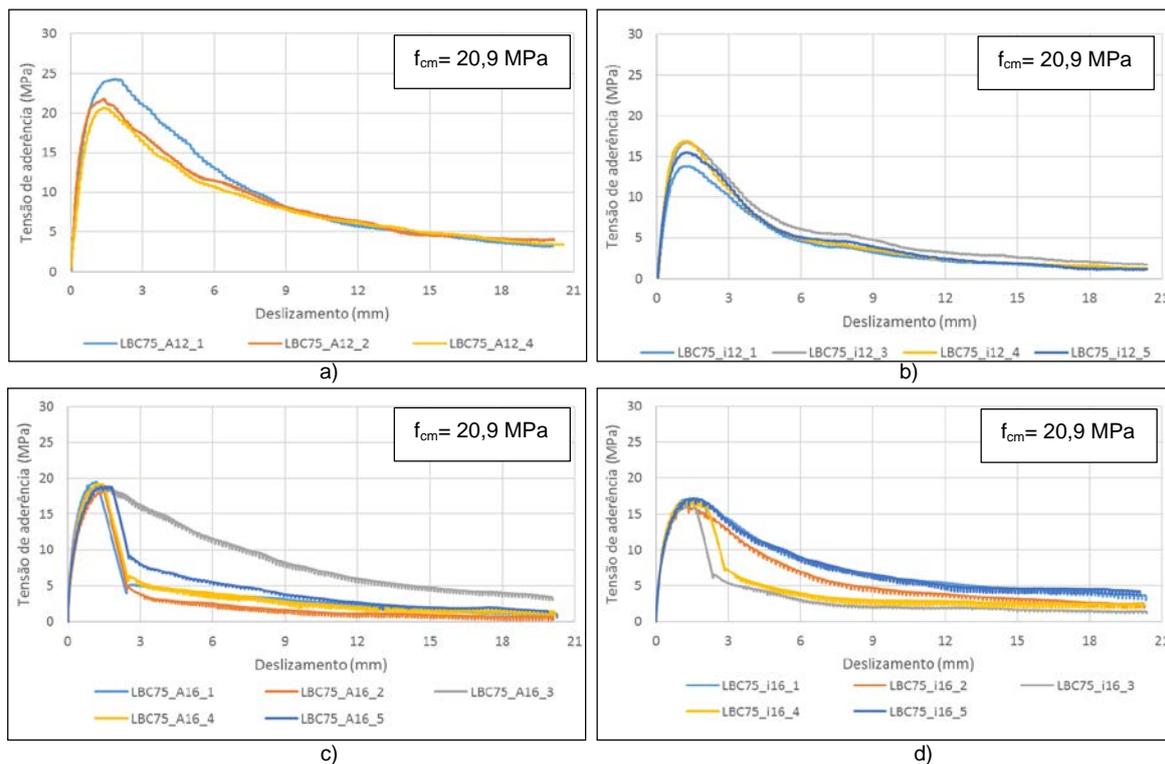


Figura 5.24 - Resultados experimentais tratados para a mistura LBC75 com varões a) Ø12 A500 NR SD; b) Ø12 AISI304; c) Ø16 A500 NR SD; d) Ø16 AISI316

Para melhor se perceber o fenómeno ocorrido nos dois tipos de varões de maior diâmetro, e para os dois tipos de misturas ecológicas, LBC125 e LBC75, apresenta-se na Figura 5.25 o registo da tensão de aderência obtido no provete número 3 da série LBC125_A16.

Tabela 5.14 – Resultados da tensão de aderência para o provete LBC125_A16_3

Provete	$\tau_{0,01}$ (MPa)	$\tau_{0,1}$ (MPa)	$\tau_{1,0}$ (MPa)	$\tau_{d,média}$ (MPa)	$\tau_{d,máx}$ (MPa)
LBC125_A16_3	3,47	8,88	22,99	11,78	23,77

A queda repentina na força exercida pela máquina hidráulica é acompanhada pelo aparecimento de uma fissura longitudinal em faces opostas, conforme ilustrado na Figura 5.25, o que faz com que a tensão de aderência tenha uma descida acentuada.

Para melhor estudar e reportar este efeito, escolheu-se o provete LBC125_A16_3 por este apresentar a maior fissura e, assim, com uma pequena pancada, separou-se o provete em dois. Na Figura 5.26 pode-se observar a zona aderente, que se encontra completamente lisa, e a zona não aderente, com um diâmetro maior devido ao tubo de pvc.

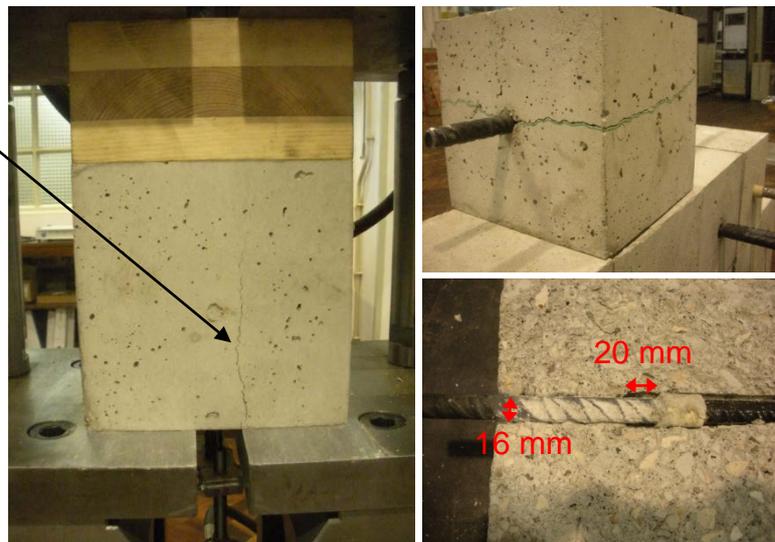
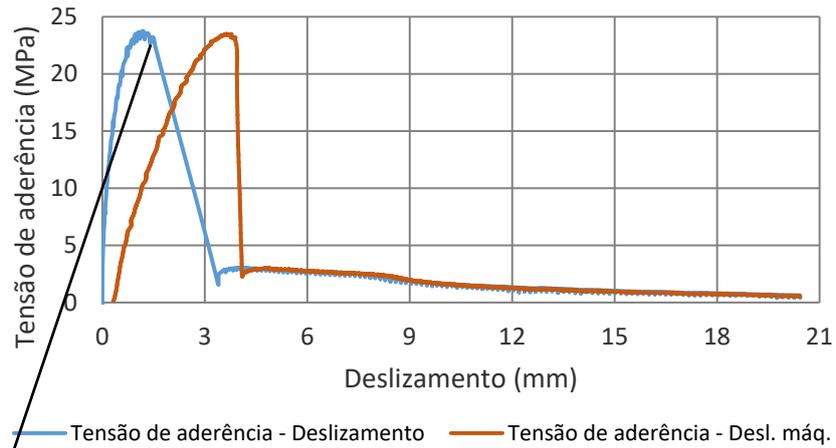


Figura 5.25 – Andamento da curva experimental da tensão de aderência para o provete LBC125_A16_3 (em cima) e marcação das fissuras no provete (em baixo)



Figura 5.26 – Zona interior do provete LBC125_A16_3

Por forma a avaliar se o valor médio da tensão de aderência máxima é representativo do comportamento da aderência para cada conjunto de variáveis, analisou-se graficamente o intervalo dos valores mínimo e máximo da tensão máxima de aderência em todas as misturas. Através da Figura 5.27, conclui-se que a análise das diversas variáveis pode ser efetuada tendo em conta apenas o valor médio da tensão máxima de aderência. Destaca-se que nos provetes com varões de 12 mm do tipo A500 NR SD existe uma maior dispersão de resultados para a tensão de aderência entre misturas, contrariamente aos outros varões.

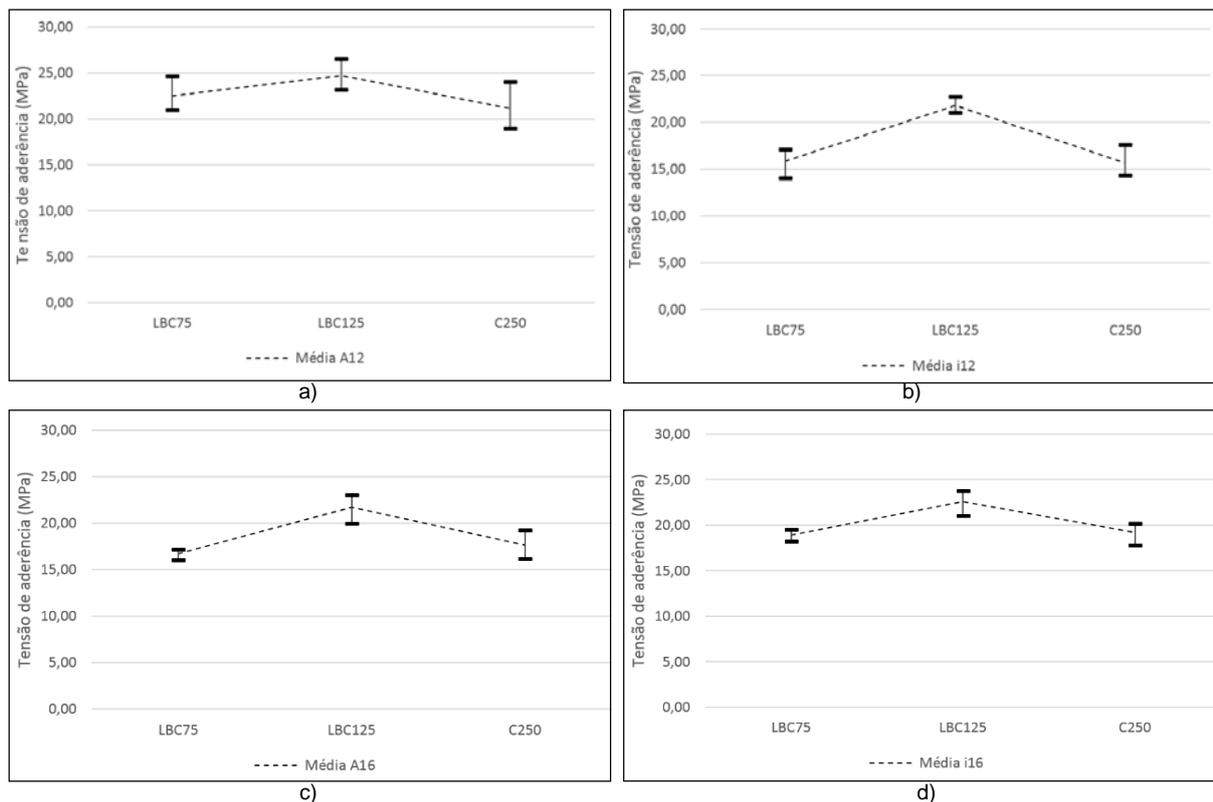


Figura 5.27 - Representação dos valores máximos, mínimos e média da tensão de aderência máxima para todos os tipos de varão: a) varões Ø12 de A500 NR SD; b) varões Ø12 de AISI304; c) varões Ø16 de A500 NR SD; d) varões Ø16 de AISI316

Na análise de resultados que se segue, a influência das diversas variáveis presentes no estudo, como o diâmetro, tipo de aço e tipo de betão, é individualizada e a sua representação obedece ao código exposto na Figura 5.28. O tipo de mistura é representado com um triângulo, quadrado cheio ou quadrado vazio, enquanto que a distinção entre o diâmetro e o tipo de aço é efetuada por cores. Os valores de tensão de aderência para cada tipo de combinação são a média do valor da tensão máxima dos provetes considerados na análise.

