

# Proposta de lei de aderência entre varões de aço e betões com baixa dosagem de ligante com agregados naturais/reciclados

Bond-slip law proposal of reinforcing bars to low binder natural/recycled aggregate concretes

Tiago Amândio Pereira

Ana Sofia Louro

Hugo Costa

Eduardo Júlio

## Resumo

O betão com baixa dosagem de ligante (*LBC - low binder concrete* na denominação anglo-saxónica) e o betão com baixa dosagem de cimento com agregados reciclados (*LCRAC - low cement recycled aggregate concrete*) são alternativas eco-eficientes ao betão de cimento Portland com agregados naturais por apresentarem um menor impacto ambiental. Para contribuir para o estudo da viabilidade de aplicação estrutural do LBC e do LCRAC, apresentam-se neste artigo os resultados obtidos numa campanha experimental de ensaios de arrancamento (*pull-out tests*), realçando o desempenho obtido ao nível da relação entre a tensão de aderência e o deslizamento do varão de aço. Os resultados experimentais foram comparados com as propostas de previsão existentes e apresenta-se uma primeira proposta de lei para descrever a relação tensão de aderência-deslizamento, considerando a compactidade, os agregados reciclados, o diâmetro do varão e a respetiva área relativa das nervuras transversais. A influência positiva da compactidade na aderência foi validada através da comparação dos resultados obtidos com os resultados decorrentes da proposta existente no Model Code 2010.

## Abstract

Low binder concrete (LBC) and low cement recycled aggregate concrete (LCRAC) are eco-efficient alternatives for Portland-cement concrete with natural aggregates because of their reduced environmental impact. In this context, a study on the structural viability of LBC and LCRAC is herein presented. This paper summarises the experimental campaign of pull-out tests and highlights the prediction of test results, in terms of bond-slip relationship. The comparison between experimental results and proposals to predict the bond-slip relationship was carried out. An initial proposal to predict the bond-slip relationship is presented, including the following variables: packing density, recycled aggregates, diameter of reinforcing bars and its relative ribs area. The positive influence of packing density on bond behaviour was confirmed by the comparison between experimental results and Model Code 2010's values.

**Palavras-chave:** Sustentabilidade / LBC / LCRAC / Elevada compactidade / Aderência varão-betão / Relação tensão de aderência-deslizamento

**Keywords:** Sustainability / LBC / LCRAC / High packing density / Bond behaviour rebar-concrete / Bond-slip relationship

## Tiago Amândio Pereira

Engenheiro de Estruturas  
CERIS, DECivil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa  
Lisboa, Portugal  
tiago.a.s.pereira@tecnico.ulisboa.pt

## Ana Sofia Louro

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

## Hugo Costa

Professor Adjunto  
CERIS, ISEC-Instituto Politécnico de Coimbra  
Coimbra, Portugal  
hcosta@isec.pt

## Eduardo Júlio

Professor Catedrático  
CERIS, DECivil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa  
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.*

PEREIRA, T [et al.] – Proposta de Lei de Aderência entre varões de aço e betões com baixa dosagem de ligante com agregados naturais/reciclad. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 14. ISSN 2183-8488. (novembro 2020) 43-56.

## 1 Introdução

As Nações Unidas prevêem que, até 2050, 68% da população mundial viverá em áreas urbanas, sendo necessário assegurar habitação bem como infraestruturas básicas, redes de transportes e energia. No entanto, os problemas de amanhã começam hoje, com cerca de um terço da população mundial a residir em cidades com pelo menos meio milhão de habitantes, em que em cada 3 a 5 destas cidades estão rotuladas como de elevado risco de desastre natural. Portanto, é urgente intervir no sentido de aumentar e melhorar a oferta nas áreas urbanas, reabilitando o edificado existente e complementando-o com novas construções. Contudo, com a imposição de metas sustentáveis cada vez mais exigentes, o sector da engenharia e construção civil tem que se adaptar rapidamente [1].

Atualmente, o betão é o material estrutural mais usado a nível mundial na construção, devido ao seu preço competitivo, conhecimento global da tecnologia e excelente desempenho estrutural. A produção de cimento Portland, o principal constituinte do betão, ronda os 4,65 mil milhões de toneladas anuais e antevê-se um crescimento de 12 a 23% até 2050. No entanto, por cada tonelada de cimento Portland produzida é emitida uma quantidade aproximada de 800 kg de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, representando cerca de 5% das emissões globais de gases com efeito de estufa [1, 2].

Com a crescente consciencialização dos problemas ambientais, têm surgido inúmeras estratégias para mitigar as emissões poluentes da produção do cimento Portland. Estas estratégias incluem a utilização de combustíveis alternativos com menor pegada ecológica, o aperfeiçoamento do processo de fabrico do cimento (nomeadamente, a redução da temperatura dos fornos, a captura do CO<sub>2</sub> à saída das chaminés e adição de sub-produtos industriais) e a redução da dosagem de cimento Portland na formulação de betões. Os estudos recentes sobre os betões com baixa dosagem de ligante (LBCs), que reduzem em cerca de um terço a quantidade de cimento utilizada, revelam que os LBCs são uma excelente alternativa aos betões correntes [3, 4, 5].

O desenvolvimento de betões com reduzido teor de cimento é conseguido no presente trabalho através da redução do volume de cimento e da água da pasta, possibilitando maior aproximação das partículas, permitindo deste modo, juntamente com um arranjo otimizado da distribuição granulométrica, o aumento da compacidade e do desempenho do betão; recentemente, alguns trabalhos de investigação provaram que a elevada compacidade dos betões, relacionada com a reduzida dosagem de cimento e a respetiva relação água/ligante têm um papel determinante no desempenho mecânico, diferido e de durabilidade deste tipo de betões. A compacidade do betão é dada pelo quociente entre o volume dos constituintes sólidos e o volume total da mistura [6, 7, 8]. Todavia, para além da problemática das emissões dos gases com efeito de estufa, o sector da construção debate-se com a crescente quantidade de resíduos de construção e demolição (RCD) gerados anualmente, que representam cerca de 25 a 30% do total de resíduos na União Europeia. Como tal, a União Europeia tem vindo a impor metas que pressionam os governos a tomar medidas que conduzam à reciclagem destes resíduos [2, 9]. Porém, um dos obstáculos a

ultrapassar na reutilização dos RCD é a falta de confiança na qualidade dos mesmos. A sua composição é muito variada, consoante a origem dos resíduos, conduzindo ao desconhecimento das propriedades dos mesmos. No entanto, os trabalhos apresentados pela comunidade científica ao longo dos últimos anos comprovam as potencialidades dos RCD, como agregados a incorporar no betão, e mitigam a sua utilização deficiente, apesar de estar sujeita a determinadas metodologias [10, 11, 12].

Perante todas as evidências estabelecidas nas novas estratégias para tornar o betão ambientalmente mais sustentável, o comportamento estrutural destes novos betões carece de ser devidamente estudado, sendo particularmente relevante neste contexto a aderência betão-varão e a influência que as novas formulações de betões têm neste comportamento.

A aderência define-se como o mecanismo responsável pela transferência de tensões entre o betão e os varões, a qual influencia o comportamento das estruturas, tanto para os estados limite de utilização como ao nível do estados limite últimos. Nos estados limite de utilização, este mecanismo contribui para o controlo da abertura de fendas e define o espaçamento entre as mesmas e, por conseguinte, condiciona a quantidade de armadura mínima a colocar num determinado elemento de betão armado. Nos estados limite últimos, para além de condicionar o comprimento de amarração dos varões de aço ao betão e a transmissão de esforços nas emendas por sobreposição, estabelecendo o cálculo das mesmas, a aderência influencia a capacidade de rotação das rótulas plásticas [13, 14].

