

Aderência entre varões de aço inoxidável e betão com baixa dosagem de ligante

Bond between stainless steel reinforcing bars and low binder concrete

Emanuel Freitas

Hugo Costa

Ana S. Louro

Manuel Pípa

Eduardo Júlio

Resumo

Para assegurar a sustentabilidade da construção em betão, a abordagem mais interessante consiste em reduzir a quantidade de cimento Portland nas misturas de betão corrente, garantindo ao mesmo tempo a resistência à compressão necessária, dando origem ao aqui denominado "betão com baixa dosagem de ligante" (LBC – *low binder concrete*).

Estando a aderência varão/betão na base do desempenho das estruturas de betão armado, justifica-se estudá-la para estes novos betões. Com esse objetivo, realizaram-se 60 ensaios de arrancamento, considerando um betão C25/30 e varões em aço A500NR SD (para assegurar a durabilidade) com 12 e 16 mm de diâmetro.

Concluiu-se que as misturas estudadas apresentam resistências superiores às previstas, pela Lei de Feret e o Eurocódigo 2, e que a aderência entre os varões de aço inoxidável e estes betões é superior ao esperado. Confirmou-se que o valor da área relativa das nervuras transversais é um parâmetro determinante na aderência varão-betão.

Abstract

To contribute to the sustainability of the concrete construction, the most interesting approach consists of reducing the Portland cement content in current concrete mixtures, ensuring at the same time the design compressive strength, giving rise to the herein called 'low binder concrete' (LBC).

Being the rebar-to-concrete bond the main pillar of the reinforced concrete concept, to study it for these new concretes is surely worthy. With this aim, 60 pull-out tests were conducted, considering a C25/30 concrete and S500NR SD steel rebars (to ensure durability) with 12 and 16 mm of diameter.

It was concluded that the developed LBC mixtures present higher strengths than those predicted, by the Feret expression and the Eurocode 2 (2010), and that bond between stainless steel rebars and these concretes is higher than expected. Corroborating previous studies, it was also concluded that relative ribs area value is a key parameter in rebar-to-concrete bond.

Palavras-chave: Aderência varão-betão / Sustentabilidade / Betões com baixa dosagem de ligante / Varões de aço inoxidável / Durabilidade

Keywords: Rebar-to-concrete bond / Sustainability / Low binder concrete / Stainless steel rebars / Durability

Emanuel Freitas

Instituto Superior Técnico
Universidade de Lisboa
Portugal
emanuel.freitas@tecnico.ulisboa.pt

Hugo Costa

CERIS, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra
Portugal
hcosta@isec.pt

Ana S. Louro

Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
analouro@lnec.pt

Manuel Pipa

Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
mpipa@lnec.pt

Eduardo Júlio

CERIS, Instituto Superior Técnico
Universidade de Lisboa
Portugal
eduardo.julio@tecnico.ulisboa.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

FREITAS, E. [et al.] – Aderência entre varões de aço inoxidável e betão com baixa dosagem de ligante. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 5. ISSN 2183-8488. (novembro 2017) 53-62.

1 Introdução

1.1 Enquadramento

A motivação para a realização do presente estudo surgiu da preocupação crescente em assegurar a sustentabilidade da construção em betão, o que pode ser conseguido reduzindo a quantidade de materiais com maior pegada ecológica, que no caso do betão é o cimento Portland, mas tendo igualmente como prioridade assegurar um 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 para garantir os requisitos mínimos de durabilidade, e tendo as misturas utilizadas neste estudo quantidades de ligante significativamente inferiores a essa, a utilização de varões de aço inoxidável surge como solução adotada para garantir a durabilidade dos elementos estruturais em betão com baixa dosagem de ligante (LBC). Denomina-se um betão como de baixa dosagem de ligante (LBC) quando a dosagem de cimento é inferior à recomendada no Anexo F da NP EN 206 1 [1], onde o valor mínimo de cimento é de 260 kg/m³ de betão.

1.2 Objetivos e metodologia

O principal objetivo do estudo aqui descrito é a caracterização da aderência entre varões de aço inoxidável e LBC. A metodologia definida para o atingir consistiu na realização de 60 ensaios de arrancamento. Foi considerada a expressão proposta pelo *fib* Model Code 2010 [2] para estimar o valor da tensão de aderência máxima, tendo em conta a resistência do betão à compressão.

Para além das misturas LBC e dos varões de aço inoxidável, foram igualmente considerados materiais correntes para servirem de referência, estudos de outros autores e expressões regulamentares, para confronto e discussão de resultados para, finalmente, ser possível extrair conclusões.