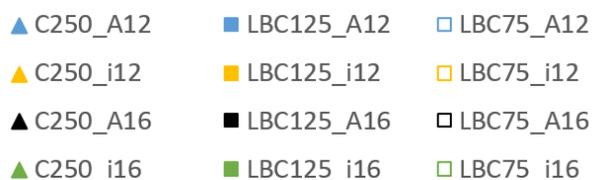


Figura 5.28 – Representação do tipo de mistura, tipo de aço e diâmetro

5.3.2. Influência do diâmetro

O diâmetro do varão é um fator já estudado por diversos investigadores, verificando-se que o aumento do valor do diâmetro leva a uma diminuição do valor da tensão de aderência máxima.

Da análise da Figura 5.29, verifica-se que a influência do diâmetro na tensão máxima de aderência não é evidente para os varões utilizados porque, além do diferente diâmetro, também se têm diferentes características geométricas, como é o caso da área relativa das nervuras transversais, altura máxima,

espaçamento e inclinação das nervuras horizontais. Por exemplo, se se analisar os resultados para os varões de aço A12 e A16 de qualquer mistura, verifica-se um decréscimo do valor da tensão máxima, tal como a bibliografia sugere. No presente estudo, acredita-se que esta diminuição está fortemente relacionada com as diferenças do perfil nervurado, não sendo possível avaliar a influência do diâmetro na presente campanha de ensaios.

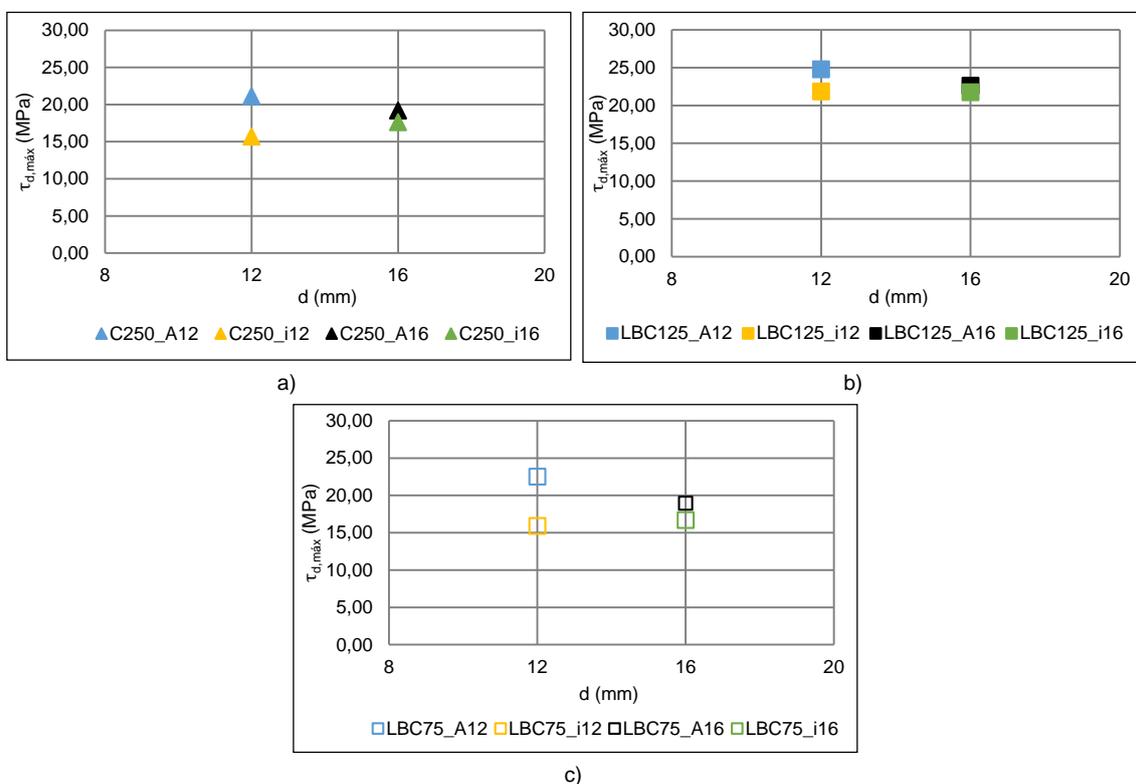


Figura 5.29 – Influência do diâmetro (\varnothing) na tensão máxima de aderência ($\tau_{d,max}$): a) para a mistura C250; b) para a mistura LBC125; c) para a mistura LBC75

5.3.3. Influência da área relativa das nervuras transversais

A influência da área relativa das nervuras transversais no valor da tensão de aderência máxima encontra-se ilustrada na Figura 5.30 e no caso dos varões com 12 mm de diâmetro, o aumento da tensão de aderência máxima com o aumento da área relativa das nervuras transversais é evidente. O mesmo não sucede para os varões de maior diâmetro que, para o mesmo valor da área relativa das nervuras transversais se esperaria o mesmo valor da tensão de aderência. Observa-se que os varões de aço inoxidável apresentam valores médios de tensão de aderência máxima inferiores aos varões de aço A500 NR SD, obtendo uma diferença máxima de 2,24 MPa para a mistura LBC75.

A diferença no valor da tensão de aderência máxima para os varões com 16 mm de diâmetro pode estar associada à diferente geometria das nervuras entre os dois tipos de aço.

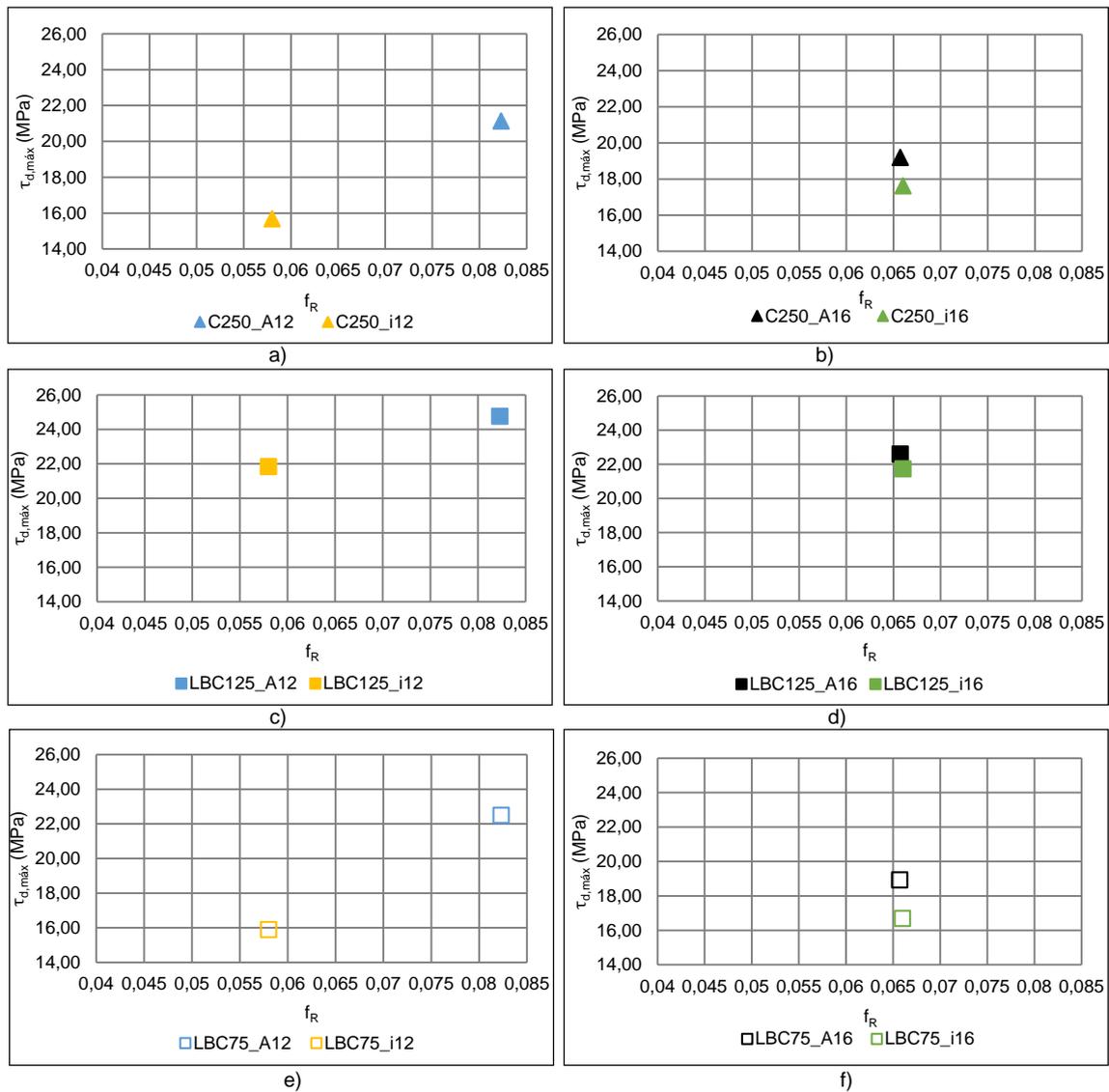


Figura 5.30 - Influência da área relativa das nervuras transversais (f_R) na tensão máxima de aderência ($\tau_{d,max}$):
a) Mistura C250 e ϕ 12; b) Mistura C250 e ϕ 16; c) Mistura LBC125 e ϕ 12; d) Mistura LBC125 e ϕ 16;
e) Mistura LBC75 e ϕ 12; f) Mistura LBC75 e ϕ 16

5.3.4. Influência da resistência à compressão do betão

Analisa-se em seguida a influência da resistência à compressão do betão para as três misturas consideradas, Figura 5.31, e à primeira vista não se verifica um aumento da tensão de aderência proporcional ao aumento da resistência à compressão do betão. Para as misturas LBC75 e LBC125, ocorre um aumento de tensão de aderência como expectável, mas o mesmo não sucede para a mistura C250.

Sabe-se que a mistura C250 tem uma compactidade inferior às restantes, e esta diferença pode explicar o decréscimo da tensão de aderência máxima.