Este artigo realça a previsão da relação da tensão de aderência-deslizamento entre varões de aço e os betões com formulações modificadas, que promovem a sustentabilidade ambiental e económica do sector da construção. A campanha experimental é sumariamente apresentada com o objetivo de enquadrar a matéria em foco do artigo. A descrição detalhada da campanha experimental, assim como a apresentação, a análise e a discussão dos resultados experimentais, referentes à caracterização dos betões, dos varões de aço e da aderência, pode ser encontrada em [15].

## 2 Estado da arte

O Model Code 2010 (MC2010) [16] define a relação entre a tensão de aderência,  $\tau_{b,i}$ , e o deslizamento,  $s$ , para carregamentos em regime monotónico através das Equações (1) a (4):

$$\tau_{b,i} = \tau_{b,\text{máx}} \cdot \left( \frac{s_i}{s_1} \right)^\alpha \quad \text{se } 0 \leq s_i \leq s_1 \quad (1)$$

$$\tau_{b,i} = \tau_{b,\text{máx}} \quad \text{se } s_1 \leq s_i \leq s_2 \quad (2)$$

$$\tau_{b,i} = \tau_{b,\text{máx}} - \left( \tau_{b,\text{máx}} - \tau_{b,\text{atrito}} \right) \cdot \frac{s_i - s_2}{s_3 - s_2} \quad \text{se } s_2 \leq s_i \leq s_3 \quad (3)$$

$$\tau_{b,i} = \tau_{b,\text{atrito}} \quad \text{se } s_i > s_3 \quad (4)$$

Perante condições de “boa aderência”, recobrimentos iguais ou superiores a 5 vezes o diâmetro do varão de aço e modos de

rotura por arrancamento, a Tabela 1, preconizada no MC2010 [16], apresenta os parâmetros das Equações (1) a (4). Para obter resultados conservativos, estes parâmetros foram ajustados para áreas relativas mínimas de nervuras transversais especificadas no Eurocódigo 2 [17] e para varões de 25 mm de diâmetro [16, 18].

O MC2010 considera apenas a dependência da resistência à compressão na tensão de aderência. No entanto, os estudos de André e Pipa [19], de Louro [13] e de Freitas [4] e a campanha experimental que deu origem a este artigo, evidenciaram a dependência não só da resistência à compressão como da área relativa das nervuras transversais dos varões de aço,  $f_R$ , da compacidade do betão,  $\sigma$ , e da dimensão dos agregados.

Sustentados numa robusta campanha experimental de ensaios de arrancamento, cujo modo de rotura foi por arrancamento, com provetes de betão com resistência à compressão de 25 MPa e varões de aço com diferentes diâmetros e áreas relativas de nervuras transversais, André e Pipa [19] verificaram uma tendência linear crescente da área relativa das nervuras transversais em relação à tensão máxima de aderência, dada por:

$$\tau_{b,\text{máx}} = 62,66 \cdot f_R + 11,572 \quad (5)$$

Em termos da previsão da relação entre a tensão de aderência e o deslizamento, para contemplar a área relativa das nervuras transversais, Louro [13] propôs que a tensão máxima de aderência variasse entre 2,35 e 2,65 vezes a raiz quadrada da resistência à compressão do betão em provetes cúbicos, dependendo da área relativa das nervuras transversais ser diminuta ou elevada, respetivamente, (Equação 8). Por outro lado, Freitas [4] propôs que à raiz quadrada da resistência à compressão do betão em provetes cúbicos se acrescentasse um fator multiplicativo,  $k_{f_R}$ , definido pelo quociente entre a área relativa das nervuras transversais e a área relativa mínima das nervuras transversais especificada no Eurocódigo 2 [17] (Equações 9 e 10).

Para contemplar a compacidade do betão, Freitas [4] sugeriu que, para além da contribuição da área relativa das nervuras transversais, se somasse uma parcela,  $k_\sigma$ , que consiste na diferença percentual entre a compacidade do betão e uma compacidade de referência de 0,81 (Equações 9 e 11). Note-se que esta parcela da compacidade tem valores adimensionais e soma-se à parcela da resistência à compressão do betão e da área relativa das nervuras transversais, que devolve tensão em MPa.

No que diz respeito ao deslizamento, Louro [13] sugeriu que os deslizamentos  $s_1$  e  $s_2$ , correspondentes ao patamar da lei tensão de aderência-deslizamento, tomassem os valores de 0,5 mm e 1,5 mm, respetivamente, para varões em que a área relativa das nervuras transversais é elevada.

Posto isto, a Tabela 1 apresenta as equações e os valores preconizados para a definição da lei tensão de aderência-deslizamento. Saliente-se que os varões utilizados na campanha experimental deste estudo enquadram-se no lote de varões de aço de Louro [13], com áreas relativas de nervuras transversais mais próximas dos valores mínimos preconizados pelo Eurocódigo 2.

**Tabela 1** Parâmetros que definem a relação tensão de aderência-deslizamento do MC2010 [16], da proposta de Louro [13] e de Freitas [4]

Parâmetro	MC2010	Proposta de Louro	Proposta de Freitas
$\tau_{b,m\acute{a}x}$ (MPa)	$2,5 \cdot \sqrt{f_{cm,28}}$ (6)	$2,35 \cdot \sqrt{f_{cm,cubo,28}}$	$2,5 \cdot \sqrt{f_{cm,cubo,28}} \cdot k_{f_R} + k_{\sigma}$ (9)
$s_1$ (mm)	1,0	1,0	1,0
$s_2$ (mm)	2,0	2,0	2,0
$s_3$ (mm)	c	c	c
$\alpha$	0,4	0,4	0,4
$\tau_{b,f}$ (MPa)	$0,40 \cdot \tau_{b,m\acute{a}x}$ (7)	$0,40 \cdot \tau_{b,m\acute{a}x}$ (7)	$0,40 \cdot \tau_{b,m\acute{a}x}$ (7)
$k_{f_R}$			$\frac{f_R}{f_{R,min}}$ (10)
$k_{\sigma}$			$100 \cdot (\sigma - 0,81)$ (11)

### 3 Campanha experimental

#### 3.1 Betões

Os betões da tipologia LBC e LCRAC foram designados como betões com baixos teores de cimento e de ligante, uma vez que esses teores são inferiores à quantidade mínima de cimento de 260 kg/m<sup>3</sup> apresentada na NP EN 206-1:2017 [20]. As matrizes dos betões LBC e LCRAC tem ambas um teor de ligante de 250 kg/m<sup>3</sup>, composto por cimento e cinzas volantes, mas o segundo tem adição de filler calcário para permitir melhor trabalhabilidade, tendo em conta a adição de agregados reciclados.

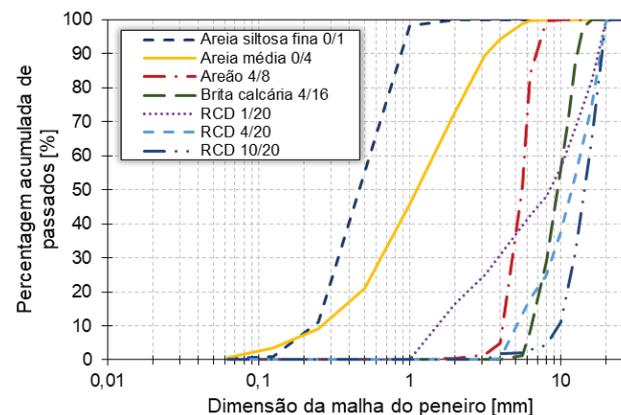
Os provetes de caracterização do betão assim como os provetes de caracterização da aderência seguem a mesma tipologia de acrónimo que a seguir se indica. Os provetes de LBC foram designados como LBC\_compacidade do betão\_Curva de distribuição granulométrica. Os provetes de LCRAC foram denominados como LCRAC\_taxa de incorporação de agregados reciclados.