2 Estado da arte: betão com baixa dosagem de ligante

Diversos estudos têm sido desenvolvidos para criar betões com menor impacte ambiental, seguindo fundamentalmente duas metodologias: uma em que se procede à substituição de parte de agregados tradicionais por outros, como por exemplo agregados reciclados de betão ou de resíduos de outras indústrias, e outra em que se procura diminuir significativamente a quantidade total de cimento, mas mantendo as suas características mecânicas. O cimento Portland é o constituinte da mistura de betão com maior pegada ecológica [3], 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, não contabilizando as emissões da queima de combustíveis para se efetuar o processo.

Costa e Appleton [4] afirmam que é necessária uma menor quantidade de pasta de cimento quando se aumenta a compacidade das composições granulométricas, porque o volume de vazios entre partículas é menor.

2.1 Composição da mistura

A compacidade está fortemente ligada à composição da mistura, dependendo em grande parte do tamanho e quantidade dos agregados utilizados. Fennis *et al.* [5] afirmam que as partículas devem ser selecionadas para preencher os vazios entre as partículas maiores, e assim sucessivamente, de forma a aumentar a compacidade. De acordo com Proske *et al.* [6], também os fileres que são selecionados para substituir parte do cimento devem contribuir para o aumento da compacidade, proporcionando um volume de pasta ideal.

As curvas de otimização não consideram a forma das partículas, apesar de esta influenciar o valor da compacidade da mistura. Fennis [3] estudou a influência de quatro curvas de otimização e não observou diferenças significativas nas propriedades do betão em estado endurecido.

Segundo Fennis e Walraven [7], se a composição da mistura for otimizada por forma a aumentar a sua compacidade, será necessária uma menor quantidade de água para preencher os vazios.

De acordo com Fennis *et al.* [8] e Proske *et al.* [6], nas misturas LBC é muito importante controlar a quantidade de água, porque um pequeno desvio no seu valor tem um efeito na relação água/cimento muito mais significativo do que numa mistura de betão normal.

2.2 Propriedades do betão

Segundo Popovics (2011), citado por Fennis *et al.* [9], as propriedades do betão não são apenas influenciadas pela relação água/cimento, mas também por outros fatores tais como: misturas de ligante, uso de agregados (quantidade, diâmetros máximos, condições de superfície) ou idade.

Se o volume de água se mantiver constante e a compacidade da mistura aumentar, irá aumentar igualmente 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 consistência que a de referência e com uma menor quantidade de cimento, de acordo com Fennis *et al.* [8].

Segundo Coutinho [10], 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 finos deve ser compensada com uma dosagem de cimento compatível e com o uso de superplastificantes.

Proske *et al.* [6] concluíram que a perda de resistência à compressão, que resulta da redução de cimento, pode ser compensada pela diminuição da quantidade de água ou pela utilização de um cimento de maior resistência.

3 Estado da arte: aderência

Tal como descrito no *fib* Model Code 2010 [2], 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. Para o estado limite de utilização, condiciona a abertura e o espaçamento das fissuras

transversais, enquanto para o estado limite último é responsável pela amarração adequada da armadura e pela capacidade de rotação nas regiões com rótula plástica.

Fernandes [11] refere que 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 aderência mecânica associada à existência de nervuras, não tendo sido possível até à data quantificar experimentalmente cada parcela isoladamente.

3.1 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.

De acordo com Louro [12], a velocidade de aplicação de uma ação influencia o valor da tensão de aderência obtida, a qual aumenta com o aumento da velocidade.

A influência do diâmetro é tido em conta no cálculo da tensão de rotura da aderência, f_{bd} , segundo as expressões do EC2 [13] e do *fib* MC2010 [2]. No primeiro regulamento apenas se considera uma diminuição para varões com diâmetro superior a 32 mm, enquanto o segundo considera uma diminuição da tensão de rotura para varões com diâmetro superior a 25 mm. Eligehausen *et al.* (1983), citados por Louro [12], consideram a existência de um efeito moderado devido ao diâmetro dos varões, existindo uma diminuição em 10% na tensão de aderência com o aumento do diâmetro, quando se comparam os casos com diâmetros de 19 e 25 mm e 25 e 32 mm.

As características do perfil nervurado têm uma enorme influência na tensão de aderência, pois o bloqueio mecânico entre os dois materiais, betão e superfície do varão, é conseguido através das nervuras. 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 [14], onde a tensão de aderência máxima em varões nervurados é doze vezes superior à dos varões lisos, para varões de 12 mm de diâmetro.

André e Pipa [15] referem que, segundo o CEB-FIP Model Code 90 [16], são dez os parâmetros que influenciam o valor da tensão de aderência, estando incluídos a rugosidade e a configuração geométrica do varão. Concluíram que a alteração local da configuração geométrica das nervuras com a presença da sigla 'ARCER' no comprimento aderente tem uma influência negativa nos valores de tensão de aderência máxima e média.