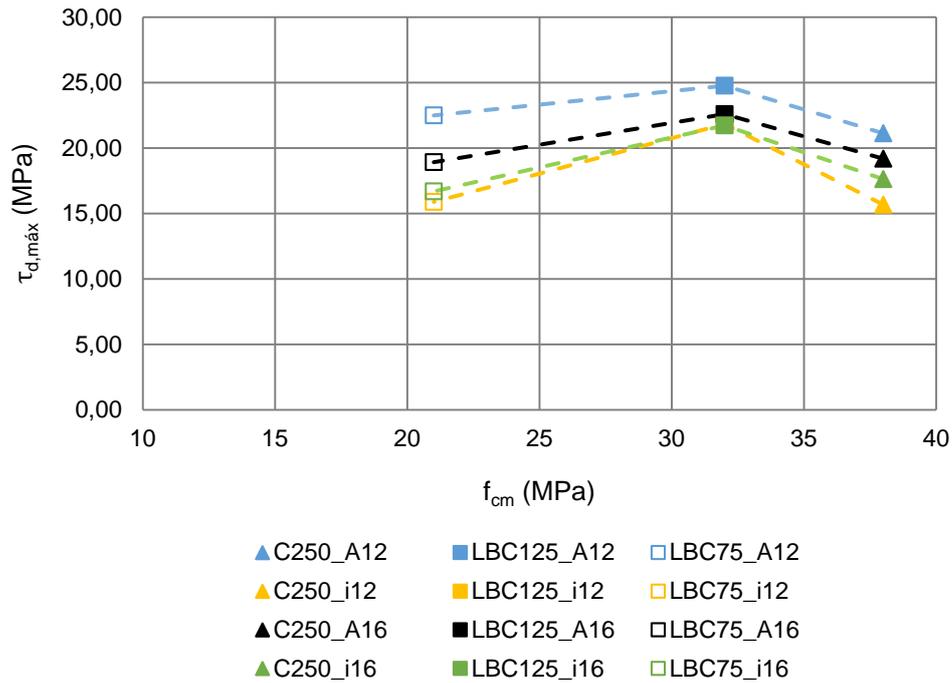


Figura 5.31 – Influência da resistência à compressão do betão (f_{cm}) na tensão máxima de aderência ($\tau_{d,máx}$)

5.3.5. Influência da compacidade da mistura

Sabe-se que as misturas LBC75 e LBC125 apresentam a mesma compacidade, enquanto que a mistura C250 apresenta uma compacidade inferior, de 0,81. Dando especial atenção às misturas C250 e LBC125, que são aquelas onde o aumento da resistência à compressão do betão não é acompanhado por um aumento da tensão de aderência, é visível que, ao aumentar a compacidade da mistura de betão, ocorre também um aumento da tensão de aderência. Este fenómeno pode ser devido ao facto das partículas para as misturas com compacidade mais elevada estarem mais próximas umas das outras, formando uma pasta mais rígida.

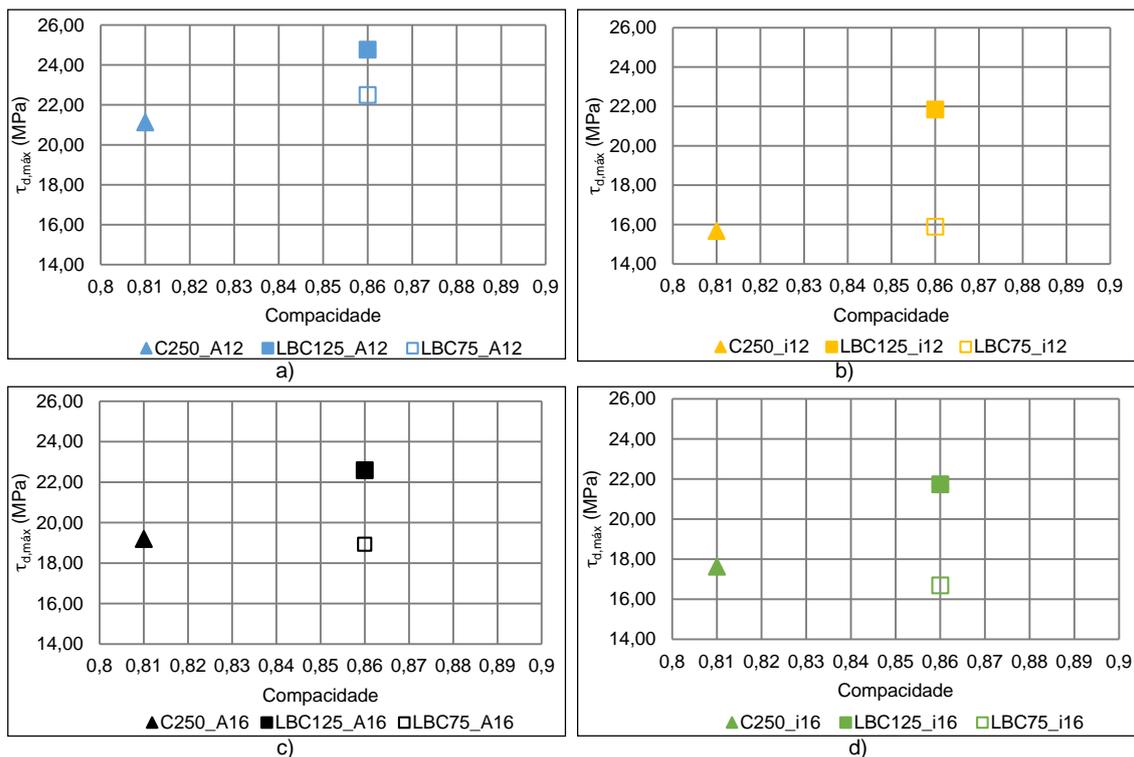


Figura 5.32 – Influência da compactação das misturas na tensão máxima de aderência ($\tau_{d,máx}$):
a) varões Ø12 de A500 NR SD; b) varões Ø12 de AISI304; c) varões Ø16 de A500 NR SD;
d) varões Ø16 de AISI316

5.3.6. Comparação dos resultados com Louro (2008)

Louro (2008) obteve um valor de tensão de aderência máximo de 25,21 MPa para varão de aço inoxidável de 16 mm de diâmetro e betão com resistência à compressão de 61 MPa, medida em cubos de 150 mm de lado, à data do ensaio de arrancamento. Através da composição da mistura de betão C35/45 presente no documento, calculou-se o valor da compactação que se estima ser próxima de 0,80.

Na Figura 5.33, encontram-se os resultados obtidos com o mesmo tipo de varão e para as três misturas estudadas, bem como a previsão do valor da tensão de aderência, em função da resistência do betão à compressão e da compactação da mistura.

Observa-se que o valor da tensão de aderência máxima para a mistura LBC125, a qual apresenta uma resistência à compressão média de 32 MPa, é da mesma ordem de grandeza do resultado obtido por Louro (2008), validando a hipótese de que o valor da tensão de aderência máxima não é apenas influenciado pela resistência à compressão do betão, mas também pela sua compactação.

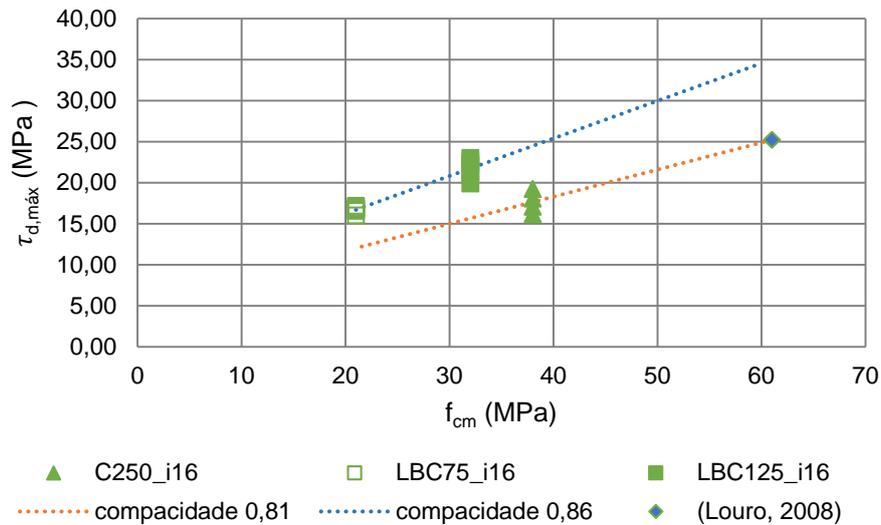


Figura 5.33 – Previsão da tensão de aderência máxima, para os varões i16 e para compacidades 0,81 e 0,86

5.3.7. Comparação dos resultados com a norma Model Code 2010

Nesta secção, comparam-se os resultados obtidos experimentalmente com o previsto pelo Model Code 2010, que segue as expressões seguintes:

$$\tau_0 = \tau_{máx} \times \left(\frac{s_i}{s_1}\right)^\alpha \quad \text{para } 0 \leq s_i \leq s_1 \quad (5.8)$$

$$\tau_0 = \tau_{máx} \quad \text{para } s_1 \leq s_i \leq s_2 \quad (5.9)$$

$$\tau_0 = \tau_{máx} - (\tau_{máx} - \tau_f) \times \frac{s_i - s_2}{s_3 - s_2} \quad \text{para } s_2 \leq s_i \leq s_3 \quad (5.10)$$

$$\tau_0 = \tau_f \quad \text{para } s_3 < s_i \quad (5.11)$$

Para situações onde a rotura ocorre por arrancamento do varão em boas condições de aderência e em que as extensões impostas são inferiores à extensão de cedência, os valores dos diferentes parâmetros são os apresentados na Tabela 5.15. Considera-se que, em todos os ensaios ocorre rotura por arrancamento, mesmo para os provetes onde existe fissuração, porque esta não surge no ramo ascendente.

Tabela 5.15 – Parâmetros para definição da relação tensão de aderência – deslizamento propostos pelo Model Code 2010

Parâmetros	Model Code 2010
$\tau_{máx}$	$2,50 \times \sqrt{f_{cm}}$
s_1	1,0 mm
s_2	2,0 mm
s_3	c_{livre}
α	0,40
τ_f	$0,40 \times \tau_{máx}$

sendo o valor da resistência do betão à compressão, f_{cm} , definido para cada mistura; e o parâmetro c_{livre} é o valor médio da distância livre entre nervuras para os dois tipos de varão com o mesmo diâmetro. As curvas foram definidas com os valores apresentados na Tabela 5.16.

Tabela 5.16 – Valores dos parâmetros utilizados em cada mistura e diâmetro

Parâmetros	C250		LBC125		LBC75	
	Ø12	Ø16	Ø12	Ø16	Ø12	Ø16
f_{cm} (MPa)	38,4		31,9		20,9	
$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	15,5		14,1		11,4	
$Clivre$ (mm)	7,25	10,50	7,25	10,50	7,25	10,50
τ_f (MPa)	6,2		5,6		4,6	

Ao comparar a relação tensão de aderência vs. deslizamento dos resultados obtidos experimentalmente com os propostos pelo Model Code 2010, presentes na Tabela 5.17, chega-se à conclusão que apenas a mistura de betão C250 se aproxima satisfatoriamente da curva teórica.