O estudo de Freitas apontou a compacidade como fator determinante no aumento das tensões de aderência [4]. Neste sentido, para determinar a relação entre a compacidade e a aderência, foram produzidos LBCs com três compacidades diferentes (0,82; 0,84; 0,86), mantendo a mesma curva de otimização granulométrica (curva de Alfred). Adicionalmente, foi betonado um quarto tipo de LBCs com compacidade de 0,86, utilizando a curva de Faury para otimizar a granulometria. Quanto aos LCRACs, foram betonados betões com três taxas de incorporação de agregados reciclados distintas (30%, 55% e 80%) (Tabela 2).

Os agregados reciclados (RA) são provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD), que passaram por um processo de britagem. Posteriormente, foram peneirados obtendo-se as granulometrias 1/20 mm, 4/20 mm e 10/20 mm. A título de exemplo, refere-se a percentagem dos resíduos constituintes do RCD 1/20 mm: i) 42,8% de resíduos de betão e argamassa; ii) 19,4% de elementos cerâmicos; iii) 17,0% de pedras naturais; iv) 20,8% de

materiais diversos (vidro, madeira, metais, polímeros, entre outros). Quanto à forma, a areia fina, média e o areão são rolados que enquanto a brita e as diferentes frações de RCD têm uma superfície angular devido à britagem mecânica a que foram sujeitos na produção. As curvas granulométricas dos agregados naturais e reciclados utilizados estão apresentadas na Figura 1.

Na Tabela 2 também está indicado um parâmetro relevante para a análise da aderência, nomeadamente, a taxa de incorporação de agregados reciclados inferiores ao afastamento entre nervuras transversais. Esta abordagem é explicada de seguida.



**Figura 1** Curva granulométrica dos agregados reciclados

A resistência à compressão, aos 28 dias e à data dos ensaios de arrancamento (j dias), apresenta-se na Tabela 3. Tendo em conta que a compacidade é uma das principais variáveis, esta foi confirmada através da validação da massa volúmica, do teor de ar e do volume de betão compactado. A massa volúmica prevista e a massa volúmica medida, tanto em estado fresco como em estado endurecido, não tiveram diferenças assinaláveis, concluindo-se que a compacidade inicialmente admitida se verificava nos provetes produzidos.

**Tabela 2** Composição dos betões

Materiais		LBC_0,86_ Alfred	LBC_0,84_ Alfred	LBC_0,82_ Alfred	LBC_0,86_ Faury	LCRAC_30	LCRAC_55	LCRAC_80
CEM I 52,5R	(kg/m <sup>3</sup> )	125,0	125,0	125,0	125,0	175,0	175,0	175,0
Filer calcário	(kg/m <sup>3</sup> )	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0
Cinzas volantes	(kg/m <sup>3</sup> )	125,0	125,0	125,0	125,0	75,0	75,0	75,0
MasterGlenium SKY 526	(kg/m <sup>3</sup> )	2,8	1,5	0,3	2,8	2,1	2,9	2,6
Areia siltosa fina 0/1	(kg/m <sup>3</sup> )	20,9	20,3	19,8	271,7	161,0	169,0	376,0
Areia média 0/4	(kg/m <sup>3</sup> )	1049,6	1022,2	994,8	722,4	645,0	675,0	0,0
Areão 4/8	(kg/m <sup>3</sup> )	276,1	268,9	261,7	79,3	188,0	0,0	0,0
Brita calcária 6/14	(kg/m <sup>3</sup> )	675,5	657,9	640,3	951,9	325,7	0,0	0,0
RCD 1/20	(kg/m <sup>3</sup> )	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1343,5
RCD 4/20	(kg/m <sup>3</sup> )	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	926,0	0,0
RCD 10/20	(kg/m <sup>3</sup> )	0,0	0,0	0,0	0,0	476,0	0,0	0,0
Água de absorção	(kg/m <sup>3</sup> )	0,0	0,0	0,0	0,0	24,0	46,0	67,0
Água efetiva	(kg/m <sup>3</sup> )	117,4	138,6	159,8	117,4	138,0	137,0	138,0
Água/cimento		0,94	1,11	1,28	0,94	0,79	0,78	0,79
Água/ligante		0,47	0,55	0,64	0,47	0,39	0,39	0,39
Compacidade		0,86	0,84	0,82	0,86	0,84	0,84	0,84
Taxa de incorporação de RA	(%)	0	0	0	0	30	55	80
Taxa de incorporação de RA inferiores a c	(%)	–	–	–	–	0	15	34

**Tabela 3** Resistência à compressão do betão, aos 28 dias e à data dos ensaios de arrancamento

Provete	j (dias)	$f_{cm,28}$ (MPa)	$f_{cm,j}$ (MPa)
LBC_0,86_Alfred	28	29,7	29,7
LBC_0,84_Alfred	29	20,2	20,4
LBC_0,82_Alfred	30	14,7	15,0
LBC_0,86_Faury	33	26,9	28,2
LCRAC_30	28	24,5	24,5
LCRAC_55	31	19,3	19,6
LCRAC_80	32	15,5	15,8

### 3.2 Varões de aço

Utilizaram-se varões de aço da classe A500NR SD, com 12 mm de diâmetro. As propriedades geométricas e mecânicas dos varões de aço foram validadas segundo a especificação LNEC E460 [21].

Os valores médios da área relativa das nervuras transversais e do afastamento entre nervuras transversais dos varões de aço foram de 0,073 e de 7,7 mm, respetivamente.

### 3.3 Aderência

A relação entre a tensão de aderência e o deslizamento do varão de aço nos quatro tipos de LBC e nos três tipos de LCRAC foi avaliada com recurso a ensaios de arrancamento (POT – *pull-out test* na denominação anglo-saxónica). Foram submetidos a ensaio de arrancamento 35 provetes cúbicos com 200 mm de lado, ou seja, 5 provetes por cada tipo de betão e com um varão parcialmente embebido no valor de 5 vezes o seu diâmetro (Figura 2).

Os ensaios foram conduzidos em regime monotónico, de acordo com a metodologia prescrita no Anexo D da EN 10080:2005 [22] (Figura 2), salvo no que diz respeito à velocidade de aplicação da força de arrancamento e ao cálculo da tensão de aderência. Relativamente à velocidade, optou-se por realizar o ensaio com controlo de deslocamento, tendo a velocidade de aplicação da força de arrancamento sido de 0,03 mm/s, para assegurar a obtenção de valores de tensão de aderência conservativos [13, 23].

1. Comprimento livre para medição do deslizamento
2. Comprimento aderente ( $5\varnothing$ )
3. Comprimento não aderente
4. Comprimento livre
5. Varão de aço
6. Betão
7. Tubo PVC
8. Garras da máquina hidráulica servo-controlada

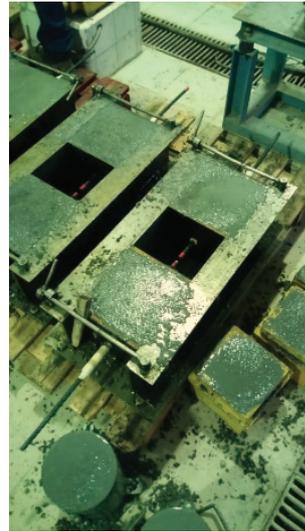
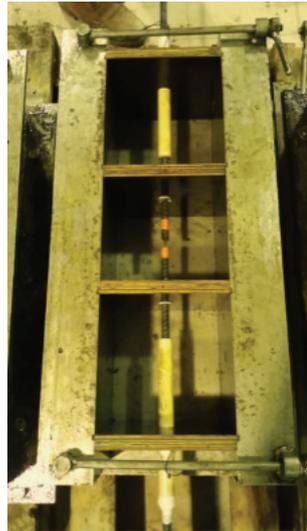
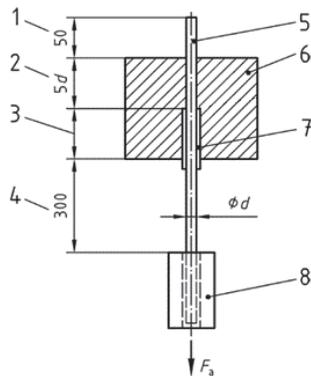


