

Caracterização da aderência de varões nervurados sujeitos a ações repetidas e alternadas



Ana S. Louro¹



Manuel Pipa¹

RESUMO

No presente trabalho pretende-se apresentar os resultados mais relevantes obtidos num programa experimental desenvolvido no LNEC com o objetivo de caracterizar a aderência dos varões nervurados do tipo A500NR SD existentes no mercado, fundamentalmente para melhorar a modelação do comportamento dos elementos de betão armado de zonas críticas de estruturas inseridas em zonas sísmicas.

O programa experimental desenvolvido pretende simular as condições de aderência existentes num varão horizontal de uma ligação viga-pilar e tem como principais variáveis varões de dois diâmetros frequentemente utilizados (16 e 25mm), dois níveis diferentes de área relativa das nervuras (A e B) e duas classes de betão (NSC e HSC), ambos representativos do betão utilizado nas construções mais relevantes.

Os resultados obtidos quer nos ensaios monotónicos quer nos ensaios cíclicos apontam para um decréscimo da tensão de aderência com o aumento do diâmetro da ordem dos 10%. O aumento da área relativa das nervuras transversais traduz-se num incremento da tensão máxima de aderência da ordem dos 15%, com uma redução do deslizamento que ronda os 18%. Em termos de resistência do betão, verifica-se um aumento da tensão de aderência compatível com o aumento da resistência do betão mas mais significativo nos varões de 16mm.

Palavras-chave: aderência, varões nervurados, ações repetidas e alternadas

1. INTRODUÇÃO

A aderência é uma propriedade essencial para o bom desempenho dos elementos de betão armado, na medida em que é o mecanismo que assegura a transferência de tensões entre o aço e o betão e tem um papel fundamental, quer em termos de estados limite de utilização limitando a abertura de fendas e também a sua distribuição contribuindo assim para minorar as deformações e danos muito localizados,

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Núcleo de Comportamento de Estruturas, Lisboa, Portugal. analouro@lneec.pt, mpipa@lneec.pt

quer também ao nível do estado limite último, proporcionando ao betão a capacidade de amarração adequada de qualquer armadura, mas também com influência na capacidade de rotação de rótulas plásticas e, no limite, reduções severas de aderência podem afetar o funcionamento conjunto entre os dois materiais. Neste sentido importa contabilizar adequadamente o deslizamento que efetivamente ocorre na interface armadura-betão, uma vez que nem sempre é irrelevante assumir uma ligação perfeita entre a armadura e o betão [1].

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental realizado tem como principais variáveis varões de dois diâmetros frequentemente utilizados em ligações viga-pilar (16 e 25mm) de aço do tipo A500NR SD, dois níveis diferentes de área relativa das nervuras transversais (A e B) e duas classes de betão (NSC e HSC), ambas representativas do betão utilizado nas construções mais relevantes.

Para caracterizar adequadamente a relação local tensão de aderência-deslizamento considerou-se um comprimento aderente curto ($6 \times d$), de acordo com as recomendações de *Cairns et al* [2], o que também permite vir a usar os resultados obtidos na modelação numérica de elementos de betão armado, extrapolando os resultados para zonas de amarração, por exemplo. Por outro lado, para assegurar que seria possível obter a entrada em cedência da armadura no comprimento aderente previsto, foi necessário sujeitar varões dos lotes A e B a um tratamento térmico para destruição da camada superficial. Dado que a camada superficial é a mais resistente, uma vez que o processo de produção *Tempcore* confere aos varões de aço uma secção transversal formada por três camadas, constituídas por diferentes ligas Ferro-Carbono, nomeadamente o núcleo (ferrite com perlite), a camada de transição (martensite revenida, bainite revenida e ferrite com perlite) e a camada superficial (martensite revenida) [3]. Assim, para obtenção dos lotes AT e BT, solicitou-se o reaquecimento dos varões após a sua produção, a uma temperatura da ordem dos 950°C durante um período entre 7 e 10 minutos conforme o diâmetro, o que conduziu a uma redução da tensão de cedência, mantendo o mesmo perfil nervurado.

Com o objetivo de simular os diferentes tipos de carregamento a que um varão de uma ligação viga-pilar pode estar sujeito, aquando da ocorrência de um sismo, foram realizados ensaios de referência (monotónicos) e também diversos tipos de ensaios cíclicos. Dos ensaios realizados até à data, os que apresentam maior influência, em termos de consequências para a tensão máxima de aderência e o respetivo deslizamento, são os ensaios cíclicos alternados com deslizamento imposto da ordem dos 80% do deslizamento correspondente à tensão máxima de aderência.

Para cada tipo de ensaio, foram testados pelo menos três provetes semelhantes ou seja, com o mesmo tipo de armadura e do mesmo lote de betão, para se tentar reduzir a dispersão de resultados típica deste tipo de ensaios. Todos os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento, com a mesma velocidade constante e, no caso dos ensaios cíclicos alternados, foram impostos 10 ciclos tração-compressão antes de se proceder ao arrancamento do varão em tração.