Relativamente à tensão máxima de aderência, a tensão teórica máxima encontra-se em todos os casos abaixo dos resultados experimentais, sendo esta diferença mais notória nas misturas LBC125 e LBC75, com diferenças que vão dos 46 aos 101 % para a última mistura. O Model Code 2010, no que respeita ao tipo de betão, apenas tem em consideração a resistência à compressão aos 28 dias, podendo a diferença entre resultados previstos e obtidos ser causada pela elevada compacidade das misturas LBC125 e LBC75.

Tabela 5.17 – Comparação da tensão de aderência máxima proposta pelo Model Code 2010 e os valores médios de tensão máxima obtidos experimentalmente

Misturas	Model Code 2010	$\tau_{d,m\acute{a}x}$, média (MPa)				$\Delta_{m\acute{i}n}$ (%)	$\Delta_{m\acute{a}x}$ (%)
		A12	i12	A16	i16		
C250	15,5	21,13	15,68	19,19	17,63	1	36
LBC125	14,1	24,77	21,84	22,59	21,73	54	76
LBC75	11,4	22,89	16,88	18,93	16,69	46	101

Tal como se pode constatar na Tabela 5.17, a tensão máxima de aderência proposta pelo Model Code 2010 afasta-se dos resultados obtidos para as misturas LBC. No sentido de melhorar a previsão e tendo em conta as conclusões atrás observadas admitiu-se que a expressão do Model Code 2010 não deve considerar apenas a influência da resistência da mistura de betão, mas também a influência da área relativa das nervuras transversais, f_R , e a compacidade da mistura. Em relação à influência de f_R , a secção 6 do Model Code 2010 afirma que a curva proposta é verdadeira caso $f_R > f_{R,min}$ de acordo com os regulamentos internacionais relevantes. O valor considerado para $f_{R,min}$ é o proposto pelo Eurocódigo 2 (2010) e tem o valor de 0,056.

Como se observou um aumento do valor da tensão de aderência máxima com o aumento do valor de f_R , estudou-se a hipótese de acrescentar um fator corretivo à equação (5.9) através de $k_{f_R} = \frac{f_{R,j}}{0,056}$. Este factor foi validado após se verificar que existe uma boa relação entre a expressão proposta e os resultados experimentais.

Também se observou que a compacidade tem influência no valor da tensão de aderência máxima, como observado nas secções 5.3.4 e 5.3.5 e também na secção 5.3.6 onde se compararam os resultados com um estudo experimental. Desta forma, considera-se pertinente incorporar um fator

corretivo relativo à compacidade das misturas através de $k_{\sigma} = \sigma_j[\%] - 0,81$. O valor de 0,81 representa a compacidade da mistura de referência C250.

Em suma, sugere-se que a tensão de aderência máxima seja estimada através da seguinte expressão:

$$\tau_{m\acute{a}x} = 2,5 \times \sqrt{f_{cm}} \times k_{f_R} + k_{\sigma} \quad (5.12)$$

Na Figura 5.34 e na Tabela 5.18 comparam-se os resultados experimentais com as curvas propostas pelo Model Code 2010, curvas de um ou dois provetes, onde a tensão de aderência máxima é próxima da média da tensão de aderência máxima, e ainda as curvas corrigidas através da equação (5.12). Conclui-se que existe uma boa relação entre os resultados experimentais e os obtidos através da equação proposta (5.12).

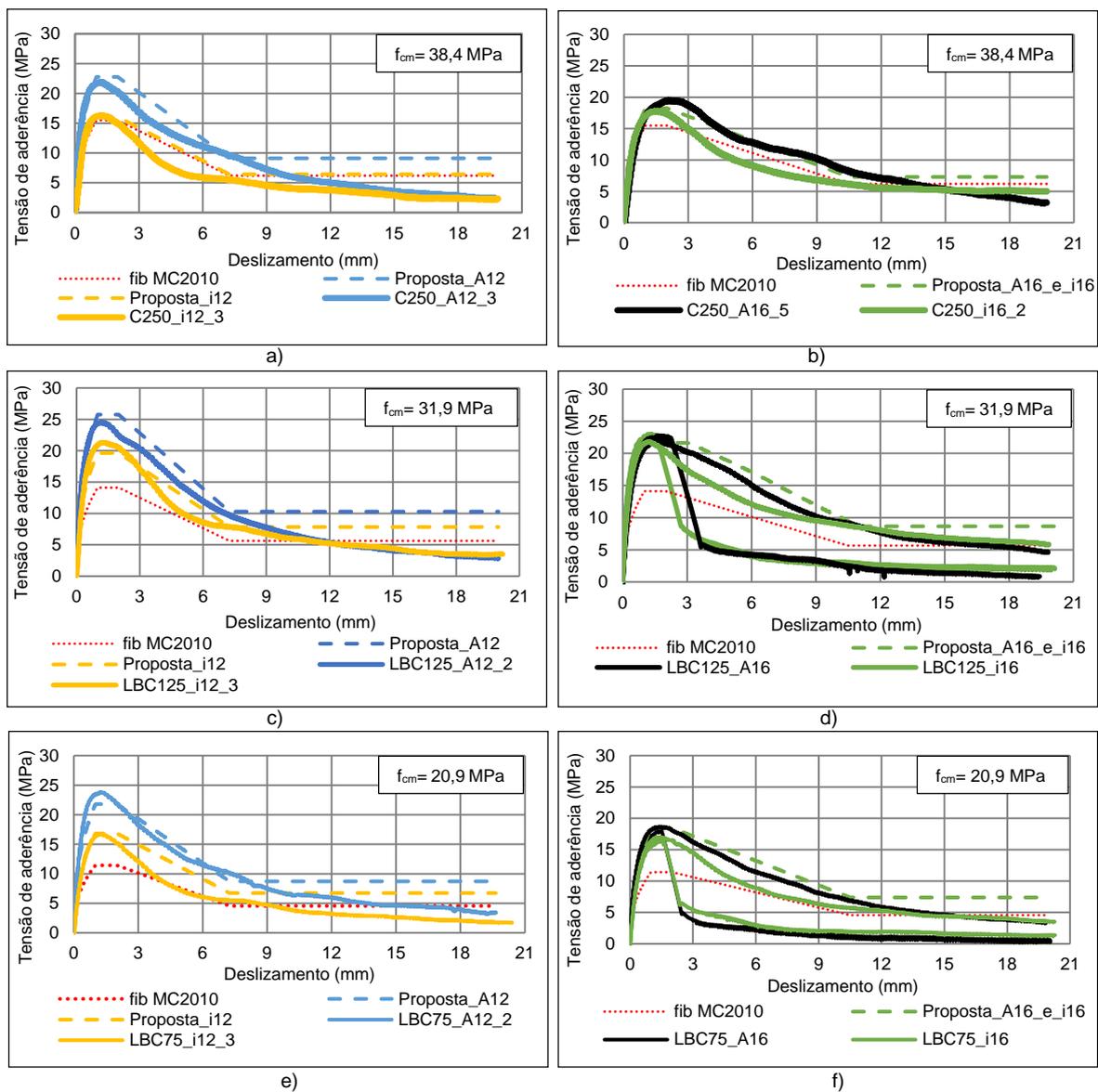


Figura 5.34 - Comparação entre os resultados experimentais, os propostos pelo Model Code 2010 e pela equação (5.12): a) Mistura C250 e Ø12mm; b) Mistura C250 e Ø16mm; c) Mistura LBC125 e Ø12mm; d) Mistura LBC125 e Ø16mm; e) Mistura LBC75 e Ø12mm; f) Mistura LBC75 e Ø16mm

Tabela 5.18 – Comparação da tensão de aderência máxima através da equação (5.12) e os valores médios obtidos experimentalmente

	f_R	Compacidade, σ	f_{cm} (MPa)	$\tau_{d,máx}$, média (Mpa)	Eq. 5.12 (MPa)	Δ (%)
C250_A12	0,082	0,81	38,4	21,13	22,78	8
C250_i12	0,058			15,68	16,05	2
C250_A16	0,066			19,19	18,27	-5
C250_i16	0,066			17,63	18,27	4
LBC125_A12	0,082	0,86	31,9	24,76	25,72	4
LBC125_i12	0,058			21,84	19,60	-10
LBC125_A16	0,066			22,59	21,62	-4
LBC125_i16	0,066			21,73	21,62	-1
LBC75_A12	0,082	0,86	20,9	22,49	21,75	-3
LBC75_i12	0,058			15,89	16,81	6
LBC75_A16	0,066			18,93	18,44	-3
LBC75_i16	0,066			16,69	18,44	10

5.4. Considerações finais

Em relação ao varão de aço A500 NR SD de diâmetro 12 mm verifica-se que, ao aumentar a resistência do betão à compressão e mantendo a mesma compacidade (misturas LBC75 e LBC125), existe um aumento na tensão de aderência. Em relação às misturas LBC125 e C250, o aumento da resistência do betão à compressão e a diminuição da compacidade da mistura resultam numa diminuição na tensão de aderência. Quanto aos restantes varões, observa-se igual tendência em relação à resistência do betão à compressão e ao valor da compacidade.

A influência da área relativa das nervuras transversais, f_R , é também visível na tensão de aderência, sendo que o valor médio da tensão de aderência máxima para os varões de diâmetro 12 mm de aço A500 NR SD apresenta o valor máximo em todas as misturas. Para os restantes varões que apresentam valores inferiores a f_R são seguidos de valores de tensão de aderência também inferiores. No caso dos varões de 16 mm, onde estes apresentam o mesmo valor de f_R , o varão que obtém uma maior tensão de aderência é aquele que apresenta uma altura máxima das nervuras superior.

No presente estudo, os varões de aço inox apresentam tensões de aderência máxima inferiores ao aço A500 NR SD em ambos os diâmetros, mas estes resultados são explicados pelos parâmetros acima descritos. Relativamente aos varões de diâmetro 12 mm, os resultados são justificados essencialmente pela diferença no valor da área relativa das nervuras transversais, enquanto que no caso dos varões de 16 mm a diferença é devida à variação da altura máxima das nervuras entre os dois tipos de aço.