Louro [12] cita as conclusões obtidas por Darwin e Graham (1993) a partir de ensaios realizados com diversos provetes com combinações de altura e espaçamento de nervuras transversais diferentes. Estes apontam para uma relação direta entre a tensão de aderência e a área relativa de nervuras transversais, f_{Rt} , mas que é independente da combinação de altura e espaçamento das nervuras. Cita também o estudo de Mayer (2001) onde se 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.

O recobrimento também influencia o tipo de rotura, sendo que, de acordo com Gavilán *et al.* [17] e Muttoni e Ruiz [18], quando o recobrimento é insuficiente, a rotura por fendilhação é a mais expectável.

Eligehausen *et al.* (1983), citado por Louro [12], 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. Também de acordo com o *fib* MC2010 [2], a tensão de aderência máxima é influenciada pela resistência à compressão da mistura, segundo a Equação (1):

$$\tau_{m\acute{a}x} = 2,5 \times \sqrt{f_{cm}} \quad (1)$$

4 Materiais e métodos

4.1 Materiais para produção das misturas

Os materiais utilizados em todas as misturas foram os seguintes:

- Agregados: Areia 0/3, areia 0/4_I, areão e brita 1 6/14;
- Cimento: CEM I 52,5 R de origem Secil Maceira;
- Adições: Filer calcário de origem Omya e cinzas volantes de origem Secil;
- Superplastificante: BASF Glenium sky 256.

4.2 Formulação das misturas

Para o desenvolvimento de todas as misturas adotou-se o procedimento descrito por Lourenço *et al.* [19] e a definição da quantidade de agregados a utilizar nas misturas foi obtida através da curva de otimização.

Para a composição da mistura granulométrica estudou-se a influência que as curvas Faury (1958) e Funk e Dinger (1980), apresentadas por Lourenço *et al.* [19] e Fennis e Walraven [7], respectivamente, têm na quantidade dos agregados necessários para se obter uma curva real próxima da teórica.

Para a curva de Faury (1958) [19] foi necessário definir o parâmetro $d_{m\acute{a}x}^q$ que tem o valor de 14 mm, e os 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, de acordo com Coutinho [10] e Lourenço *et al.* [19].

A curva de Funk e Dinger (1980) [7] segue a Equação (2):

$$P(d) = \frac{d^q - d_{min}^q}{d_{m\acute{a}x}^q - d_{min}^q} \times 100 \quad (2)$$

onde:

q é o parâmetro de ajuste da curva;

d é a dimensão do peneiro (mm);

d_{min} é a dimensão mínima dos agregados (mm);

$d_{m\acute{a}x}$ é a dimensão máxima dos agregados (mm).

O parâmetro q toma o valor de 0,37, $d_{min} = 0,125$ mm e $d_{m\acute{a}x} = 14$ mm. Sobrepondo as curvas de Funk e Dinger (1980) [7] e a de Faury (1958) [19] corrigida, no mesmo gráfico, constata-se que a segunda se encontra à direita da primeira para os agregados de maior dimensão, fazendo com que a mistura utilize uma maior percentagem de agregados grossos. 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 das misturas LBC. Por este motivo adotou-se a curva Funk e Dinger (1980) [7] para as misturas LBC. A mistura de referência, C250, foi obtida através da curva de Faury (1958) [19]. No Quadro I, encontra-se a composição das três misturas para posterior estudo da aderência.

Quadro I Composição das misturas estudadas

Materiais		C250 (Faury)	LBC125	LBC75
CEM I - 52,5 R	(kg/m ³)	250,00	125,00	75,00
Filer calcário	(kg/m ³)	100,00	125,00	75,00
Cinzas volantes	(kg/m ³)	-	-	100,00
Basf Glenium Sky 526 (% kg/kg CEM I)	(%)	0,40	2,00	3,00
Areia 0/3	(kg/m ³)	492,00	44,00	43,50
Areia 0/4_I	(kg/m ³)	427,40	1080,10	1067,60
Areão 4/8	(kg/m ³)	116,40	287,20	283,90
Brita 1 6/14	(kg/m ³)	795,40	630,60	623,30
Água	(kg/m ³)	169,10	117,64	117,90
Rácio água/cimento	(-)	0,68	0,94	1,57
Rácio água/ligante	(-)	0,48	0,47	0,47
Compacidade	(-)	0,81	0,86	0,86
Ar	(%)	2,00	2,00	2,00

4.3 Varões

Para este estudo utilizaram-se varões com diâmetros de 12 e 16 mm, de aço corrente e aço inoxidável. Os varões de aço inoxidável usados para caracterizar a aderência entre estes e o LBC 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 [20]. Como os varões Ø16 aqui utilizados pertencem ao mesmo lote, apenas se faz referência aos resultados obtidos. Refira-se que os varões de 12 mm de diâmetro apresentam quatro séries de nervuras. Para os varões de referência adotou-se aço A500 NR SD, por ser atualmente o mais habitualmente empregue na construção.