2.1 Materiais utilizados

2.1.1 Betões

Em função das dimensões da sala de ensaios disponível para realizar as operações de betonagem e do tempo inerente à correta execução de cada um dos 192 provetes previstos no programa experimental, optou-se pela divisão das operações de betonagem em quatro séries, duas de cada classe de betão. Em cada série, para além dos 48 provetes, foram moldados três cubos (150×150×150 mm) e três vigas (150×150×550 mm) para avaliar a resistência à compressão e à tração aos 28 dias, respetivamente. Os cubos e as vigas foram executados e sujeitos à cura nas condições definidas pela NP EN 12390 [4].

Paralelamente foi também moldado um cubo para a avaliação da resistência à compressão na data de ensaio de cada conjunto de três provetes de arrancamento. Os provetes de arrancamento e os respetivos cubos permaneceram na mesma sala de ensaios e nas mesmas condições de temperatura e humidade.

Quadro 1. Resistência do betão à compressão e à tração aos 28 dias.

Classe	Série	f_c	f_{cm}
		(MPa)	(MPa)
C30/37	1	43.6	3.9
C50/60	2	59.8	5.4
C30/37	3	36.4	3.9
C50/60	4	63.1	6.8

2.1.2 Armaduras

Os varões de aço de ductilidade especial do tipo A500NR SD utilizados neste programa experimental foram seleccionados a partir da produção normal de uma siderurgia com produção certificada, para que fosse possível obter para cada um dos diâmetros dois lotes distintos (A e B).

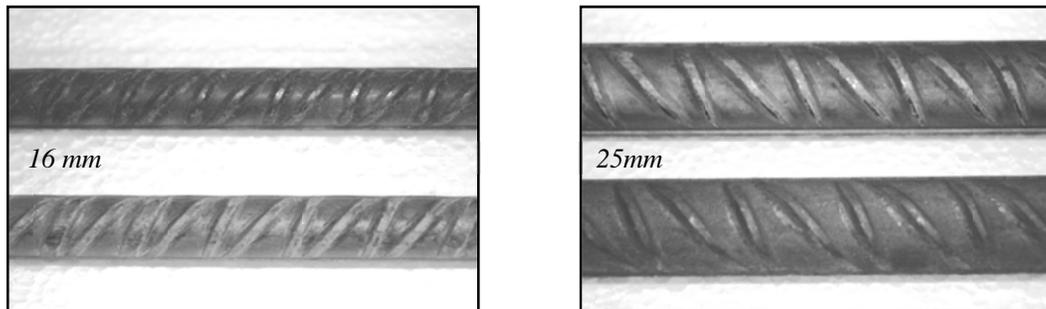


Figura 1. Varões de 16 e 25mm de aço do tipo A500NR SD.

Entre o lote A e B a diferença reside na área relativa das nervuras transversais, sendo que no lote B é aproximadamente 23% superior ao lote A no diâmetro 16mm. No caso dos varões de 25mm de diâmetro a diferença é de apenas 5%.

Os resultados médios apresentados nos quadros 2 e 3 resultam de ensaios realizados em 6 provetes para caracterização mecânica (tensão de cedência - R_{eH} , tensão de rotura - R_m e extensão total na força máxima - A_{gt}) e geométrica (altura das nervuras transversais - a , espaçamento entre nervuras - c , perímetro sem nervuras transversais - Σf_i e área relativa das nervuras transversais - f_R) e foram realizados de acordo com os requisitos da EN ISO 15630-1 [5].

Quadro 2. Características mecânicas dos varões em estudo.

Varões	R_{eH}	R_m	A_{gt}	
	(MPa)	(MPa)	(%)	
16 mm	A	544	640	13
	AT	517	611	13
	B	541	636	13
	BT	444	540	14
25 mm	A	530	638	10
	AT	464	570	12
	B	549	662	11
	BT	473	578	9

Quadro 3. Características geométricas das nervuras dos varões em estudo.

Varões	a	c	Σf_i	f_R	
	(mm)	(mm)	(mm)		
16 mm	A	1.29	10.0	3.2	0.081
	AT	1.28	10.0	3.8	0.080
	B	1.58	9.9	3.8	0.099
	BT	1.59	9.9	4.2	0.098
25 mm	A	2.22	14.4	5.7	0.096
	AT	2.27	14.4	6.4	0.097
	B	2.41	14.5	6.9	0.101
	BT	2.41	14.5	7.1	0.101

A armadura de confinamento, constituída por 4 varões que atravessam a zona aderente do varão, foi executada com varões do tipo A500NR SD de 10 e 12mm de diâmetro para os provetes com varões de 16 e 25mm, respetivamente. Estes 4 varões foram soldados em todos os pontos de contato a 4 cintas igualmente espaçadas entre si, constituídas por varões do mesmo diâmetro dos varões verticais e do mesmo tipo de aço, assegurando-se assim o seu devido posicionamento e a sua amarração ao betão (ver figuras 2 e 3).