Comparando os valores propostos pelo *fib* MC2010 e os resultados experimentais observa-se que não existe uma boa relação entre ambos. Desta forma, propôs-se que a tensão de aderência máxima fosse estimada através da equação (5.12) que, contrariamente ao *fib* MC2010, considera a influência da área relativa das nervuras e da compacidade da mistura no valor da tensão de aderência máxima.

$$\tau_{máx} = 2,5 \times \sqrt{f_{cm}} \times k_{f_R} + k_{\sigma} \quad (5.12)$$

6. CONCLUSÕES

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões retiradas da análise dos resultados das diversas fases experimentais. Na primeira parte, resumiam-se as conclusões relativas aos betões com baixa dosagem de ligante, enquanto na segunda parte agrupam-se as conclusões relativas à aderência entre os dois tipos de varões de aço analisados e os betões em estudo. Na terceira e última parte, propõem-se desenvolvimentos futuros para que algumas das hipóteses aqui consideradas sejam validadas e, deste modo, a aderência seja melhor caracterizada.

6.1. Betão com baixa dosagem de ligante

Os betões com baixa dosagem de cimento (LBC) apresentam no estado fresco uma trabalhabilidade tipo terra húmida. Esta propriedade foi confirmada tanto através de ensaios específicos como durante o processo de vibração do LBC no interior dos moldes. Concluiu-se que o LBC necessita de uma maior energia de mistura e compactação do que os betões correntes e que a baixa trabalhabilidade pode representar uma dificuldade na sua utilização generalizada em obra.

Como estas misturas têm uma quantidade de cimento muito reduzida e elevada compacidade, são bastante sensíveis à quantidade de água utilizada, pelo que um pequeno desvio por excesso no cálculo da quantidade de água, originado por exemplo pelo uso de agregados que não tenham previamente sido secos, será refletido numa maior quantidade de água total e irá influenciar muito significativamente as características tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Em relação à resistência à compressão dos LBC aos 28 dias, observou-se que são sempre superiores às previstas pela Expressão de Feret, mesmo utilizando o parâmetro de cimento equivalente para ter em conta o uso de material pozzolânico. A expressão do EC2 para traçar a curva de evolução da resistência à compressão das misturas com o tempo, tendo em conta a resistência aos 28 dias, mostrou uma boa relação entre os resultados previstos e os obtidos experimentalmente, sendo que é necessário alterar o valor do coeficiente s , que depende unicamente do tipo de cimento utilizado.

No que respeita às restantes propriedades estudadas no estado endurecido, destaca-se que a relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão nestas misturas é equivalente à registada nos betões correntes. Os resultados sugerem que o módulo de elasticidade aumenta com o aumento da compacidade da mistura.

Atendendo ao que anteriormente foi referido, conclui-se que é possível reduzir a quantidade de cimento numa mistura e ao mesmo tempo apresentar características semelhantes ao do betão corrente para a mesma classe de resistência à compressão.

6.2. Aderência varão de inox - LBC

Em relação às variáveis estudadas neste trabalho, concluiu-se que a influência do diâmetro é um parâmetro difícil de quantificar, porque não foi possível isolar esta variável, pois ao variar o diâmetro do varão também se alteravam as características do perfil nervurado.

O efeito das nervuras na tensão de aderência é evidente, podendo o valor da área relativa de nervuras transversais, f_R , continuar a ser utilizado como estimativa da tensão de aderência. Com o aumento do valor de f_R observou-se um aumento da tensão de aderência. Também se observou que, para varões com igual f_R , aquele onde a altura das nervuras for maior irá igualmente apresentar valores de tensão máxima de aderência superiores. Atribui-se este efeito à maior dificuldade que o varão tem em escorregar devido ao bloqueio provocado pela altura das nervuras.

A influência do betão na tensão de aderência está patente nos resultados obtidos para as duas misturas ecológicas (LBC75 e LBC125), mas conclui-se que a resistência do betão à compressão não é o único fator que influencia o fenómeno de aderência entre os dois materiais. A compacidade parece influenciar a tensão de aderência e, por isso, é um parâmetro a ter em consideração em análises futuras, pois misturas com maior compacidade têm uma matriz mais densa e provocam um maior interbloqueio nas nervuras dos varões. Obtiveram-se valores da tensão de aderência máxima muito semelhantes para as misturas LBC75 e C250, com resistência à compressão de 21 e 38 MPa, respetivamente.

Comparando a curva dos resultados obtidos com a proposta pelo Model Code 2010, conclui-se que apenas os ensaios realizados com a mistura de referência (C250) têm um comportamento semelhante ao proposto pelo referido código.

Por último, propõe-se que a tensão de aderência máxima proposta pelo Model Code 2010 tenha em consideração o valor de f_R dos varões nervurados e o valor da compacidade da mistura de betão através dos fatores k_{f_R} e k_σ , respetivamente.

$$\tau_{m\acute{a}x} = 2,5 \times \sqrt{f_{cm}} \times k_{f_R} + k_\sigma \quad (6.12)$$

onde,

$$k_{f_R} = \frac{f_{R,j}}{0,056}$$

$$k_\sigma = \sigma_j[\%] - 0,81$$

Apesar da limitada campanha de ensaios, devido ao âmbito do trabalho desenvolvido ser de uma tese de mestrado, obteve-se uma boa relação entre os valores estimados e os resultados obtidos experimentalmente.

6.3. Perspetivas futuras

Na presente dissertação estudaram-se algumas características de diversas misturas com baixa dosagem de ligante e, no final, caracterizou-se a aderência entre varões de aço e misturas de betão. Como os resultados foram bastante satisfatórios, tanto ao nível do betão, como da tensão de aderência, seria interessante continuar o estudo com este tipo de misturas ecológicas.

O estudo da durabilidade do LBC encontra-se fora do âmbito da dissertação, mas é de extrema importância. Se por um lado os regulamentos propõem quantidades mínimas de cimento em função da classe de exposição a que os elementos de betão estão sujeitos, por outro, a elevada compacidade faz com que o betão tenha uma matriz mais densa o que poderá dificultar a degradação da estrutura.

Durante a realização dos ensaios de arrancamento com os varões de diâmetro de 16 mm e para as misturas ecológicas (LBC125 e LBC75) ocorreu fissuração dos provetes, sendo por isso da máxima importância justificar este fenómeno. Assim sendo, considera-se de grande interesse a repetição dos ensaios de arrancamento para este diâmetro e misturas, mas com provetes de dimensão superior aos utilizados e verificar se estes provetes fissuram. Com um recobrimento do varão superior existe um maior confinamento e as tensões de tração provocadas pelas nervuras podem não atingir a superfície do betão.

De forma a validar a expressão proposta, sugere-se que se continue o estudo sobre a influência da compactidade no valor da tensão de aderência máxima. Assim, seria interessante a realização de ensaios de arrancamento em misturas com compactidade entre 0,81 e 0,86.

Por último seria interessante estudar o comportamento das misturas LBC em elementos estruturais, como vigas, pilares e lajes de forma a verificar se estas misturas têm o mesmo comportamento que o betão corrente.

BIBLIOGRAFIA

- Alves, H. - Formulação e caracterização mecânica de betões com baixa dosagem de cimento. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Engenharia de Coimbra, Coimbra, 2016.
- Andreasen, A.H.M. and Andersen, J. (1930) Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). *Colloid & Polymer Science*, Vol. 50 (3), pp. 217-228.
- André, J., Pipa, M. – Influência na aderência aço-betão da alteração local da configuração geométrica das nervuras de armadura de aço. BE2010: Encontro Nacional de Betão Estrutural, Lisboa, 2010.
- Burke, S. – Missing Values, Outliers, Robust Statistics & Non-parametric Methods, LC GC Europe Online Supplement – Statistics and data analysis, pp.19-24. 2005.
- Cairns, J., Du, Y., e Law, D. - Influence of corrosion on the friction characteristics of the steel/concrete interface. *Construction and Building Materials*, Volume 21, pp.190–197. 2007.
- Costa, H. - Betões estruturais de agregados leves. Aplicações em prefabricação e reforço de estruturas, Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2012.
- Costa, A., Appleton, J. – Estruturas de Betão I – Parte 2: Materiais, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2002.
- Coutinho, A.S. - *Fabrico e propriedades do betão*. Volume I, LNEC, Lisboa, 1988.
- Coutinho, A.S. - *Fabrico e propriedades do betão*. Volume II, LNEC, Lisboa, 1988.
- Coutinho, A.S. - *Fabrico e propriedades do betão*. Volume III, LNEC, Lisboa, 1988.
- Damineli, B.L., Kemeid, F.M., Aguiar, P.S., John, V.M. - Measuring the eco-efficiency of cement use. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 32, pp.555–562. 2010.
- Eligehausen, R.; Popov, E. P. e Bertero, V V.; Local Bond Stress-Slip Relationships of Deformed Bars Under Generalized Excitations; Report No UCB/EERC-83/23; Earthquake Engineering Research Center; University of California; Berkeley; California; October 1983.
- Fennis, S.A.A.M. - *Design of Ecological Concrete by Particle Packing Optimization*. PhD Thesis, Delft: Delft University of Technology, January, 2011
- Fennis, S.A.A.M., Grunewald, S., Walraven, J.C., Uijl, J.A. den. - Influence of particle packing density on the rheology of low cement content concrete, *Concrete structures for sustainable community*, ed. by Bager, D.H., and Silfwerbrand, J., pp.455-458, 2012a.
- Fennis, S.A.A.M., Walraven, J.C. - Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design. *Heron*, Vol. 57, pp.73–101. 2012
- Fennis, S.A.A.M., Walraven, J.C., Uijl, J.A. den. - The use of particle packing models to design ecological concrete. *Heron*, Vol. 54, pp.183–202. 2009.

- Fennis, S.A.A.M., Walraven, J.C., Uijl, J.A.den. - Compaction-interaction packing model: regarding the effect of fillers in concrete mixture design. *Materials and Structures*, pp.463–478. 2012b.
- Fennis, S.A.A.M., Walraven, J.C., Uijl, J.A.den. - Defined-performance design of ecological concrete. *Materials and Structures*, pp.639–650. 2012c.
- Fernandes, R. - A influência das ações repetidas na aderência aço-concreto. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- Filho, L., Silva, B., Bosco, V., Gomes, L., Barbosa, M., Lorrain, M. - Analysis of the influence of rebar geometry variations on bonding strength in the pull-out test. Conference paper: Bond in Concrete 2012, pp.63-68, 2012.
- Fuller, W.B. and Thompson, S.E. (1907) The laws of proportioning concrete. *ASCE J. Transport.*, Vol. 59, pp. 67-143.
- Funk, J.E., Dinger, D.R. and Funk, J.E.J. (1980) Coal Grinding and Particle Size Distribution Studies for Coal-Water Slurries at High Solids Content. Final Report, Empire State Electric Energy Research Corporation (ESEERCO). New York.
- Fischer, C., Ožbolt, J. - Influence of bar diameter and concrete cover on bond degradation due to corrosion. Conference paper: Bond in Concrete 2012, pp.445-451, 2012.
- Gavilán, S., Silva, B., Filho, L., Barbosa, M. - Ensayo de arrancamiento, relación recubrimiento-diámetro de barras para evitar el efecto splitting. Conference paper: XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, 2014.
- Guerra, M. - Aderência de varões de aço a betões com incorporação de agregados grossos reciclados de betão. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2013.
- Hjorth, O.; Ein Beitrag zur Frage der Festigkeiten und des Verbundverhaltens von Stahl und Beton bei hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten; PhD Thesis; Techn. Univ. of Brunswick; Brunswick; Germany; 1976.
- Jorge, S., Costa, D., Júlio, E. - Influence of anti-corrosive coatings on the bond of steel rebars to repair mortars. *Engineering Structures*, Vol. 36, pp.372-378, 2012.
- Kapelko, A. - Possibilities of cement content reduction in concretes with admixtures of superplasticiser SNF. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. XII, pp.117–126. 2006.
- Lúcio, V., Marreiros, R. - Estado do conhecimento em aderência de varões nervurados de aço ao betão em elementos de betão armado. Centro de Investigação em Estruturas e Construção da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2005.
- Lorrain, M.S., Caetano, L.F., Silva, B.V., Gomes, L.E.S., Barbosa, M.P., Filho, L.C.P.S. - Bond strength and rib geometry: a comparative study of the influence of deformation patterns on anchorage bond strength. *Proceedings of the 3rd Fib International Congress – 2010*.