4.4 Ensaios de caracterização da aderência varão-betão

O ensaio escolhido para caracterizar a aderência entre os dois materiais foi o ensaio de arrancamento, conhecido na literatura como *pull-out test*. Tem como princípio tracionar um varão embebido em betão com um determinado comprimento aderente até ser atingida a rotura.

Para avaliar a tensão de aderência entre os varões de aço nervurados e três misturas de betão, seguiu-se o método descrito no Anexo D da EN 10080 [21] que por sua vez se baseia nas recomendações RILEM [22].

Neste 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 a ensaiar 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 1 apresenta-se um esquema deste ensaio de arrancamento.

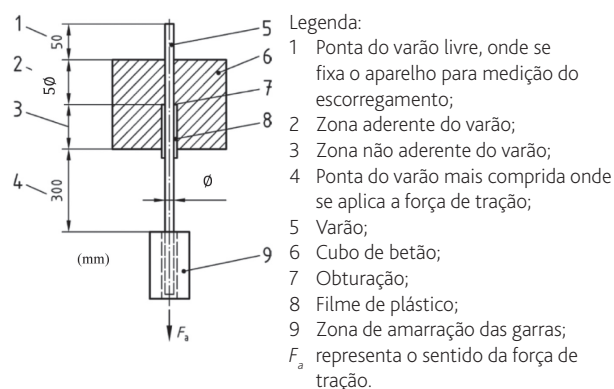


Figura 1 Esquema do ensaio de arrancamento (EN 10080 [21] – Anexo D)

A força máxima de rotura é transformada em tensão de aderência segundo a Equação (3):

$$\tau_{dm} = \frac{F_a}{5 \times \pi \times \varnothing^2} \frac{f_{cm}}{f_j} \quad (3)$$

onde:

F_a representa a força máxima em kN;

\varnothing 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 foi 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. Em relação ao valor de f_{cm} , utilizou-se a resistência média à compressão aos 28 dias de cada mistura.

4.4.1 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 HMB W10, com um curso de 20 mm e que se encontrava devidamente calibrado.

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.

4.4.2 Velocidade de ensaio

Para que os ensaios fossem realizados com a mesma velocidade, não introduzindo mais uma variável no estudo, e por forma a torná-los independentes de eventuais perdas de rigidez, foram executados com controlo de deslocamento, a uma velocidade de 0,03 mm/s, a qual garante valores conservativos de tensão. Todos os ensaios foram realizados até ser atingido um deslizamento máximo de cerca de 20 mm, obtendo-se assim a relação tensão de aderência-deslizamento em regime monotónico.

5 Resultados e discussão

5.1 Propriedades das misturas de betão

Antes de se iniciar a betonagem dos provetes, procedeu-se à medição da temperatura ambiente, da temperatura do betão e do abaixamento do cone de Abrams segundo a NP EN 12350-2 [23]. O grau de compactabilidade das misturas LBC foi obtido por Alves [24]. No Quadro II encontra-se um resumo das propriedades das misturas de betão estudadas.

O abaixamento apresentado pela mistura C250 indica que este betão tem uma consistência S2/S3. Na NP EN 12350-2 [23] é referido que, caso o provete se desmorone por duas vezes consecutivas, este tipo de ensaio não é adequado para analisar a trabalhabilidade da mistura, o que se verifica para as misturas LBC. Estas não apresentam um abaixamento verdadeiro e, assim, a sua consistência foi determinada pelo grau de compactabilidade. Concluiu-se que as duas misturas LBC são da classe C2.

Na Figura 2 pode-se observar o desenvolvimento da resistência à compressão para todas as misturas. Salienta-se o aumento da resistência entre os 28 e 56 dias da mistura LBC75, resultado da elevada quantidade de material pozolânico presente na mistura.

Para a mistura que contém cinzas volantes é necessário considerar uma quantidade de cimento equivalente, utilizando o conceito do fator-k como proposto na NP EN 206-1 [1]. Desta forma, a quantidade máxima de cinzas volantes, em massa, que pode ser considerada para o cálculo da razão *água/(cimento + k × cinzas volantes)* é no máximo 33% da massa total do cimento.

Como na mistura LBC75 se utilizou uma quantidade superior de cinzas volantes, a sua totalidade não poderá ser considerada. Relativamente ao 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 no Quadro III.