Figura 2 Provetes dos ensaios de arrancamento segundo a EN 10080:2005 [22]

O Anexo D da EN 10080:2005 considera a dependência linear do fator da resistência à compressão do betão na tensão de aderência. Porém, o MC2010, que se baseia em estudos mais recentes, considera uma relação não linear entre ambos. Por conseguinte, as forças de aderência obtidas no ensaio de arrancamento são convertidas em tensões de aderência de acordo com a equação do MC2010:

$$\tau_b = \frac{F_a}{5 \cdot \pi \cdot \varnothing^2} \cdot \left( \frac{f_{cm,28}}{f_{cm,j}} \right)^{1/2} \quad (12)$$

onde,  $F_a$  é a força de arrancamento (em N),  $\varnothing$  é o diâmetro do varão (em mm) e  $f_{cm,28}$  e  $f_{cm,j}$  são as resistências médias à compressão do betão aos 28 dias e à data do ensaio de arrancamento, respetivamente (em MPa). A tensão média de aderência foi calculada através da equação do Eurocódigo 2, que é dada pela média das tensões de aderência correspondentes a deslizamentos de 0,01, 0,1 e 1,0 mm.

A relação entre a tensão de aderência e o deslizamento dos varões, obtida nos ensaios de arrancamento, está apresentada nas Figuras 3 e 4, exceto a curva do segundo ensaio (proвете LBC\_0,86 Alfred) que, devido a um erro de software, impediu a gravação da leitura dos deslocamentos do transdutor. No entanto, a sua tensão máxima foi registada e utilizada na análise e no desenvolvimento da equação da tensão máxima apresentada nas secções seguintes. As tensões máximas de aderência nos provetes LBC\_0,86\_Alfred, LBC\_0,84\_Alfred, LBC\_0,82\_Alfred e LBC\_0,86\_Faury foram de 26,1, 20,1 13,5 e 23,9 MPa e nos provetes LCRAC\_30, LCRAC\_55 e

LCRAC\_80 foram de 23,5, 17,0 e 12,7. Tal como esperado, o modo de rotura em todos os ensaios foi por arrancamento do varão.

A resistência à compressão varia inevitavelmente entre os diferentes betões devido à variação da compactidade e da incorporação dos agregados reciclados. Para isolar as variáveis, normalizou-se o valor da resistência à compressão do betão aos 28 dias a 25 MPa, independentemente da resistência à compressão do betão, e recalcularam se as tensões de aderência.

Os gráficos da Figura 5 mostram a influência da compactidade e da presença de agregados reciclados na tensão máxima de aderência. A análise da influência da compactidade foi feita em conjunto com os resultados experimentais, da aderência LBC-varão, do estudo desenvolvido por Freitas [4]. Na análise da influência dos agregados reciclados foi identificada a possibilidade de as tensões de aderência diminuírem abruptamente, maioritariamente devido à incorporação de agregados reciclados de dimensão inferior ao afastamento entre nervuras transversais. Como estes agregados apresentam uma resistência mecânica inferior à dos agregados naturais, sofrem mais facilmente corte e esmagamento [2]. Então, abordou-se o tema analisando a influência dos agregados reciclados de dimensão inferior ao afastamento entre nervuras nas tensões de aderência. Esta dedução foi possível visto que a literatura técnica aponta para a influência pouco significativa da incorporação de agregados grossos reciclados na aderência betão-varão de aço nervurado [24, 25, 26] e da incorporação de agregados reciclados na aderência betão-varão de aço liso [25, 27].

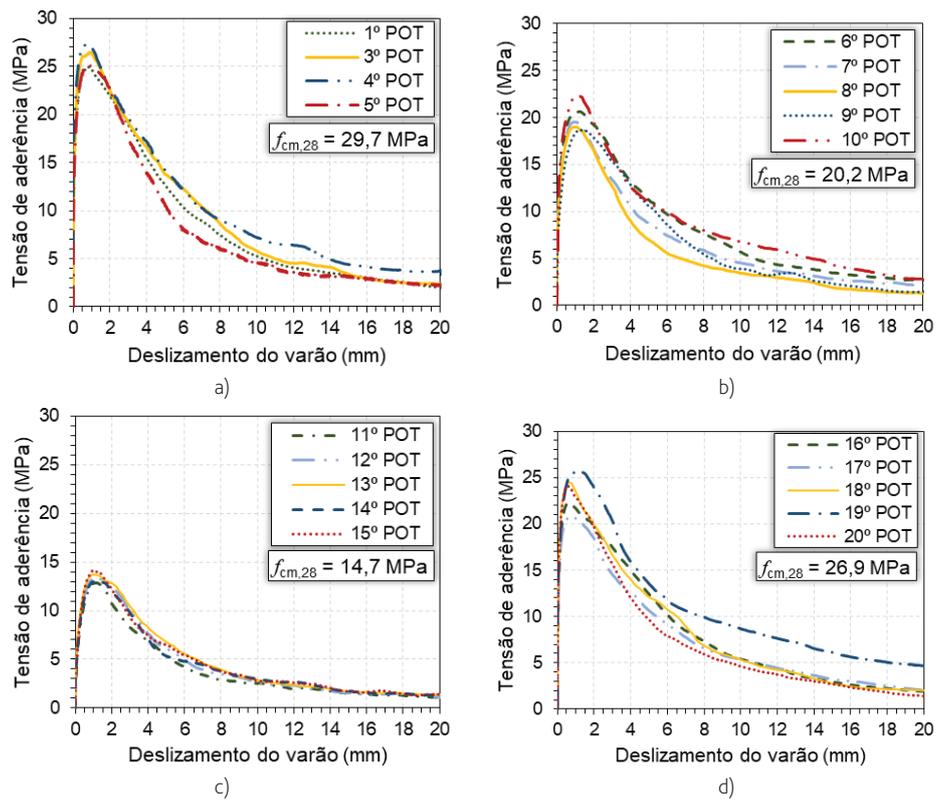


Figura 3 Ensaios de arrancamento em provetes do tipo LBC\_0,86\_Alfred a), LBC\_0,84\_Alfred b), LBC\_0,82\_Alfred c) e LBC\_0,86\_Faury d)

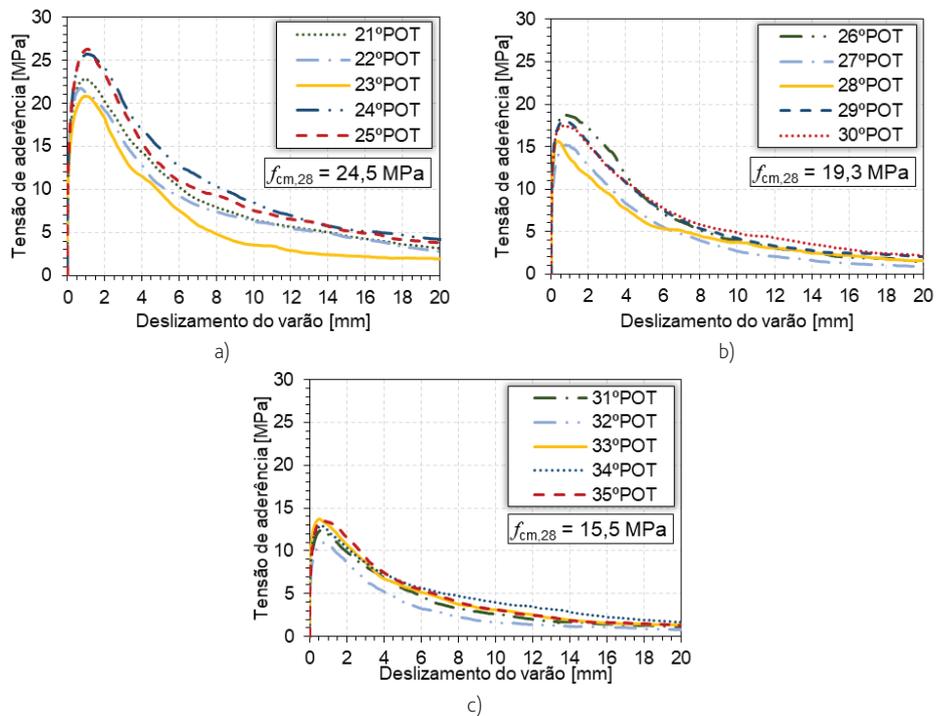


Figura 4 Ensaios de arrancamento em provetes do tipo LCRAC\_30 a), LCRAC\_55 b) e LCRAC\_80 c)