2.2 Características dos provetes ensaiados

Os provetes para a realização dos ensaios de arrancamento foram preparados para simular as condições locais de aderência que habitualmente se encontram nos varões horizontais que atravessam uma ligação viga-pilar, à semelhança dos projetados por *Eligehausen* [6]. O betão envolvente à zona aderente encontra-se confinado por uma armadura secundária que representa a armadura vertical de um pilar na zona de ligação a uma viga. O varão a ensaiar encontra-se a meia altura do provete, sendo colocada uma membrana plástica com aproximadamente 1mm de espessura a delimitar a área de influência do varão, que na prática está dependente do espaçamento entre 2 varões consecutivos. Os provetes foram dimensionados com o objetivo de se atingir a rotura por arrancamento em boas condições de aderência. Os detalhes, em termos de geometria, relativos aos 2 tipos de provetes apresentam-se nas figuras seguintes.

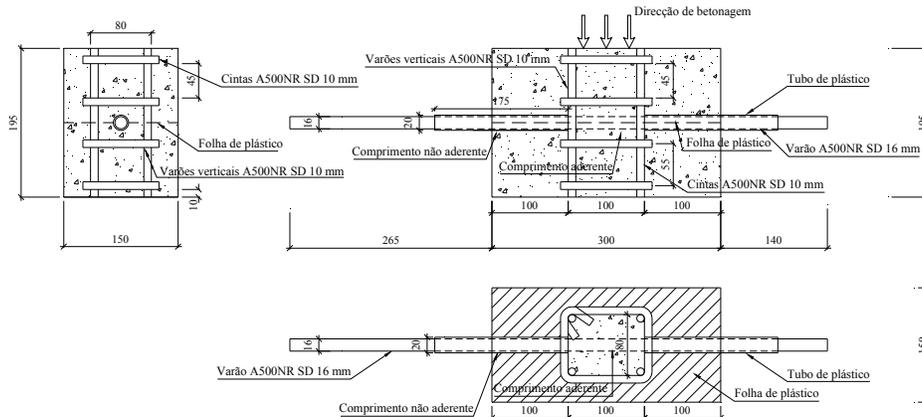


Figura 2. Características gerais dos provetes com varões de 16mm.

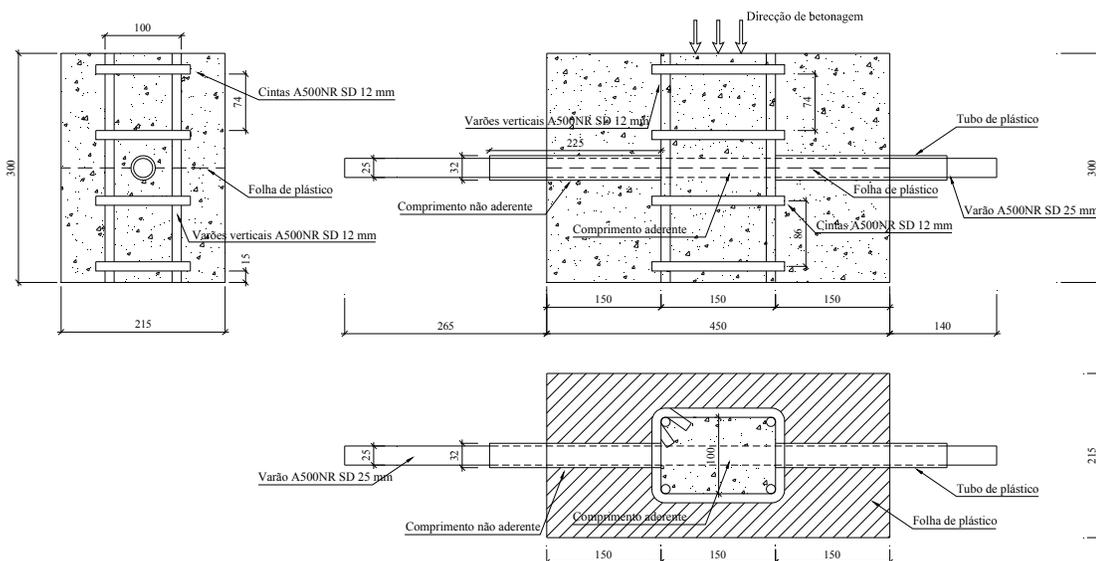


Figura 3. Características gerais dos provetes com varões de 25mm.

2.3 Sistema de ensaio

Os provetes foram ensaiados numa máquina hidráulica servo controlada com 1000kN de capacidade, que permite a aplicação de forças de tração e compressão e recorrendo à utilização de um acessório de ensaio que se encontra aparafusado ao cabeçote inferior do equipamento de ensaio. Para evitar possíveis excentricidades, que poderiam conduzir ao arranque inadequado do ensaio, as dimensões da base dos provetes foram marcadas na chapa inferior do acessório de ensaio, com vista a facilitar também a colocação da camada superior e inferior de membrana plástica de 5mm de espessura, usada para regularizar a superfície e minimizar possíveis efeitos de extremidade.



Figura 4. Equipamento e respetivo acessório, com provete instalado, imediatamente antes de um ensaio.



Figura 5. Sistema de suporte dos medidores de deslocamento.

Os deslocamentos relativos entre a extremidade livre do varão e a face de betão foram medidos recorrendo à utilização de 2 transdutores de deslocamento (CDP-50 da TML) inseridos num suporte solidário ao varão a ensaiar. A aquisição de dados foi feita através de uma unidade multicanal de aquisição automática de dados (*Spider 8*) comandada pelo software *Catman*.