Quadro II Resultados obtidos para as características do betão em estado fresco e endurecido

	C250	LBC125	LBC75
Temperatura ambiente (°C)	22,8	23,9	23,2
Temperatura betão (°C)	25,4	24,6	24,9
Abaixamento (mm)	60 e 110	140* e 160*	-
Grau de compactabilidade [24]	-	1,23	1,21
Propriedades mecânicas			
Resistência de compressão – 3 dias (MPa)	27,7	22,7	-
Resistência de compressão – 4 dias (MPa)	-	-	10,6
Resistência de compressão – 7 dias (MPa)	32,3	26,0	14,5
Resistência de compressão – 14 dias (MPa)	35,7	29,4	17,4
Resistência de compressão – 28 dias (MPa)	38,4	31,9	20,9
Resistência de compressão – 56 dias (MPa)	40,0	32,9	24,4
Resistência de compressão – 84 dias (MPa)	40,8	33,8	24,6
Tensão de tração por compressão diametral – 28 dias (MPa)	-	2,80	2,25

* Não representam um abaixamento verdadeiro

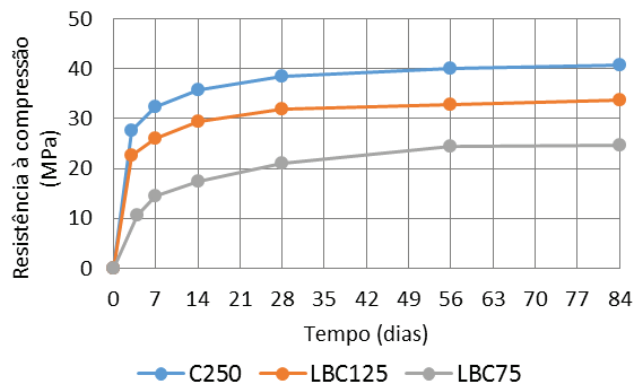


Figura 2 Desenvolvimento da resistência à compressão em função do tempo

Quadro III Cálculo do cimento equivalente pelo fator-k

Misturas	CEM I 52,5 R (kg/m³)	Cinzas (kg/m³)	Água (kg/m³)	Máx. Cinzas (kg/m³)	k (-)	Cinzas eq. (kg/m³)	C _{eq} (kg/m³)	A/C (-)	A/C _{eq} (-)
LBC125	125	0	117,7	0,00	0,4	0,00	125,0	0,94	0,94
LBC75	75	100	117,9	24,75	0,4	9,90	84,9	1,57	1,39

De seguida apresenta-se uma comparação entre as resistências à compressão aos 28 dias, medidas experimentalmente, com a correspondente previsão de acordo com a expressão Feret (1892), apresentado por Fennis *et al.* [9] e Lourenço *et al.* [19], e conclui-se que esta expressão não é adequada para misturas em que a compacidade é elevada e quando existe substituição de cimento por materiais pozolânicos. A expressão de Feret [9,19] segue a Equação (4):

$$f_c = k_{28} \left(\frac{V_c}{V_c + V_w + V_a} \right)^2 \quad (4)$$

onde:

k_{28} é o coeficiente de Feret para a classe de resistência do cimento;
 V_c é o volume das partículas de cimento (m³);
 V_w é o volume de água (m³);
 V_a é o volume de vazios (m³).

Para a mistura LBC75 utilizou-se o volume de cimento equivalente e, através do Quadro IV, verifica-se um aumento da diferença entre valores, que acompanha a diminuição da quantidade de cimento presente na mistura de betão.

Quadro IV Comparação dos resultados experimentais com a previsão pela expressão de Feret Eq. (4)

	LBC125	LBC75
k_{28}	380	380
V_c	0,0401	0,02834
V_w	0,1176	0,1179
V_a	0,02	0,02
f_c (MPa)	19,34	11,05
f_{cm} (MPa)	31,06	20,33
Δ (%)	60,59	84,04

Em relação à tensão de tração por compressão diametral, verifica-se que diminui à medida que aumenta a parte de cimento substituído por adições, mas a relação entre a resistência à tração e à compressão mantém-se na ordem dos 10%, tal como nas misturas de betão corrente.

5.2 Propriedades dos varões

No Quadro V, apresentam-se os valores médios obtidos (três amostras) nos ensaios de caracterização do perfil nervurado dos diversos tipos de varões utilizados. 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 de 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 regulamentares.