- Lourenço, J., Júlio, E., e Maranhã, P. - Betões de agregados leves de argila expandida - Guia para a sua utilização. 1ª edição, APEB, Lisboa, 2004, pp. 11–81, ISBN: 9729071306.
- Louro, A. - Comportamento de vigas de betão armado com aço inoxidável. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2008.
- Louro, A. - Caracterização da aderência de varões nervurados sujeitos a ações repetidas e alternadas. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.
- Louro, S. - Estudo da aderência aço - betão em elementos estruturais de BA. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2011.
- Lowes, L.N.; Finite element modelling of reinforced concrete beam-column bridge connections; PhD Thesis; University of California; Berkeley; USA; 1999.
- Muttoni, A., Ruiz, M.F. - Influence of geometric, strain and size effects on bond in structural concrete. Conference paper: Bond in Concrete 2012, pp.15-21, 2012.
- Proske, T., Hainer, S., Rezvani, M., Graubner, C.-A. - Eco-friendly concretes with reduced water and cement content – Mix design principles and application in practice. *Construction and Building Materials*. pp.413-421. 2014.
- Talbot, A.N. and Richart, F.E. (1923) The strength of concrete in relation to the cement, aggregates and water. University of Illinois Engineering Experiment Station, Bulletin No. 137.
- Task Group Bond Models; State-of-art report: "Bond of Reinforcement in Concrete"; FIB Bulletin 10; August 2000.
- Tassios, T.P.; Properties of bond between concrete and steel under load cycles idealizing seismic actions; CEB - Bulletin d' Information N°131, Vol. 1; Rome; Italy; 1979.
- Yu, R., Spiesz, P., Brouwers, H.J.H. - Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 55, pp.383–394. 2015.
- Yu, R., Spiesz, P., Brouwers, H.J.H. - Development of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC): Towards and efficient utilization of binders and fibres. *Construction and Building Materials*, Vol. 79, pp.273–282. 2015.

Normas

- EN 10080:2005 - Steel for the reinforcement of concrete – Weldable reinforcing steel - General.
- EN ISO 15630-1:2002 - Steel for the reinforcement and prestressing of concrete - Test methods - Part 1: Reinforcing bars, wire rod and wire.
- EN ISO 6892:2009 - Metallic materials - Tensile testing.

LNEC E 397 - Betões. Determinação do módulo de elasticidade em compressão. LNEC, Lisboa 1993.

LNEC E 460 - Varões de Aço A500NR de Ductilidade Especial Para Armaduras de Betão Armado. Características, Ensaio E Marcação. LNEC, Lisboa 2010.

MODEL CODE 2010 - Final draft - Volume 1. International Federation for Structural Concrete (fib). 2012.

NP 4015-1 - Máquinas de ensaios mecânicos. Verificação das máquinas para ensaios de compressão e flexão. Parte 1: Verificação do sistema de medição da força. IPQ, Lisboa 1990.

NP EN 1097-3 Ensaio para a determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados: Método para a determinação da massa volúmica e dos vazios. IPQ, Lisboa 2003.

NP EN 12350-1 - Ensaio do betão fresco. Parte 1: Amostragem. IPQ, Lisboa 2002.

NP EN 12350-2 - Ensaio do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento. IPQ, Lisboa 2002.

NP EN 12350-3 - Ensaio do betão fresco. Parte 3: Ensaio Vêbê. IPQ, Lisboa 2002.

NP EN 12350-4 - Ensaio do betão fresco. Parte 4: Grau de compactabilidade. IPQ, Lisboa 2002.

NP EN 12350-6 - Ensaio do betão fresco. Parte 6: Massa volúmica. IPQ, Lisboa 2002.

NP EN 12350-7 - Ensaio do betão fresco. Parte 7: Determinação do teor de ar. IPQ, Lisboa 2002.

NP EN 12390-1 - Ensaio do betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensão e outros requisitos para o ensaio de provetes e para moldes. IPQ, Lisboa 2002.

NP EN 12390-2 - Ensaio do betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes de ensaio de resistência mecânica. IPQ, Lisboa 2002.

NP EN 12390-3 - Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio. IPQ, Lisboa 2002.

NP EN 12390-4 - Ensaio do betão endurecido. Parte 4: Características das máquinas de ensaio. IPQ, Lisboa 2002.

NP EN 12390-6 - Ensaio do betão endurecido. Parte 6: Resistência à tração por compressão diametral. IPQ, Lisboa 2011.

NP EN 12390-7 - Ensaio do betão endurecido. Parte 7: Massa volúmica. IPQ, Lisboa 2002.

NP EN 1992 - 1-1 - Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão . Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. IPQ, Lisboa 2004.

NP EN 206-1 - Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. IPQ, Lisboa 2007.

NP EN 933-1 - Ensaio para determinação das características geométricas dos agregados: Análise granulométrica. Método de peneiração. IPQ, Lisboa 2000.

NP EN 933-2 - Ensaio para determinação das características geométricas dos agregados: Determinação da distribuição granulométrica. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas. IPQ, Lisboa 1999.

RILEM/CEB/FIP - Bond test for reinforcement steel: 1. Beam test (RC5), CEB manual on concrete reinforcement technology, 1983.

ANEXOS

A1. COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS DE FENNIS (2011)

Table 4.1 Mixture compositions [kg/m^3] and the measured rheological and mechanical properties of series A and B

Composition	Mixtures										
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	B5	B6	
CEM I 32.5 R	250	250	250	250	175	-	125	-	75	-	
CEM III/B 42.5	-	-	-	-	-	175	-	125	-	75	
Fly ash SMZ	-	-	-	-	75	75	125	125	175	175	
Aggregates 4-16	1126	929	1243	1186	1269	1264	1261	1256	1251	1248	
Sand 0-4	867	1063	748	802	749	745	744	741	738	736	
Cugla Cretoplast SL-01 con. 35	1.3	1.3	1.3	1.3	2	1.3	0.85	1.3	0.85	0.85	
Effective amount of water	158	158	158	158	119	119	119	119	119	119	
Water cement ratio	0.63	0.63	0.63	0.63	0.68	0.68	0.95	0.95	1.59	1.59	
Water powder ratio	0.63	0.63	0.63	0.63	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	
estimated density (1% air)	2374	2374	2374	2373	2406	2397	2391	2384	2375	2371	
Optimization of aggregate structure	PSD Practice	Dinger Funk	CPM	CPM gap graded	CPM	CPM	CPM	CPM	CPM	CPM	
Rheological											
Slump	12	12	14	3	17	7	7	14	3	3	
Air content	1.7	1.7	1.4	1.3	1.4	1.5	1.3	0.8	1.1	1.0	
Density	2361	2371	2371	2359	2389	2404	2404	2395	2388	2379	
Mechanical											
3-day cube compressive strength	13.4*	17.7	17.6	19.1	-	-	-	-	-	-	
7-day cube compressive strength	21.5	23.5	22.11*	23.2	25.1	23.1	15.8	11.9	5.7	4.3	
14-day cube compressive strength	26.1	27.6	27.6	28.7	-	-	-	-	-	-	
28-day cube compressive strength	31.8	31.0	31.8	31.7	39.4	33.4	26.3	21.4	9.0	10.6	
56-day cube compressive strength	-	-	-	-	47.0	36.2	30.6	25.0	12.5	14.6	
90-day cube compressive strength	-	-	-	-	49.3	38.7	38.1	28.7	14.4	16.1	
365-day cube compressive strength	-	-	-	-	69.4	45.3	59.2	36.7	43.5	23.7	
28-day splitting tensile strength	2.6	2.7	2.7	1.2	3.0	3.1	2.1	2.1	1.0	1.1	
28-day prism compressive strength	23.6	23.8	23.6	25.8	27.3	28.1	19.5	16.1	8.0	8.2	
28-day modulus of elasticity	31500	31500	32000	31500	32500	32500	30000	29500	22000	23000	

* measurement was one day earlier, at 2 days or 6 days

A2. RESULTADOS INDIVIDUAIS MISTURAS DE BETÃO

São apresentados os resultados individuais dos ensaios para avaliação da resistência à compressão e tração.

A2.1. Primeira e segunda fases experimentais

A2.1.1. Ensaio de compressão

A2.1.1.1. Força de compressão (kN)

Idade [dias]		RC250_v 1	LBC125_v 1	RC250_v 2	LBC125	LBC125_v 2	LBC100	LBC75
1		-	-	178	276	-	161,32	98,8
2		-	-	331,56	404,31	-	-	-
		-	-	354,67	401,08	-	-	-
4		-	-	-	-	-	297,23	197,9
		-	-	-	-	-	306,16	186,25
7		1145,1	458,4	583,9	585,53	555,3	375,52	260,13
		1119	395,6	571,81	557,32	518,9	360,3	263,54
		-	-	-	-	565,35	-	-
28	com cura	1357,6	560,1	723,41	712,8	-	568,66	457,22
		1319,1	567	767,52	682,6	-	549,52	450,82
		-	-	792,69	701,1	-	562,68	464,13
28	sem cura	-	-	688	679	-	491	390
		-	-	703	694	-	494	393
56		-	-	775	770,7	-	682,8	585
		-	-	768,4	752,8	-	577,2	606,2

A2.1.1.2. Resistência à compressão (MPa)

Idade [dias]		RC250_v 1	LBC125_v 1	RC250_v 2	LBC125	LBC125_V 2	LBC100	LBC75
1		-	-	7,91	12,27	-	7,17	4,39
2		-	-	14,74	17,97	-	-	-
		-	-	15,76	17,83	-	-	-
4		-	-	-	-	-	13,21	8,80
		-	-	-	-	-	13,61	8,28
7		50,89	20,37	25,95	26,02	24,68	16,69	11,56
		49,73	17,58	25,41	24,77	23,06	16,01	11,71
		-	-	-	-	25,13	-	-
28	com cura	60,34	24,89	32,15	31,68	-	25,27	20,32
		58,63	25,20	34,11	30,34	-	24,42	20,04
		-	-	35,23	31,16	-	25,01	20,63
28	sem cura	-	-	30,58	30,18	-	21,82	17,33
		-	-	31,24	30,84	-	21,96	17,47
56		-	-	34,44	34,25	-	30,35	26,00
		-	-	34,15	33,46	-	25,65	26,94