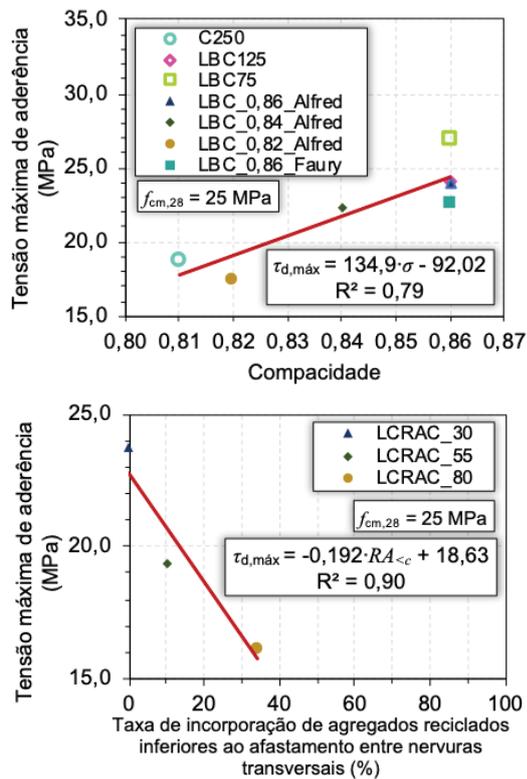


Figura 5 Influência da compacidade (em cima) e da incorporação de agregados reciclados de dimensão inferior ao afastamento entre nervuras transversais (em baixo) na tensão máxima de aderência

## 4 Aderência LBC-varão de aço

### 4.1 Códigos vigentes e propostas existentes para previsão da relação tensão de aderência – deslizamento

A previsão do MC2010 [16] e as propostas de Freitas [4] e de Louro [13] não representaram corretamente a relação entre a tensão de aderência e o deslizamento do varão de aço com aumento da compacidade do betão (Figura 8). As tensões máximas da aderência nos betões com compacidade de 0,86 foram aproximadamente 85% superiores aos valores do MC2010. Adicionalmente, o ramo ascendente da relação entre a tensão de aderência e o deslizamento apresentou uma maior rigidez em relação ao MC2010, refletindo-se na tensão média de aderência. As tensões médias foram cerca de 150% superiores aos valores do MC2010.

Apesar da proposta de Freitas [4] ter aparentemente representado adequadamente a tensão máxima de aderência, o fator da área relativa das nervuras transversais e a parcela da compacidade não retrataram a correta influência destas variáveis nas tensões de aderência. A Figura 6 compara o declive da reta que representa a relação entre a tensão máxima de aderência e a área relativa das nervuras transversais, obtida experimentalmente por André e Pipa

[19], com o declive do fator multiplicativo de Freitas [4]. Esta análise revelou que, para áreas relativas das nervuras transversais superiores a 0,064, o fator introduzido por Freitas [4] atribui à variável uma maior influência nas tensões de aderência do que aquela que se verificou experimentalmente no estudo levado a cabo por André e Pipa [19]. Por conseguinte, como a parcela da compacidade da equação proposta por Freitas [4] foi ajustada com base no fator referente à área relativa das nervuras transversais, a parcela da compacidade também não quantifica corretamente a influência da compacidade.

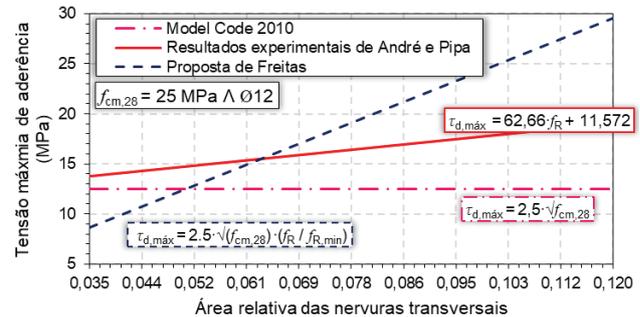


Figura 6 Comparação entre os resultados experimentais de André e Pipa [19] e o fator de Freitas [4] relativo à área relativa das nervuras transversais

### 4.2 Tensão máxima de aderência

A base da proposta deste artigo para a previsão da relação entre a tensão de aderência e o deslizamento, foi a seguinte Equação (6) do MC2010:

$$\tau_{b,m\acute{a}x} = 2,5 \cdot \sqrt{f_{cm,28}} \quad (6)$$

e a seguinte Equação (5) do estudo de André e Pipa [19] foi utilizada para estabelecer um fator,  $\eta_{f_R}$ , que considera a influência da área relativa das nervuras transversais:

$$\tau_{b,m\acute{a}x} = 62,66 \cdot f_R + 11,572 \quad (5)$$

Para a resistência à compressão aos 28 dias de 25 MPa, igualou-se a Equação (6) com o fator  $\eta_{f_R}$  à Equação (5), obtendo-se a seguinte equação:

$$\eta_{f_R} = (5013 \cdot f_R + 925,8) \cdot 10^{-3} \quad (13)$$

Quanto ao parâmetro da compacidade, recorreu-se à equação linear obtida na análise conjunta dos resultados experimentais da campanha experimental com os de Freitas [4]. Igualou-se a Equação (6) com o fator  $\eta_{f_R}$  e com o fator referente à compacidade,  $\eta_{\sigma}$ , à seguinte Equação (14) apresentada na Figura 2 (gráfico da esquerda):

$$\tau_{b,m\acute{a}x} = 134,9 \cdot \sigma + 92,02 \quad (14)$$

obtendo-se:

$$\eta_{\sigma} = (8353 \cdot \sigma - 5699) \cdot 10^{-3} \quad (15)$$

Para se afirmar a generalidade da proposta, cruzaram-se os resultados experimentais de quatro estudos distintos, incluindo

os da campanha experimental sumariamente descrita na secção anterior [4, 13, 19] e relativamente aos quais foi possível o acesso aos resultados experimentais detalhados, num total de 98 ensaios de arrancamento em regime monotónico, envolvendo:

- três diâmetros diferentes, nomeadamente,  $\Phi 12$ ,  $\Phi 16$  e  $\Phi 25$ ;
- doze áreas relativas de nervuras transversais diferentes entre 0,066 e 0,101;
- dez composições de betões distintas, nas quais sete são LBC e três são betões de referência;
- seis compacidades diferentes entre 0,78 a 0,86;
- modos de rotura idênticos, nomeadamente, por arrancamento.

A análise conjunta de todos os resultados experimentais permitiu identificar a tendência de redução das tensões de aderência com o aumento do diâmetro do varão de aço. As tensões máximas de aderência obtidas nos ensaios com varões de 25 mm de diâmetro foram 15 a 20% inferiores às tensões máximas de aderência obtidas nos ensaios com varões de 12 mm de diâmetro (Figura 7). Posto isto, analogamente à metodologia do MC2010, ajustaram-se os fatores  $\eta_{f_R}$  e  $\eta_{\sigma}$  para as tensões de aderência correspondentes aos ensaios com varões de 25 mm de diâmetro. Este ajuste permite que a proposta deste artigo seja mais abrangente, devolvendo tensões de aderência conservativas para varões com diâmetros inferiores a 25 mm.