Quadro V Características geométricas das nervuras dos varões em estudo

Diâmetro (mm)	Classe	$a_{1/2}$ (mm)	$C_{livre,méd}$ (mm)	$f_{R,médio}$	Mínimos regulamentares	
					EC2 [13]	LNEC E460 [25]
12	A500 NR SD	1,07	7,8	0,082	0,056	0,040
	AISI304	0,67	6,7	0,058		
16	A500 NR SD	1,18	10,8	0,066	0,056	0,056
	AISI316	1,06 [20]	10,2 [20]	0,066 [20]		

5.3 Caracterização da aderência varão-betão

Os resultados da tensão de aderência que em seguida se apresentam foram determinados com base na tensão de aderência local, através da Equação (3). Para a caracterização da aderência em regime monotónico, determinou-se a tensão máxima de aderência ($\tau_{d,máx}$) e o respetivo deslizamento (s_1), assim como a tensão média de aderência ($\tau_{d,média}$), de acordo com a Equação (5), presente no Anexo C do EC2 [13]. O resultado da tensão média representa a inclinação do ramo ascendente até se atingir a tensão máxima.

$$\tau_{d,média} = \frac{\tau_{0,01} + \tau_{0,1} + \tau_{1,0}}{3} \quad (5)$$

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 5 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 cujo desvio padrão era superior a 1 MPa aplicaram-se limites extremos por forma a eliminar os resultados que se encontravam fora destes limites. Burke [26] 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 [26] 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%.

No Quadro VI apresentam-se os valores médios da tensão de aderência média e máxima, após análise estatística.

Na análise de resultados que se segue, a influência das diversas variáveis presentes no estudo, como a área relativa das nervuras transversais e o tipo de betão, é individualizada e a representação das variáveis é a seguinte: o tipo de mistura é representado com um triângulo, quadrado cheio ou quadrado vazio, enquanto a distinção do diâmetro e do 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.

Quadro VI Valores médios da tensão média e máxima de aderência após análise estatística

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

5.3.1 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 3. 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 compacidade inferior às restantes, podendo esta diferença explicar o decréscimo da tensão de aderência máxima. Ao aumentar a compacidade das misturas, as partículas encontram-se mais próximas umas das outras, formando uma pasta mais rígida e podendo originar um valor mais elevado da tensão de aderência.

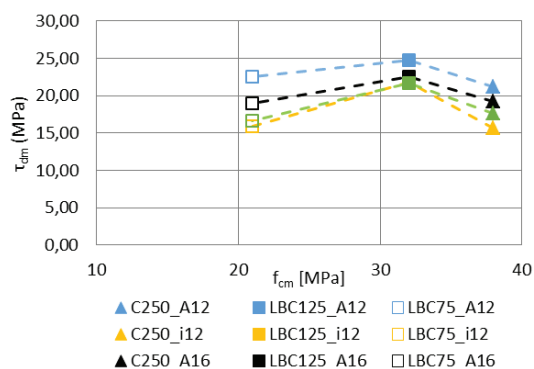


Figura 3 Influência da resistência à compressão do betão (f_{cm}) na tensão máxima de aderência ($\tau_{d,max}$)

5.3.2 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 4. No caso dos varões com 12 mm de diâmetro, o aumento da tensão de aderência 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 não apresenta o mesmo valor da tensão de aderência. Com efeito 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-se uma diferença máxima de 2,24 MPa para a mistura LBC75. Esta diferença pode estar associada à diferente geometria das nervuras transversais entre os dois tipos de aço.