3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

3.1 Ensaio monotónicos

Nos resultados dos ensaios realizados em regime monotónico, para além da tensão máxima de aderência (τ_1) e respetivo deslizamento (s_1), determinou-se também a tensão média de aderência ($\tau_{d,avg}$) de acordo com o preconizado pelo Anexo C do Eurocódigo 2 [7]. Para este tipo de ensaios, a análise da tensão média, bem como os valores que a ela dão origem, foi considerada uma boa forma de avaliar a homogeneidade dos resultados obtidos entre provetes com as mesmas características, permitindo excluir eventuais provetes com valores anómalos.

$$\tau_{d,avg} = \frac{\tau_{0,01} + \tau_{0,1} + \tau_1}{3} \quad (1)$$

onde $\tau_{0,01}$, $\tau_{0,1}$ e τ_1 representam a tensão de aderência para 0.01 mm, 0.1mm e 1 mm de deslizamento, respectivamente. A tensão de aderência local foi obtida através da equação 2 e aplicando a correção para ter em conta a realização de ensaios em diferentes datas, conforme a equação 3.

$$\tau = \frac{F}{\pi \times d \times l} \quad (2)$$

onde F representa a força, d o diâmetro e l o comprimento aderente ($6 \times d$).

$$\tau_d = \tau \times \sqrt{\frac{f_{cm}}{f_c}} \quad (3)$$

em que f_{cm} representa a resistência média à compressão de cada um dos betões (C30/37 - 45 MPa e C50/60 - 68MPa) e f_c a resistência à compressão na data de ensaio.

Para facilitar a análise global dos resultados, por tipo de material ensaiado, apresentam-se nas figuras seguintes apenas os andamentos médios da relação tensão de aderência-deslizamento, obtidos nos ensaios monotônicos realizados e discutem-se os respetivos resultados nos pontos seguintes.

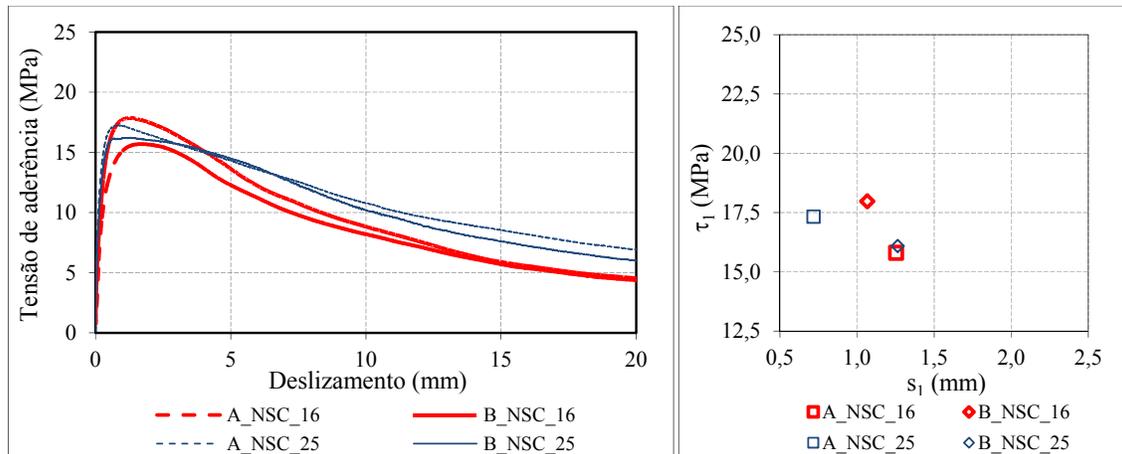


Figura 6. Ensaios monotônicos: resultados obtidos nos provetes com betão de resistência normal (NSC).

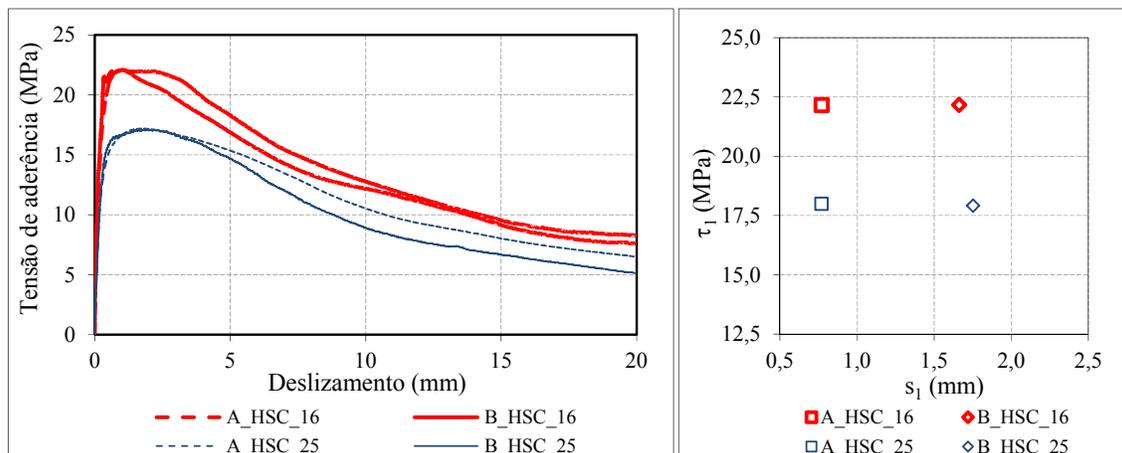


Figura 7. Ensaios monotônicos: resultados obtidos nos provetes com betão de maior resistência (HSC).