A2.1.1.3. Massa dos provetes (g)

Idade [dias]	RC250_v 1	LBC125_v 1	RC250_v 2	LBC125	LBC125_v 2	LBC100	LBC75	
1	-	-	7910	8160	-	-	7884	
2	-	-	7947	8170	-	-	-	
	-	-	7965	8148	-	-	-	
4	-	-	-	-	-	7958	7852	
	-	-	-	-	-	7890	7866	
7	8288	8228	7931	8197	7848	7980	7940	
	8214	8248	7864	8056	8016	7976	7907	
	-	-	-	-	8066	-	-	
28	com cura	8200	8255	8020	8237	-	8068	7960
		8289	8215	7985	8252	-	8085	7978
	sem cura	-	-	8005	8240	-	8074	7970
		-	-	7820	7990	-	7840	7770
56	-	-	7820	8090	-	7890	7740	
	-	-	8030	8266	-	8090	7963	
	-	-	7986	8254	-	8070	7981	

A2.1.2. Tracção

A2.1.2.1. Força de compressão (kN)

Idade [dias]	RC250_v 1	LBC125_v 1	RC250_v 2	LBC125	LBC125_v 2	LBC100	LBC75
28	-	-	248	186,3	-	178,9	157,4
	-	-	237	202	-	189,2	163,4
	-	-	249	204	-	171,1	160,45

A2.1.2.2. Tensão de tracção (MPa)

Idade [dia]	RC250_v 1	LBC125_v 1	RC250_v 2	LBC125	LBC125_v 2	LBC100	LBC75
28	-	-	3,51	2,64	-	2,53	2,23
	-	-	3,35	2,86	-	2,68	2,31
	-	-	3,52	2,89	-	2,42	2,27

A2.2. Terceira fase experimental

A2.2.1. Ensaio de compressão

A2.2.1.1. Força de compressão (kN)

Amassadura	idade [dias]	C250	LBC125	LBC75
1	3	648	499	-
1	3	616	526	-
1	4	-	-	234
1	4	-	-	243
1	7	739	597,7	341
1	7	717	587,6	317
1	14	800	657	377
1	14	820	666	409
1	28	874	709	468
1	28	880	744	488
1	28	853	719	467,2
2	28	764	706	444,8
2	28	765	730	435,4
2	28	760	722	426
1	56	915,3	727	559,7
1	56	905,4	764	545,3
1	84	912	750	538,3
1	84	939,1	786	571,4

A2.2.1.2. Resistência à compressão (MPa)

Amassadura	idade [dias]	C250	LBC125	LBC75
1	3	28,4	22	-
1	3	27	23,4	-
1	4	-	-	10,3
1	4	-	-	10,8
1	7	32,6	26,2	15
1	7	31,9	25,8	13,9
1	14	35,3	29,2	16,6
1	14	36	29,6	18,2
1	28	38,6	31,3	20,7
1	28	38,9	32,8	21,5
1	28	37,7	31,7	20,6
2	28	33,7	31,2	19,5
2	28	33,8	32,4	19,2
2	28	33,6	31,9	18,7
1	56	40,4	32,1	24,7
1	56	39,7	33,7	24,1
1	84	40	32,9	23,9
1	84	41,5	34,7	25,2

A2.2.1.3. Massa dos provetes (g)

Amassadura	idade [dias]	C250	LBC125	LBC75
1	3	8043	8165	-
1	3	8049	8125	-
1	4	-	-	7950
1	4	-	-	7933
1	7	8000	8069	7925
1	7	7992	8015	7854
1	14	7946	7995	7871
1	14	8007	8111	7827
1	28	7932	8008	7850
1	28	7947	8008	7888
1	28	7948	8091	7894
2	28	7958	7964	7894
2	28	7935	7936	7882
2	28	7941	7959	7821
1	56	7945	7916	7871
1	56	7948	7990	7835
1	84	7910	7946	7828
1	84	7888	7967	7899

A3. MAPA IDENTIFICAÇÃO DOS PROVETES ARRANCAMENTO

Para garantir uma fácil identificação visual dos provetes de arrancamento aquando da realização dos ensaios, face às variáveis envolvidas, optou-se por diferenciar cada amassadura por cores, como se pode consultar na tabela e figura seguintes. Em relação à diferenciação entre os dois tipos de aço utilizados, não foi necessário utilizar um sistema de cores devido à diferença nas características das nervuras e do aspeto mais brilhante dos varões de aço inoxidável.

	1ª amassadura (Ø12)	2ª amassadura (Ø16)
C250	Branco	Azul
LBC125	Preto	Verde/Amarelo
LBC75	Vermelho	Amarelo



Diâmetro	Provete nº	C250 – C250		LBC125 - LBC125		LBC75 - LBC75	
		A500 - A	AISI304 - i	A500 - A	AISI304 - i	A500 - A	AISI304 - i
12	1	C250_A12_1	C250_i12_1	LBC125_A12_1	LBC125_i12_1	LBC75_A12_1	LBC75_i12_1
12	2	C250_A12_2	C250_i12_2	LBC125_A12_2	LBC125_i12_2	LBC75_A12_2	LBC75_i12_2
12	3	C250_A12_3	C250_i12_3	LBC125_A12_3	LBC125_i12_3	LBC75_A12_3	LBC75_i12_3
12	4	C250_A12_4	C250_i12_4	LBC125_A12_4	LBC125_i12_4	LBC75_A12_4	LBC75_i12_4
12	5	C250_A12_5	C250_i12_5	LBC125_A12_5	LBC125_i12_5	LBC75_A12_5	LBC75_i12_5
16	1	C250_A16_1	C250_i16_1	LBC125_A16_1	LBC125_i16_1	LBC75_A16_1	LBC75_i16_1
16	2	C250_A16_2	C250_i16_2	LBC125_A16_2	LBC125_i16_2	LBC75_A16_2	LBC75_i16_2
16	3	C250_A16_3	C250_i16_3	LBC125_A16_3	LBC125_i16_3	LBC75_A16_3	LBC75_i16_3
16	4	C250_A16_4	C250_i16_4	LBC125_A16_4	LBC125_i16_4	LBC75_A16_4	LBC75_i16_4
16	5	C250_A16_5	C250_i16_5	LBC125_A16_5	LBC125_i16_5	LBC75_A16_5	LBC75_i16_5

1ª série - 1ª amassadura	2ª série - 1ª amassadura	2ª série - 1ª amassadura
1ª série - 2ª amassadura	2ª série - 2ª amassadura	3ª série - 2ª amassadura

A4. CALENDARIZAÇÃO DOS ENSAIOS

		Betonagem	Desmolde	Compressão	POT - C250	POT - LBC125	POT - LBC75
Junho	22	Seg	1ª série				
	23	Ter					
	24	Qua					
	25	Qui		1ª série	1ª série_1A - 3 dias		
	26	Sex	2ª série				
	27	Sab					
	28	Dom					
	29	Seg		2ª série	2ª série_1A - 3 dias 1ª série_1A - 7 dias		
	30	Ter					
Julho	1	Qua					
	2	Qui	3ª série				
	3	Sex			2ª série_1A - 7 dias		
	4	Sab					
	5	Dom					
	6	Seg		3ª série	1ª série_1A - 14 dias 3ª série_1A - 4 dias		
	7	Ter					
	8	Qua					
	9	Qui			3ª série_1A - 7 dias		
	10	Sex			2ª série_1A - 14 dias		
	11	Sab					
	12	Dom					
	13	Seg					
	14	Ter					
	15	Qua					
	16	Qui			3ª série_1A - 14 dias	i12 e A12	
	17	Sex				i16 e A16	
	18	Sab					
	19	Dom					
	20	Seg			1ª série - 28 dias		
	21	Ter				i16 e A16	
	22	Qua					
	23	Qui				i12 e A12	
	24	Sex			2ª série - 28 dias		
	25	Sab					
	26	Dom					
	27	Seg					
	28	Ter					i12, A12 e A16
	29	Qua					i16
	30	Qui			3ª série - 28 dias		
	31	Sex					
Agosto	1	Sab					
	2	Dom					
	3	Seg					
	4	Ter					
	5	Qua					
	6	Qui					
	7	Sex					
	8	Sab					
	9	Dom					
	10	Seg					

Agosto	11	Ter			
	12	Qua			
	13	Qui			
	14	Sex			
	15	Sab			
	16	Dom			
	17	Seg		1ª série_1A - 56 dias	
	18	Ter			
	19	Qua			
	20	Qui			
	21	Sex		2ª série_1A - 56 dias	
	22	Sab			
	23	Dom			
	24	Seg			
	25	Ter			
	26	Qua			
27	Qui		3ª série_1A - 56 dias		
28	Sex				
29	Sab				
30	Dom				
31	Seg				
Setembro	1	Ter			
	2	Qua			
	3	Qui			
	4	Sex			
	5	Sab			
	6	Dom			
	7	Seg			
	8	Ter			
	9	Qua			
	10	Qui			
	11	Sex			
	12	Sab			
	13	Dom			
	14	Seg		1ª série_1A - 90 dias	
	15	Ter			
	16	Qua			
17	Qui				
18	Sex		2ª série_1A - 90 dias		
19	Sab				
20	Dom				
21	Seg				
22	Ter				
23	Qua				
24	Qui		3ª série_1A - 90 dias		

A5. RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO

Na primeira parte encontram-se os resultados em força e algumas observações que foram registadas no decorrer dos ensaios, enquanto na segunda parte os resultados são apresentados em tensão de aderência e onde se representa o andamento da tensão de aderência vs deslizamento. Também nesta última parte, foram introduzidas fotografias nos provetes onde ocorreu fissuração.