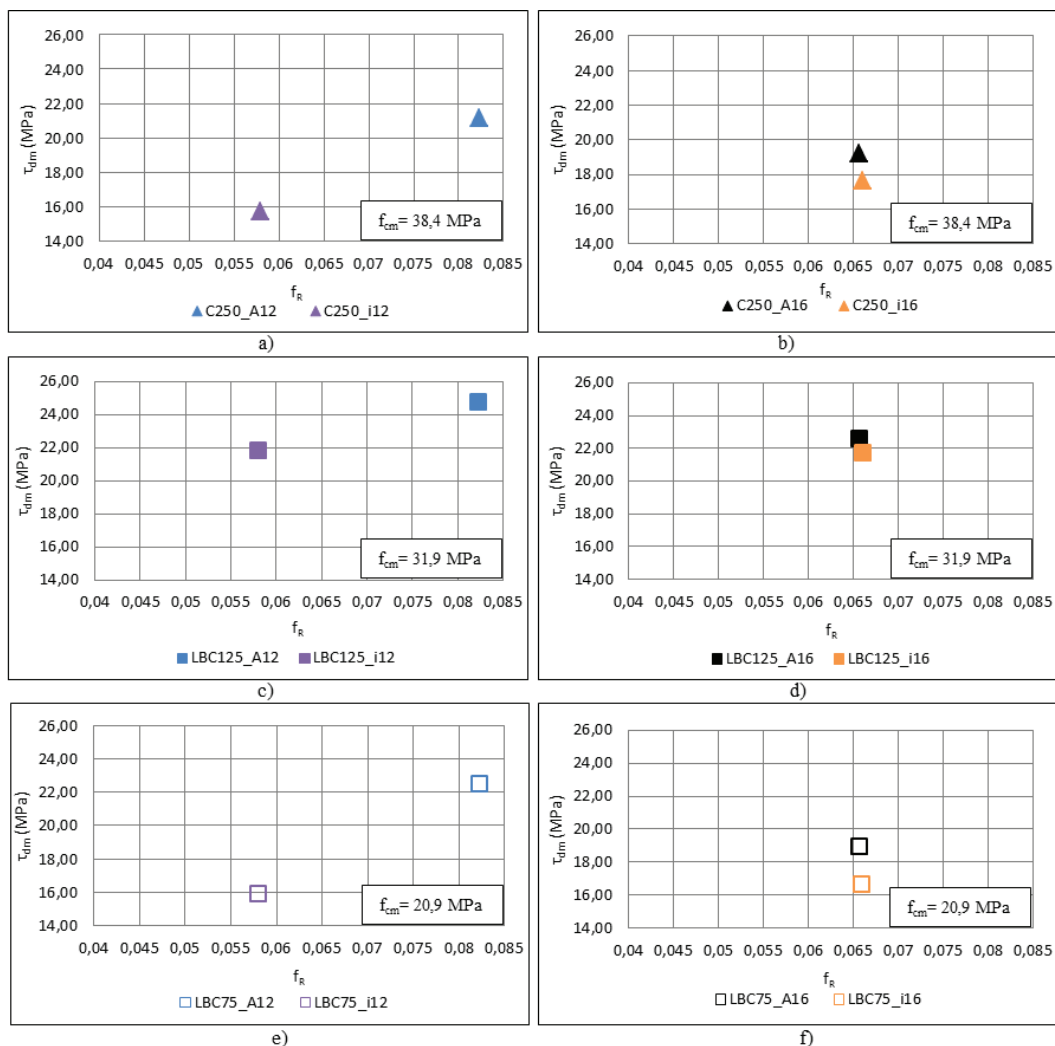


Figura 4 Influência da área relativa das nervuras transversais (f_r) na tensão máxima de aderência ($\tau_{d,max}$): a) Mistura C250 e Ø12; b) Mistura C250 e Ø16; c) Mistura LBC125 e Ø12; d) Mistura LBC125 e Ø16; e) Mistura LBC75 e Ø12; f) Mistura LBC75 e Ø16

5.3.3 Comparação dos resultados com o fib MC2010 [2]

Nesta secção, comparam-se os resultados obtidos experimentalmente com a tensão de aderência máxima prevista pelo fib MC2010 [2], que segue a Equação (1). Analisando o Quadro VII, verifica-se que a tensão máxima de aderência se encontra em todos os casos abaixo dos resultados experimentais, sendo esta diferença mais notória nas misturas LBC125 e LBC75, com diferenças que vão dos 76 aos 101 %, respetivamente. O fib MC2010 [2], no que respeita ao tipo de betão, apenas tem em consideração a resistência à compressão aos 28 dias, reforçando a hipótese da diferença entre resultados previstos e obtidos ser causada pela elevada compacidade das misturas LBC125 e LBC75.

Quadro VII Comparação da tensão de aderência máxima proposta pelo fib MC2010 [2] e os valores médios de tensão máxima obtidos experimentalmente

Misturas	f_{cm} (MPa)	τ_{fib}^{max} MC2010 [2] (MPa)	$\tau_{d,max,média}$ (MPa)				Δ_{min} (%)	Δ_{max} (%)
			A12	i12	A16	i16		
C250	38,4	15,5	21,13	15,68	19,19	17,63	1	36
LBC125	31,9	14,1	24,77	21,84	22,59	21,73	54	76
LBC75	20,9	11,4	22,89	16,88	18,93	16,69	46	101

6 Conclusões

Os betões 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.

Em relação à influência das diferentes variáveis estudadas neste trabalho na tensão de aderência entre os varões e o betão, foi possível retirar as seguintes conclusões:

- 1) O estudo foi inconclusivo relativamente à influência do diâmetro, por não ter sido possível isolar este parâmetro. Com efeito, ao variar o diâmetro do varão também se alteravam as características das nervuras;
- 2) O efeito das nervuras 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. Atribuiu-se este efeito à maior dificuldade que o varão tem em escorregar devido ao bloqueio provocado pela altura das nervuras, sendo este o parâmetro da geometria que tem maior influência no valor da área relativa das nervuras transversais;
- 3) A influência do betão na tensão de aderência está patente nos

resultados obtidos para as duas misturas ecológicas (LBC75 e LBC125), mas concluiu-se que a resistência do betão à compressão não é o único fator que influencia o fenómeno de aderência entre os dois materiais. De facto, a compacidade parece influenciar igualmente 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;

- 4) Comparando os resultados obtidos com os propostos pelo fib MC2010 [2], pode afirmar-se que existem diferenças significativas entre ambos, o que reforça a necessidade de reformulação deste, para ter em conta os outros parâmetros referidos, como a área relativa de nervuras transversais e a compacidade da mistura.