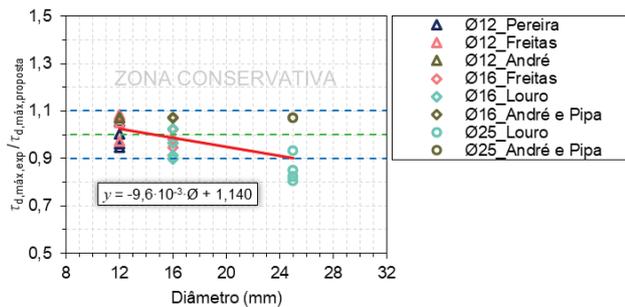


Figura 7 Influência do diâmetro nas tensões de aderência

Desta forma, a proposta para previsão das tensões máximas de aderência na rotura por arrancamento, perante condições de "boa aderência", (Figura 8 e Tabela 4) pode ser obtida através da Equação:

$$\tau_{d,max} = 2,5 \cdot \eta_{f_R} \cdot \eta_{\sigma} \cdot \sqrt{f_{cm,28}} \quad (16)$$

em que:

$$\eta_{f_R} = (4757 \cdot f_R + 878,5) \cdot 10^{-3} \quad (17)$$

e,

$$\eta_{\sigma} = (7927 \cdot \sigma - 5408) \cdot 10^{-3} \quad (18)$$

### 4.3 Rigidez do ramo ascendente-deslocamento $s_1$ e tensão média

A rigidez do ramo ascendente da relação tensão de aderência-deslizamento reflete os deslocamentos em estádios iniciais de carga e, por conseguinte, as tensões médias de aderência. Esta dependência dos deslizamentos provoca, inevitavelmente, uma maior variabilidade dos resultados, em especial nas tensões de aderência a 0,01 mm de deslizamento, seja associado ao comportamento intrinsecamente volátil da ligação entre os dois materiais para pequenos deslizamentos, seja associado a erros na leitura ou na fixação do transdutor de deslocamento. Devido à disparidade dos resultados experimentais obtidos por Freitas [4], ao nível das tensões de aderência correspondentes a pequenos deslocamentos, comparativamente aos obtidos na campanha experimental descrita, não se utilizaram os referidos resultados para a definição do ramo ascendente da curva proposta.

Visto que os deslizamentos  $s_1$  diminuíram e as tensões médias de aderência aumentaram com o incremento da compacidade, a rigidez do ramo ascendente aumentou. Por conseguinte, corrigiram-se por via gráfica e, tendo em conta o erro percentual, o deslizamento  $s_1$  e o parâmetro  $\alpha$  preconizados no MC2010 para que variem em função da compacidade, tendo sido obtidas as seguintes equações:

$$s_1 = 1,0 - 5 \cdot (\sigma - 0,82) \quad \text{se } \sigma \geq 0,82 \quad (19)$$

e,

$$\alpha = 0,4 - 4 \cdot (\sigma - 0,82) \quad \text{se } \sigma \geq 0,82 \quad (20)$$

### 4.4 Rigidez do ramo descendente – deslocamentos $s_2$ e $s_3$ e tensão de atrito

Analogamente à correção do deslizamento  $s_1$ , o deslizamento  $s_2$  é dado por:

$$s_2 = 2,0 - 5 \cdot (\sigma - 0,82) \quad \text{se } \sigma \geq 0,82 \quad (21)$$

O deslizamento  $s_3$  toma o valor do afastamento entre as nervuras transversais,  $c$ , sendo este o valor preconizado pelo MC2010. Para deslizamentos superiores ao afastamento entre nervuras transversais, a ligação betão-varão encontra-se completamente destruída, passando a tensão de aderência a depender exclusivamente do atrito. Para a generalidade dos ensaios o valor da tensão de aderência residual é da ordem dos 30% da tensão máxima de aderência.

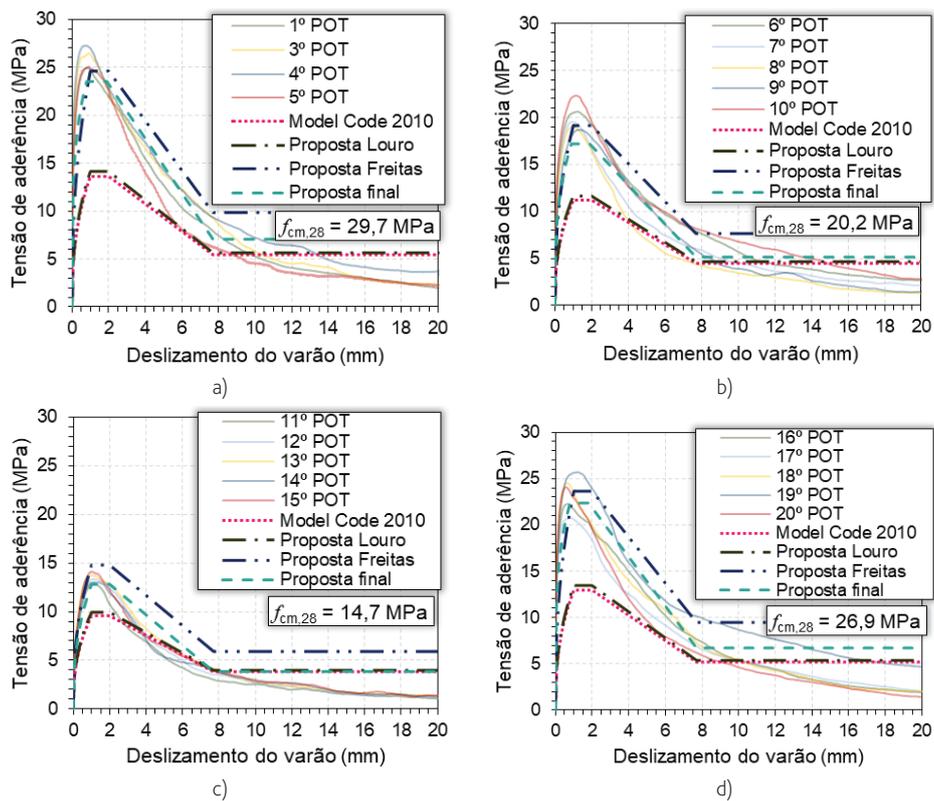


Figura 8 Relação tensão de aderência-deslizamento nos provetes do tipo LBC\_0,86\_Alfred a), LBC\_0,84\_Alfred b), LBC\_0,82\_Alfred (c) e LBC\_0,86\_Faury d)

## 5 Aderência LCRAC-varão de aço

### 5.1 Códigos vigentes e propostas existentes para previsão da relação tensão de aderência-deslizamento

À semelhança das variáveis analisadas nos LBCs, nomeadamente a compacidade e a área relativa das nervuras transversais, o MC2010 não especifica a influência dos agregados reciclados no cálculo das tensões de aderência. O MC2010 e a proposta do capítulo anterior para a previsão da relação tensão de aderência-deslizamento não reproduzem adequadamente os resultados obtidos nos ensaios com os LCRAC (Figura 9). As tensões máximas e médias de aderência dos betões com compacidade de 0,84 e com uma taxa de incorporação de agregados reciclados de 30% foram cerca de 90% e 140% superiores aos valores previstos pelo MC2010. Note-se que a mínima dimensão dos agregados reciclados incorporados nestes betões é superior ao afastamento entre nervuras transversais.