A5.1. Resultados do ensaio em força [kN] e observações durante a realização do ensaio

A5.1.1. Mistura C250

Data: 16/jul

ID	F [kN]	Observações	PVC	Spliting
C250_A12_1	43,09		Não	Não
C250_A12_2	42,49	Custou a sair PVC	Não	Não
C250_A12_3	50,08		Não	Não
C250_A12_4	38,87		Não	Não
C250_A12_5	53,78		Não	Não
C250_i12_1	34,97	Sem LVDT	Não	Não
C250_i12_2	31,32		Não	Não
C250_i12_3	35,89		Não	Não
C250_i12_4	38,1		Não	Não

Data: 17/jul

ID	F [kN]	Observações	PVC	Spliting
C250_i12_5	30,92	LVDT começou no 0,8 mm	Não	Não
C250_i16_1	65,62	Tinha betão no interior do PVC	Não	Não
C250_i16_2	62,26		Não	Não
C250_i16_3	56,64	Tinha betão no interior do PVC	Não	Não
C250_i16_4	61,38		Não	Não
C250_i16_5	45,78		Não	Não
C250_A16_1	66,61		Não	Não
C250_A16_2	62,37		Não	Não
C250_A16_3	67,97		Não	Não
C250_A16_4	70,66	Custou a sair PVC	Não	Não
C250_A16_5	69,73		Sim	Não

A5.1.2. Mistura LBC125

Data: 21/jul

ID	F [kN]	Observações	PVC	Spliting
LBC125_i16_1	89,64	Foto com fissuras	Com	Sim
LBC125_i16_2	84,52		Sem	Não
LBC125_i16_3	88,05		Sem	Não
LBC125_i16_4	80,77	Esquema com fissuras em faces opostas	Com	Sim
LBC125_i16_5	91,76		Com	Sim
LBC125_A16_1	93,32		Sem	Sim
LBC125_A16_2	90,77		Sem	Sim
LBC125_A16_3	94,77	Fissurou bastante	Sem	Sim
LBC125_A16_4	87,81		Com	Não
LBC125_A16_5	83,93		Sem	Sim
LBC125_A12_1	52,97		Sem	Não
LBC125_A12_2	55,75		Com	Não
LBC125_A12_3	57,9		Com	Não

Data: 23/jul

ID	F [kN]	Observações	PVC	Spliting
LBC125_A12_4	52,35		Com	Não
LBC125_A12_5	59,92		Com	Não
LBC125_i12_1	47,53		Sem	Não
LBC125_i12_2	41,42		Sem	Não
LBC125_i12_3	48,83		Sem	Não
LBC125_i12_4	51,45		Com	Não
LBC125_i12_5	49,97		Com	Não

A5.1.3. Mistura LBC75

Data: 28/jul

ID	F [kN]	Observações	PVC	Spliting
LBC75_i12_1	31,49		Com	Não
LBC75_i12_2	40,33		Com	Não
LBC75_i12_3	37,61	Não foi esforçado para tirar PVC	Com	Não
LBC75_i12_4	38,22		Sem	Não
LBC75_i12_5	35,09		Sem	Não
LBC75_A12_1	55,15	Não foi esforçado para tirar PVC	Com	Não
LBC75_A12_2	48,96		Com	Não
LBC75_A12_3	54,07		Com	Não
LBC75_A12_4	46,85	Abrir e fechar garra (faltava Zero cabeça)	Sem	Não
LBC75_A12_5	42,81		Sem	Não
LBC75_A16_1	71,37		Com	Sim
LBC75_A16_2	66,01		Com	Sim
LBC75_A16_3	68,56		Com	Não
LBC75_A16_4	69,45		Sem	Sim

Data: 29/jul

ID	F [kN]	Observações	PVC	Spliting
LBC75_A16_5	69,22	Betão no interior do tubo PVC (fotos)	Com	Sim
LBC75_i16_1	62,2		Com	Não
LBC75_i16_2	58,69		Sem	Não
LBC75_i16_3	60,73		Sem	Sim
LBC75_i16_4	61,5		Sem	Sim
LBC75_i16_5	62,91		Sem	Não

A5.2. Análise estatística

A5.2.1. Análise estatística com Outliers para a mistura C250

Provete	$\tau_{0,01}$	$\tau_{0,1}$	$\tau_{1,0}$	$\tau_{d,média}$	$\tau_{d,máx}$	$lim_{inf}, \tau_{d,média}$	$lim_{sup}, \tau_{d,média}$	$lim_{inf}, \tau_{d,máx}$	$lim_{sup}, \tau_{d,máx}$	Pertence $lim \tau_{d,média}$	Pertence $lim \tau_{d,máx}$	
C250_A12_1	2,76	7,18	19,03	9,66	19,23					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
C250_A12_2	1,06	5,95	18,42	8,47	18,96					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
C250_A12_3	1,34	7,18	22,15	10,22	22,34	7,95	11,37	13,52	24,94	VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
C250_A12_4	0,82	3,53	16,39	6,92	17,36					FALSO	VERDADEIRO	FALSO
C250_A12_5	1,29	4,32	23,36	9,66	23,99					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
			mediana	9,66	19,23							
			desvio padrão	1,32	2,71							
C250_i12_1	-	-	-	-	-					-	-	-
C250_i12_2	1,04	3,58	13,42	6,01	14,26					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
C250_i12_3	1,15	3,46	16,52	7,04	16,57	5,00	8,14	11,91	18,96	VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
C250_i12_4	1,54	4,98	17,45	7,99	17,59					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
C250_i12_5	1,36	2,97	13,97	6,1	14,3					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
			mediana	6,57	15,435							
			desvio padrão	0,93	1,67							
C250_A16_1	2,38	5,58	16,81	8,26	18,77							
C250_A16_2	0,63	3,61	16,47	6,9	17,79							
C250_A16_3	2,42	5,88	16,45	8,25	19,38							
C250_A16_4	1,22	4,62	17,75	7,86	20,15							
C250_A16_5	0,61	3,32	17,43	7,12	19,86							
			mediana	7,86	19,38							
			desvio padrão	0,64	0,94							
C250_i16_1	2,29	5,4	17,46	8,38	19,22					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
C250_i16_2	2,12	5,15	17,49	8,25	18,06					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
C250_i16_3	0,7	1,99	15,82	6,17	16,16	2,92	10,30	14,05	20,09	VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
C250_i16_4	0,58	2,84	16,4	6,61	17,07					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
C250_i16_5	0,87	3,28	12,05	5,4	13,05					VERDADEIRO	FALSO	FALSO
			mediana	6,61	17,07							
			desvio padrão	1,31	2,34							

A5.2.2. Análise estatística com Outliers para a mistura LBC125

Provete	$\tau_{0,01}$	$\tau_{0,1}$	$\tau_{1,0}$	$\tau_{d,média}$	$\tau_{d,máx}$	$lim_{inf}, \tau_{d,média}$	$lim_{sup}, \tau_{d,média}$	$lim_{inf}, \tau_{d,máx}$	$lim_{sup}, \tau_{d,máx}$	Pertence $lim \tau_{d,média}$	Pertence $lim \tau_{d,máx}$	
LBC125_A12_1	0,95	4,86	22,94	9,58	23,58					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
LBC125_A12_2	3,95	9,14	24,67	12,59	24,81					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
LBC125_A12_3	3,02	9,78	25,71	12,84	25,78	8,22	15,18	21,06	28,57	VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
LBC125_A12_4	0,57	5,52	21,89	9,33	23,15					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
LBC125_A12_5	1,83	7,82	25,44	11,7	26,5					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
			mediana	11,7	24,81							
			desvio padrão	1,66	1,42							
LBC125_i12_1	2,09	6,88	21	9,99	21					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
LBC125_i12_2	0,64	6,05	18,31	8,33	18,31					FALSO	FALSO	FALSO
LBC125_i12_3	1,12	5,82	21,07	9,34	21,55	8,56	10,88	19,87	23,23	VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
LBC125_i12_4	1,05	7,1	22,28	10,14	22,74					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
LBC125_i12_5	0,87	6,42	21,87	9,72	22,07					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
			mediana	9,72	21,55							
			desvio padrão	0,72	1,70							
LBC125_A16_1	3,29	8,27	22,26	11,28	23,4					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
LBC125_A16_2	2,32	6,97	21,61	10,3	22,74					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
LBC125_A16_3	3,47	8,88	22,99	11,78	23,77	8,69	12,59	20,48	25,00	VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
LBC125_A16_4	1,9	6,42	21,2	9,84	22					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
LBC125_A16_5	3,23	8,05	20,64	10,64	21,04					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
			mediana	10,64	22,74							
			desvio padrão	0,77	1,10							
LBC125_i16_1	2,77	8,28	22,08	11,05	22,48					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
LBC125_i16_2	2,49	7,66	20,82	10,32	21,21					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
LBC125_i16_3	2,48	7,56	21,98	10,67	22,06	9,51	11,83	19,47	24,66	VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
LBC125_i16_4	2,33	7,62	19,69	9,88	19,89					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
LBC125_i16_5	3,17	8,7	22,64	11,5	23					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
			mediana	10,67	22,06							
			desvio padrão	0,63	1,22							

A5.2.1. Análise estatística com Outliers para a mistura LBC75

Provete	$\tau_{0,01}$	$\tau_{0,1}$	$\tau_{1,0}$	$\tau_{d,média}$	$\tau_{d,máx}$	$lim_{inf,\tau_{d,média}}$	$lim_{sup,\tau_{d,média}}$	$lim_{inf,\tau_{d,máx}}$	$lim_{sup,\tau_{d,máx}}$	Pertence $lim \tau_{d,média}$	Pertence $lim \tau_{d,máx}$	
LBC75_A12_1	0,74	5,29	22,7	9,57	24,65					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
LBC75_A12_2	1,33	5,06	21,35	9,25	21,87					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
LBC75_A12_3	3,14	8,07	24,1	11,77	24,1	8,12	10,38	15,06	28,68	FALSO	VERDADEIRO	FALSO
LBC75_A12_4	1,99	4,66	19,97	8,88	20,96					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
LBC75_A12_5	0,22	2,66	18,89	7,25	19,14					FALSO	VERDADEIRO	FALSO
			mediana	9,25	21,87							
			desvio padrão	1,62	2,27							
LBC75_j12_1	0,04	2,94	14,01	5,66	14,03					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
LBC75_j12_2	1,67	6,67	18	8,78	18					FALSO	VERDADEIRO	FALSO
LBC75_j12_3	0,93	4,32	16,51	7,25	16,81	5,02	8,38	13,30	20,32	VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
LBC75_j12_4	0,31	2,91	16,88	6,7	17,06					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
LBC75_j12_5	0,63	3,77	15,34	6,58	15,66					VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
			mediana	6,7	16,81							
			desvio padrão	1,15	1,52							
LBC75_A16_1	2,02	6,75	19,2	9,32	19,51							
LBC75_A16_2	1,47	4,92	17,32	7,9	18,21							
LBC75_A16_3	3,02	7,36	18,04	9,47	18,9							
LBC75_A16_4	2,18	5,37	18,57	8,71	19,16							
LBC75_A16_5	2,35	5,78	17,86	8,66	18,85							
			mediana	8,71	18,9							
			desvio padrão	0,62	0,48							
LBC75_j16_1	1,37	4,8	16,57	7,58	16,96							
LBC75_j16_2	1,81	4,73	15,45	7,33	16							
LBC75_j16_3	1,53	4,75	15,47	7,25	16,56							
LBC75_j16_4	1,42	4,78	16,64	7,62	16,77							
LBC75_j16_5	0,75	4,87	16,33	7,32	17,16							
			mediana	7,33	16,77							
			desvio padrão	0,17	0,45							