3.1.1 Efeito do diâmetro

Apesar de se saber que o diâmetro da armadura tem influência na tensão de aderência, não se encontra na bibliografia uma relação quantitativa para o efeito, sendo aceite que a tensão de aderência diminui com o aumento do diâmetro. Os diversos trabalhos nesta área consideram que este efeito resulta do efeito de escala, uma vez que a zona de influência do mecanismo de aderência não é proporcional ao aumento do diâmetro do varão. O trabalho de *Lowes* [8], baseando-se nos estudos de *Vivathanatepa et al.* e de *Eligehausen et al.*, considera que a tensão de aderência nos diâmetros comerciais de varões pode apresentar variações entre 10 e 20%.

Comparando a média da tensão de aderência máxima obtida para os provetes B_NSC_16 e B_NSC_25, que possuem o mesmo nível de f_R , constata-se que existe uma redução da ordem dos 10% entre os varões de 16 e 25 mm de diâmetro, o que se enquadra no referido na literatura.

Por outro lado, nos provetes com betão de maior resistência à compressão (B_HSC_16 e B_HSC_25) a redução da tensão máxima de aderência é mais acentuada. Resultados semelhantes foram também

obtidos por *Bamonte et al.* [9], que salientam que o efeito de escala inerente ao aumento de diâmetro é mais significativo nos provetes executados com betão de maior resistência à compressão, como consequência da menor capacidade de deformação deste material.

3.1.2 Efeito da maior área relativa das nervuras transversais

Em termos de tensão máxima de aderência e respetivo deslizamento, os resultados médios obtidos para os provetes A e B_NSC_16 estão de acordo com o previsto, ou seja maior f_R traduz-se numa maior tensão máxima de aderência. No caso dos varões de 25 mm (A e B_NSC_25), a diferença de f_R é muito pouco significativa ($\pm 5\%$) e, portanto, existe uma ligeira inversão da relação, que pode ser explicada pelos resultados do betão ou pelo fator maior diâmetro, uma vez que foram realizados ensaios adicionais para confirmar os resultados inicialmente obtidos (ver Figura 8).

No betão de maior resistência verifica-se que nos provetes B_HSC_16 foi possível atingir a cedência da armadura e, mesmo assim, a tensão máxima de aderência é praticamente igual à dos provetes com menor f_R , o que deixa antever a possibilidade de a tensão máxima de aderência poder ser superior, caso a cedência da armadura não tivesse ocorrido. Esta constatação vai também de encontro aos resultados obtidos para o betão de resistência normal.

3.1.3 Efeito do betão

Analisando os resultados individuais sob o ponto de vista da resistência do betão, conclui-se que existe uma maior dispersão nos valores da tensão máxima de aderência obtidos para os provetes com betão de maior resistência. O aumento da resistência do betão é mais relevante no aumento das tensões máximas de aderência dos varões de 16mm e conduz a uma redução considerável do deslizamento correspondente.

Nos provetes com varões de 25mm de diâmetro, o aumento da resistência do betão origina um ligeiro aumento das tensões de aderência máximas, com demonstra a figura seguinte, pelo que os resultados obtidos apontam para a existência de um efeito conjugado entre o maior diâmetro e a maior resistência do betão. Apesar da maior dispersão, os resultados médios obtidos são coerentes com o expectável em termos de área relativa das nervuras transversais.

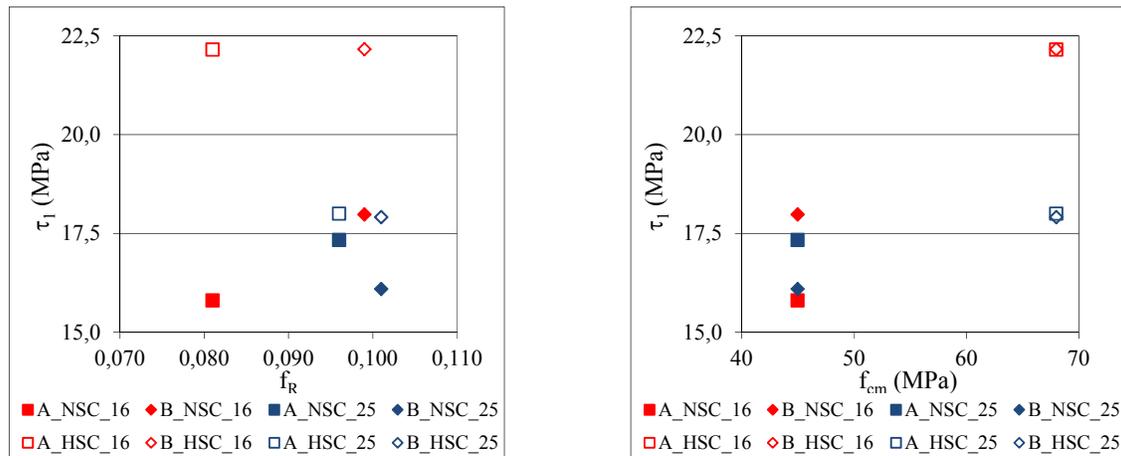


Figura 8. Influência da área relativa nas nervuras transversais (f_R) e da resistência do betão à compressão (f_{cm}) na tensão máxima de aderência (τ_1).