### 5.2 Relação tensão de aderência-deslizamento

Tal como referido anteriormente, a diminuição das tensões de aderência nos LCRAC não esteve necessariamente associada à incorporação de agregados reciclados, mas sim, à incorporação de agregados reciclados com dimensão inferior ao afastamento entre nervuras transversais. Neste sentido, optou-se por introduzir na Equação (15) um terceiro fator multiplicativo referente à incorporação de agregados reciclados com dimensão inferior ao afastamento entre nervuras transversais,  $\eta_{RA_{<c}}$ . Igualou-se a Equação (15) com este fator à equação da figura 2 (gráfico da direita), obtendo-se a equação:

$$\eta_{RA_{<c}} < c = (1000 - 972 \cdot RA_{<c}) \cdot 10^{-3} \quad (22)$$

onde,  $RA_{<c}$  representa a taxa de incorporação de agregados reciclados com dimensão inferior ao afastamento entre nervuras transversais (Figura 9 e Tabela 4). Na Equação (22)  $RA_{<c}$  não entra em percentagem e é adimensional.

**Tabela 4** Comparação entre as tensões máximas de aderência dos ensaios e a Equação (23) da proposta final

$\emptyset$	Referência	Provetes POT	$f_R$	$\sigma$	$RA_{<c}$ (%)	$f_{cm,28}$ experimental (MPa)	$\tau_{b,máx}$ experimental (MPa)	Equação (22) (MPa)	Erro percentual (*)
12	Pereira [15]	LBC_0,86_Alfred	0,073	0,86	–	29,7	26,1	23,5	– 11%
		LBC_0,84_Alfred	0,073	0,84	–	20,2	20,1	17,2	– 17%
		LBC_0,82_Alfred	0,073	0,82	–	14,7	13,5	12,8	– 5%
		LBC_0,86_Faury	0,073	0,86	–	26,9	23,9	22,4	– 7%
		LCRAC_30	0,073	0,84	0	24,5	23,5	19,0	– 24%
		LCRAC_55	0,073	0,84	14	19,3	17,0	15,5	– 10%
	LCRAC_80	0,073	0,84	34	15,5	12,7	10,9	– 17%	
	Freitas [4]	C250	0,082	0,81	–	31,5	21,0	18,0	– 17%
		LBC125	0,082	0,86	–	26,2	24,7	22,9	– 8%
		LBC75	0,082	0,86	–	17,1	22,3	18,5	– 21%
	André e Pipa [19]	$f_R <$	0,073	0,79	–	25	16,2	13,6	– 19%
		$f_R >$	0,090	0,79	–	25	17,2	14,5	– 19%
16	Freitas [4]	C250	0,066	0,81	–	31,5	19,2	16,9	– 13%
		LBC125	0,066	0,86	–	26,2	22,6	21,5	– 5%
		LBC75	0,066	0,86	–	17,1	18,9	17,4	– 9%
	Louro [13]	A_C1_16	0,081	0,79	–	38	15,8	15,9	0%
		B_C1_16	0,099	0,79	–	38	18,0	17,8	– 1%
		A_C2_16	0,081	0,78	–	58	22,1	19,4	– 14%
		B_C2_16	0,099	0,78	–	58	22,2	20,7	– 7%
	André e Pipa [19]	$f_R <$	0,073	0,79	–	25	16,2	13,6	– 19%
		$f_R >$	0,093	0,79	–	25	17,4	14,6	– 19%
	25	Louro [13]	A_C1_25	0,096	0,79	–	38	17,3	16,8
B_C1_25			0,101	0,79	–	38	16,1	17,1	+ 6%
A_C2_25			0,096	0,78	–	58	18,0	19,7	+ 9%
B_C2_25			0,101	0,78	–	58	17,9	20,0	+ 10%
André e Pipa [19]		$f_R <$	0,070	0,79	–	25	16,0	13,4	– 19%
		$f_R >$	0,085	0,79	–	25	16,9	14,2	– 19%

(\*) O sinal (–) representa um valor conservativo da Equação (23) em relação ao valor experimental e o sinal (+) representa um valor da Equação (23) superior ao valor experimental.

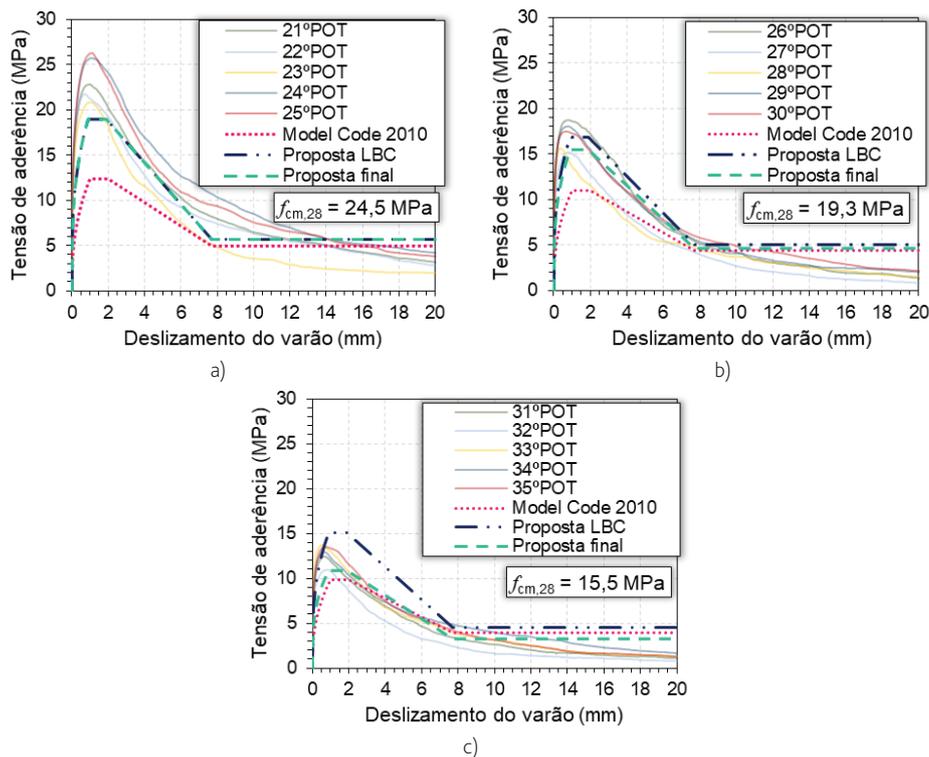


Figura 9 Relação tensão de aderência-deslizamento nos provetes do tipo LCRAC\_30 a), LCRAC\_55 b) e LCRAC\_80 c).

## 6 Conclusões

O estudo experimental sumariamente apresentado permitiu analisar a influência de diferentes parâmetros no desempenho da ligação entre os LBCs e os LCRACs e os varões de aço, tendo-se confirmado que o aumento da compactidade é determinante para o aumento das tensões de aderência.

Neste sentido, este estudo aponta para a possibilidade de se otimizar a lei de aderência-deslizamento, tendo em conta os parâmetros condicionantes no comportamento da aderência aço-betão. Desta forma, apresenta-se uma primeira proposta para previsão da relação entre a tensão de aderência e o deslizamento do varão de aço. Esta proposta tem em consideração a influência dos parâmetros determinantes para o aumento das tensões de aderência, nomeadamente a compactidade e a área relativa das nervuras transversais, mas também o diâmetro do varão, a taxa de incorporação de agregados reciclados e as restantes variáveis já incluídas nos códigos vigentes.

A necessidade de uma nova proposta para a previsão da relação entre a tensão de aderência e o deslizamento do varão de aço foi realçada ao verificar que o MC2010 e as propostas de Freitas [4] e Louro [13] não representaram quantitativamente a relação tensão de aderência-deslizamento, apesar da representação qualitativa ser idêntica ao verificado nos ensaios experimentais.

A influência da compactidade na aderência destacou-se novamente ao comparar as tensões de aderência com os valores preconizados

pelo MC2010. As tensões máximas e médias de aderência nos LBCs de 0,86 de compactidade aumentaram entre 85 e 150% e as tensões máximas de aderência dos betões com 0,84 de compactidade e uma taxa de incorporação de 30% de agregados reciclados aumentaram entre 90 e 140%, em relação ao MC2010. Note-se que a máxima dimensão dos agregados reciclados incorporados nesta tipologia de LCRAC foi superior ao afastamento entre nervuras transversais.