Pretende-se aprofundar o estudo sobre a influência da compacidade no valor da tensão de aderência máxima e assim propor uma expressão modificada com base na do fib MC2010 [2] e que seja influenciada por este parâmetro. Está assim prevista a realização de ensaios de arrancamento em misturas com compacidade entre 0,81 e 0,86.

Agradecimentos

Pela sua contribuição, os autores agradecem ao ISEC, por fornecer todos os materiais necessários à realização das misturas de betão das diferentes fases da campanha experimental, e ao LNEC por disponibilizar os meios para realizar o presente estudo.

Referências

- [1] NP EN 206-1. – Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade, 2007.
- [2] Model Code 2010 – Final draft - Volume 1, Int. Fed. Struct. Concr., 2012.
- [3] Fennis, S. A. A. M. – *Design of Ecological Concrete by Particle Packing Optimization*, 2011.
- [4] Costa, A.; Appleton, J. – *Estruturas de Betão I: Parte 2 – Materiais*, 2002.
- [5] Fennis, S. A. A. M.; Walraven J. C.; Den Uijl, J. A. – "The use of particle packing models to design ecological concrete", *Heron*, vol. 54, no. 2, pp. 183-202, 2009.
- [6] 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", *Constr. Build. Mater*, 2014.
- [7] Fennis, S. A. A. M.; Walraven, J. C. – "Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design", *Heron*, vol. 57, no. 2, pp. 73-101, 2012.
- [8] Fennis, S. A. A. M.; Grunewald, S.; Walraven, J. C.; Den Uijl, J.A. – *Influence of particle packing density on the rheology of low cement content concrete*, pp. 455-457, 2012.

- [9] Fennis S. A. A. M.; Walraven, J. C.; Den Uijl, J.A. – "Compaction-interaction packing model: regarding the effect of fillers in concrete mixture design", *Mater. Struct.*, pp. 463–478, 2012.
- [10] Coutinho, A. de S. – *Fabrico e Propriedades do Betão*. LNEC, 1988.
- [11] Fernandes, R. – *A influência das ações repetidas na aderência aço-concreto*, 2000.
- [12] Louro, A. – *Caracterização da aderência de varões nervurados sujeitos a ações repetidas e alternadas*, 2014.
- [13] EN 1992-1-1 – Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2004.
- [14] Louro, S. A. C. – *Estudo da aderência aço – betão em elementos estruturais de BA*, 2011.
- [15] André, J.; Pipa, M. – *Influência na aderência aço-betão da alteração local da configuração geométrica das nervuras de armaduras de aço*, pp. 1-12, 2010.
- [16] CEB-FIP - Model Code 1990 – Design Code, 1993.
- [17] Gavilán, S.E.; Silva, B. do V.; Filho, L. C. P. da S.; Barbosa, M. P. – *Ensayo de arrancamiento, relación recubrimiento-diámetro de barras para evitar el efecto splitting*, 2014.
- [18] Muttoni, A.; Ruiz, M. F. – *Influence of geometric, strain and size effects on bond in structural concrete*, pp. 15-21, 2012.
- [19] Lourenço, J.; Júlio, E.; Maranha, P. – *Betões de agregados leves de argila expandida - Guia para a sua utilização*, pp. 11-81, 2004.
- [20] Louro, A. – *Comportamento de vigas de betão armado com aço inoxidável*, pp. 9-30, 2008.
- [21] EN 10080 – Steel for the reinforcement of concrete – Weldable reinforcing steel, 2005.
- [22] RILEM-recommendation – RC 6 Bond test for reinforcement steel – 2. Pull-out test, 1983.
- [23] NP EN 12350-2 – Ensaio do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento. IPQ: Instituto Português da Qualidade, 2002.
- [24] Alves, H. – *Formulação e caracterização mecânica de betões com baixa dosagem de cimento*, 2016.
- [25] LNEC E 460 – Varões de aço A500NR de Ductilidade Especial para Armaduras de Betão Armado. Características, Ensaio e Marcação, 2002.
- [26] Burke, S. – *Missing Values, Outliers, Robust Statistics & Non-parametric Methods*, pp. 19-24, 2005.