3.1.4 Efeito da entrada em cedência da armadura

A entrada em cedência mereceu especial atenção neste estudo, uma vez que é um dos aspetos que necessita de atenção particular, dado que os diversos trabalhos experimentais realizados até à data avaliam este fenómeno apenas em provetes com elevado comprimento aderente ($50 \times d$). Em 1998 *Mayer e Eligehausen* [10] abordaram também esta questão salientando que o desempenho dos elementos de betão armado após da entrada em cedência da armadura é significativamente influenciado pela ductilidade do aço e pela percentagem de armadura. Para se perceber a evolução das

tensões de aderência, apresentam-se apenas os resultados individuais obtidos nos provetes dos lotes B e BT de 16mm em que foi possível atingir a cedência da armadura, embora existam também resultados semelhantes para os provetes de 25mm [11].

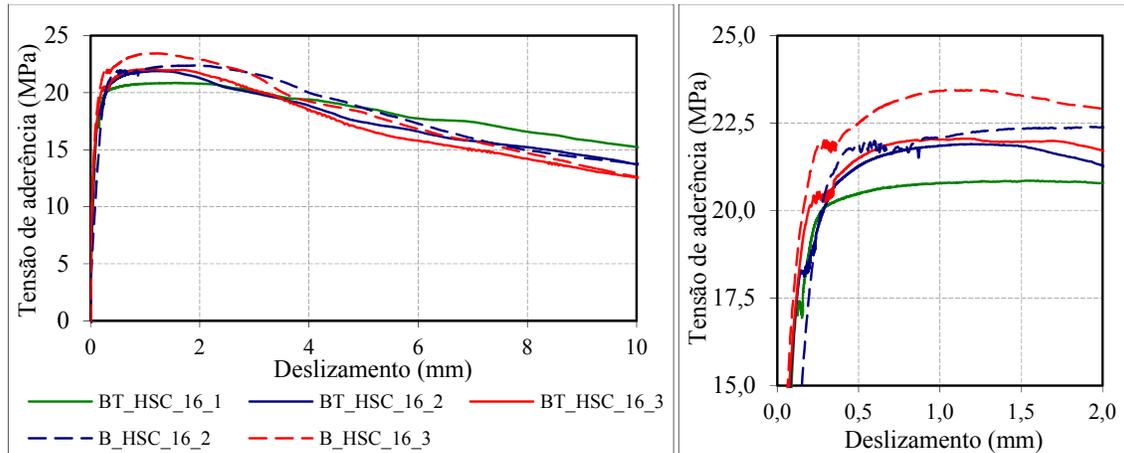


Figura 9. Ensaios monotônicos: resultados obtidos nos provetes de 16mm com entrada em cedência da armadura.

Dado que a cedência da armadura está também patente nos ensaios dos provetes B_HSC_16, em virtude da maior área relativa das nervuras transversais e da maior resistência do betão, constata-se que o efeito do tratamento térmico realmente só se reflete na entrada em cedência da armadura para tensões de aderência inferiores e antes da rotura por arrancamento, uma vez que o comportamento pós-cedência não é em nada modificado. Tipicamente, após a entrada em cedência da armadura, observa-se um aumento considerável da deformação do provete ensaiado, perceptível pelo aumento do deslocamento medido pelo equipamento de ensaio, sem reflexos no deslizamento medido na extremidade não solicitada do varão e seguidamente continua a haver um acréscimo da tensão de aderência com um aumento do patamar onde a tensão de aderência permanece aproximadamente constante.

3.2 Ensaios cíclicos

Para avaliar o desempenho dos provetes com diferentes níveis de área relativa das nervuras transversais, realizaram-se diversos tipos de ensaios cíclicos, um dos quais impondo 10 ciclos com níveis de deslizamento alternados, inferiores ao deslizamento médio obtido para a tensão de aderência máxima, para cada conjunto de provetes de arrancamento com as mesmas características, obtendo-se registos conforme se apresenta na figura seguinte.