Como as tensões de aderência diminuíram 15 a 20% utilizando varões de 25 mm de diâmetro relativamente às tensões de aderência utilizando varões de 12 mm de diâmetro, não sendo a variável do diâmetro do varão de aço incluída nas equações da proposta, a generalidade da proposta estaria dependente desta variável. Optou-se por ajustar a proposta para tensões de aderência obtidas com varões de 25 mm, devolvendo assim a referida proposta valores conservativos para diâmetros inferiores.

Na Tabela 5 apresenta-se, em articulação com a relação entre a tensão de aderência,  $\tau_b$ , e o deslizamento,  $s$ , para carregamentos em regime monotónico proposta pelo MC2010 [16] (Equações (1) a (4)), uma proposta para a previsão da relação entre a tensão de aderência e o deslizamento do varão de aço, numa rotura por arrancamento e perante condições de “boa aderência”, aplicável a betões correntes e betões dos tipos LBC e LCRAC.

A inovação do trabalho realizado consiste: (i) no desenvolvimento de betões de baixo teor de cimento, logo, com menor impacto ambiental, (ii) na quantificação da influência da maior compactidade

destes betões na aderência varão-betão e; (iii) na proposta de uma expressão de cálculo, modificada a partir da expressão do MC2010.

**Tabela 5** Proposta para a previsão da relação tensão de aderência-deslizamento

Parâmetro	Proposta Previsão da Relação Tensão de Aderência-Deslizamento	
$\tau_{d,máx}$ (MPa)	$2,5 \cdot \eta_{f_R} \cdot \eta_{\sigma} \cdot \eta_{RA<c} \cdot \sqrt{f_{cm,28}}$	(23)
$\eta_{f_R}$	$(4757 \cdot f_R - 878,5) \cdot 10^{-3}$	(17)
$\eta_{\sigma}$	$(7927 \cdot \sigma - 5408) \cdot 10^{-3}$	(18)
$\eta_{RA<c}$	$(1000-972 \cdot RA_{<c}) \cdot 10^{-3}$	(22)
$s_1$ (mm)	$1,0 - 5 \cdot (\sigma - 0,82)$	se $\sigma \geq 0,82$
	1,0	se $\sigma \leq 0,82$
$s_2$ (mm)	$2,0 - 5 \cdot (\sigma - 0,82)$	se $\sigma \geq 0,82$
	2,0	se $\sigma \leq 0,82$
$s_3$ (mm)	c	
$\alpha$	$0,4 - 4 \cdot (\sigma - 0,82)$	se $\sigma \geq 0,82$
	0,4	se $\sigma \leq 0,82$
$\tau_{d,atrito}$ (MPa)	$0,30 \cdot \tau_{b,máx}$	se $\sigma \geq 0,82$
	$0,40 \cdot \tau_{b,máx}$	se $\sigma \leq 0,82$

## Referências

- [1] International Energy Agency – Technology Roadmap: *Low-Carbon Transition in the Cement Industry*. Word Business Council for Sustainable Development, 2019.
- [2] Dhir et al. – *Sustainable Construction Materials*. Elsevier, 2019. doi: 10.1016/C2015-0-00466-X
- [3] Alves, H. – *Formulação e caracterização mecânica de betões com baixa dosagem de cimento*. Dissertação de mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, 2016.
- [4] Freitas, E. et al. – “Bond behaviour between steel / stainless-steel reinforcing bars and low binder concrete (LBC)”, *Engineering Structures*, Elsevier, 2020, Vol. 221. doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111072
- [5] Fennis, S.; Walraven, J. – “Defined-performance design of ecological concrete”, *Materials and Structures*, RILEM, 2013, Vol. 46, p. 639–50. doi: 10.1617/s11527-012-9922-2
- [6] Robalo, K. et al. – “Efficiency of cement content and of compactness on mechanical performance of low cement concrete designed with packing optimization”, *Construction and Building Materials*, Elsevier, 2020, accepted and in print.
- [7] Robalo, K. et al. – “Durability and Time-Dependent Properties of Low-Cement Concrete”, *Materials*, MDPI, 2020, Vol. 13. doi: 10.3390/ma13163583
- [8] Robalo et al. – “Betões eco eficientes com baixo teor de cimento e com agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição”, *Encontro Nacional do Betão Estrutural*, 2018, Lisboa.
- [9] Bilsen et al. – *Development and implementation of initiatives fostering investment and innovation in construction and demolition waste recycling infrastructure*. Publications Office of the European Union, 2018. doi: 10.2873/11837
- [10] Dhir, R.; Paine K. – “Suitability and practicality of using coarse RCA in normal and high-strength concrete”, *1<sup>st</sup> International Conference on Sustainable Construction: Waste Management*, 2014, Singapore.
- [11] Bravo, M. et al. – “Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants”, *J. Clean. Prod.*, 2015, Vol. 99, p. 59-74.
- [12] Santos, M. et al. – “Propriedades Mecânicas de Betões com Agregados Reciclados: Influência do Agregado Natural e do Betão de Origem”, *XIII Lat. Am. Congr. Constr. Pathol. / XV Congr. Qual. Control Constr.*, 2015, p. 0-8. doi: 10.13140/RG.2.1.2372.7448
- [13] Louro, A. – *Caracterização da aderência de varões nervurados sujeitos a ações repetidas e alternadas*. Dissertação de doutoramento. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2014.
- [14] Metelli, G.; Plizzari, G. – “Influence of the relative rib area on bond behaviour”, *Magazine of Concrete Research*, Thomas Telford, 2014, Vol. 66, p. 277-94. doi: 10.1680/macr.13.00198
- [15] Pereira, T. – *Aderência entre varões de aço e betão com baixa dosagem de ligante e incorporação de agregados reciclados*. Dissertação de mestrado. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2019.
- [16] FIB – *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Ernst & Sohn, 2013.
- [17] NP EN 1992-1-1:2010 – *Eurocódigo 2 – Projeto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*. Instituto Português da Qualidade, 2010.
- [18] Cairns, J. – “Bond and anchorage of embedded steel reinforcement in fib Model Code 2010”, *Structural Concrete*, 2015, Vol. 16, p. 45-55. doi: 10.1002/suco.201400043
- [19] André, J.; Pipa, M. – “Influência na aderência aço-betão da alteração local da configuração geométrica das nervuras de armaduras de aço”, *Encontro Nacional do Betão Estrutural*, 2018, Lisboa.
- [20] NP EN 206-1 – *Betão – Especificação, desempenho, produção e conformidade*. Instituto Português da Qualidade, 2017.
- [21] Especificação LNEC E460-2017 – *Armaduras ordinárias em estruturas de betão armado e pré-esforçado*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2017.
- [22] EN 10080:2005 – *Aços para armaduras de betão armado. Aços soldáveis para betão armado*. Generalidades. European Committee for Standardization, 2005.
- [23] Eligehausen et al. – *Local Bond Stress-Slip Relationship of Deformed Bars under Generalized Excitations*. Report No UCB/EERC-83/23. Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1983.
- [24] Kim, S.; Yun, H. – “Influence of recycled coarse aggregates on the bond behavior of deformed bars in concrete”, *Engineering Structures*, Elsevier, 2013. doi: 10.1016/j.engstruct.2012.10.009

- [25] Xiao, J. – *Recycled Aggregate Concrete Structures*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2018. doi: 10.1007/978-3-662-53987-3
- [26] Guerra, R. – *Aderência de varões de aço a betões com incorporação de agregados grossos reciclados de betão*. Dissertação de mestrado. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2013.
- [27] Bai, G. et al. – “Investigation of Bond-Slip Behavior between Recycled Concrete and Steel Bars under Pull-out Test”, *2<sup>nd</sup> International Conference on Waste Engineering and Management*, RILEM, 2010, p. 628-37.0