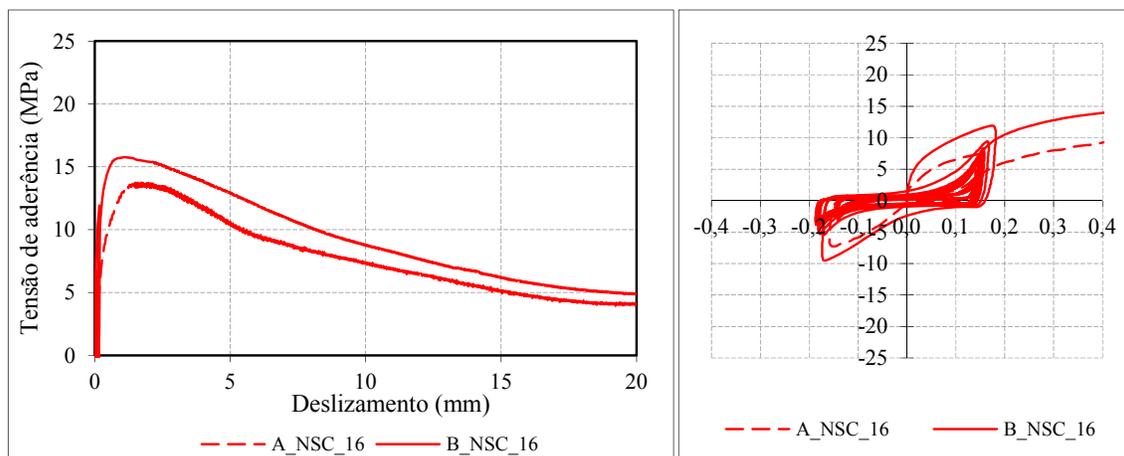


Figura 10. Ensaios cíclicos: resultados médios obtidos nos provetes de 16mm dos lotes A e B em NSC.

Neste tipo de ensaios, os estudos realizados [12] [13] admitem que é expectável uma redução da tensão máxima de aderência que pode ir aos 20%. Porém, importa caracterizar a influência de cada uma das variáveis, tal como se fez para os ensaios monotónicos. Assim, apresentam-se na figura e quadros seguintes os resultados médios obtidos para os ensaios cíclicos realizados (símbolo cheio - ♦) bem como os resultados médios dos ensaios monotónicos (símbolo vazio - ◇).

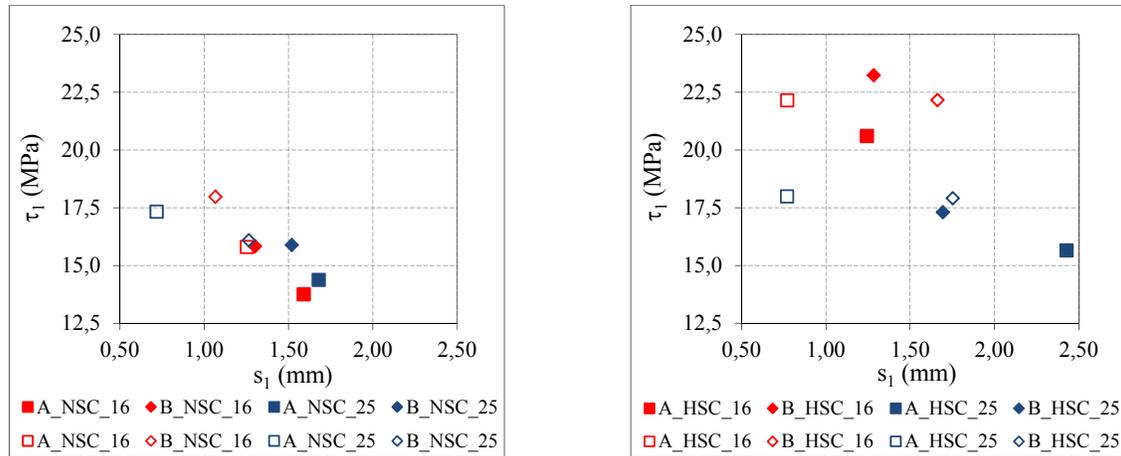


Figura 11. Comparação entre os resultados obtidos nos ensaios monotónicos e cíclicos envolvendo varões de 16 e 25mm, nos dois tipos de betão previstos e nos lotes A e B.

Quadro 4. Resultados obtidos nos ensaios monotónicos e cíclicos em betão de resistência normal.

Tipo de Ensaio	d (mm)	A		B	
		τ_1 (MPa)	s_1 (mm)	τ_1 (MPa)	s_1 (mm)
Monotónico	16	15.80	1.254	17.98	1.067
Cíclico		13.75	1.590	15.83	1.300
Monotónico	25	17.33	0.720	16.09	1.260
Cíclico		14.37	1.680	15.89	1.520

Quadro 5. Resultados obtidos nos ensaios monotónicos e cíclicos em betão de maior resistência.

Tipo de Ensaio	d (mm)	A		B	
		τ_1 (MPa)	s_1 (mm)	τ_1 (MPa)	s_1 (mm)
Monotónico	16	22.15	0.772	22.16	1.662
Cíclico		20.60	1.244	23.23	1.284
Monotónico	25	18.00	0.770	17.91	1.750
Cíclico		15.73	2.428	17.41	1.695

3.2.1 Efeito do diâmetro

Sob o ponto de vista do diâmetro da armadura ensaiada, a redução da tensão de aderência associada à ação cíclica (17%) é ligeiramente superior aos restantes ensaios nos varões de 25mm do lote A em ambos os betões, com um aumento considerável do deslizamento associado à tensão máxima de aderência.

3.2.2 Efeito da maior área relativa das nervuras transversais

Tal como seria de suspeitar em face dos estudos já realizados para a influência da área relativa das nervuras transversais [14], o seu aumento traduz-se numa redução muito menos significativa da tensão máxima de aderência nos varões de 25mm de diâmetro, em ambos os betões. No caso dos varões de 16mm, a redução da tensão máxima de aderência devida à imposição da ação cíclica alternada é da mesma ordem de grandeza para ambos os lotes A e B (13%), sendo de salientar que o acréscimo da tensão máxima de aderência entre os lotes é da ordem dos 15%, com uma redução do deslizamento que ronda os 18%.

3.2.3 Efeito do betão

Tal como para os ensaios monotónicos, nos varões de maior diâmetro, o aumento da resistência betão traduz-se num aumento muito ligeiro da tensão máxima de aderência e num agravamento considerável do respetivo deslizamento. Relativamente aos varões de 16mm, o aumento da resistência do betão é

uma mais-valia uma vez que permite aumentar a tensão máxima de aderência em cerca de 50% e reduzir em 20% o deslizamento correspondente.

Nos varões de 16mm do lote B com betão de maior resistência, à semelhança do que sucedeu para os ensaios em regime monotónico, foi possível atingir a cedência da armadura, pelo que os resultados apresentados têm que ser analisados sob este ponto de vista. Ou seja, neste caso em particular, a tensão máxima de aderência e respetivo deslizamento estão dependentes das características mecânicas da armadura, uma vez que se atingiu a cedência da armadura antes da rotura por arrancamento, que só ocorre após aumento considerável da deformação do provete. Assim, não é possível comparar os resultados obtidos entre os lotes A e B no betão de maior resistência.

3.2.4 Efeito da entrada em cedência da armadura

Para avaliar o efeito conjugado da variável cedência da armadura em conjunto com a imposição de ações cíclicas e alternadas realizaram-se, para provetes do mesmo tipo, ensaios em que o deslizamento imposto não permitiu atingir a cedência da armadura e também ensaios com deslizamento imposto superior ao deslizamento que é necessário para a entrada em cedência da armadura.

Para além de haver, como nos ensaios monotónicos, um aumento do patamar onde a tensão de aderência permanece aproximadamente constante e com valores da ordem da tensão máxima, os registos gráficos dos ensaios realizados até à data deixam antever a necessidade de um modelo analítico que simule o comportamento nestas circunstâncias ter de contemplar a deformação que o provete sofre a partir do momento em que entra em regime plástico.

Assim, quando é possível mobilizar tensões de aderência superiores à tensão de cedência da armadura, o aumento da deformação do provete deixa de poder ser negligenciado, em especial se houver inversão do sentido da ação (passagem de tração a compressão) pois ao haver um aumento do comprimento do provete e, dependendo do diâmetro da armadura, pode ocorrer um fenómeno de encurvadura local.

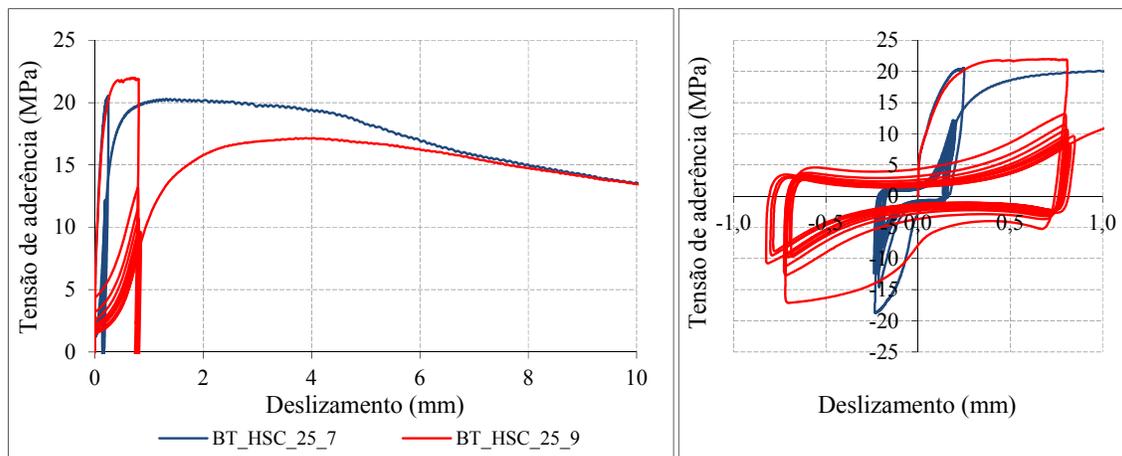


Figura 12. Comparação entre os resultados obtidos nos ensaios cíclicos com e sem cedência de armadura.

Dado que o modelo proposto por *Eligehausen et al* [6] continua a ser o mais adequado para quantificar a degradação da aderência em função de ações cíclicas, considera-se que este deve ser adaptado de forma a incorporar adequadamente a degradação da tensão de aderência associada à entrada em cedência da armadura, uma vez que experimentalmente se verifica que logo após o primeiro ciclo, existe uma diferença muito significativa na rigidez do ramo de recarga.

4. CONCLUSÕES

Os ensaios realizados sobretudo nos varões de 16mm de diâmetro pretendem clarificar a influência na relação tensão de aderência-deslizamento que efetivamente existe devido ao aumento da área relativa das nervuras transversais.

Apesar de ao aumento da área relativa das nervuras transversais estar associado um aumento da fendilhação se não for prevista a utilização de armadura de confinamento suficiente, os resultados alcançados, tanto nos ensaios monotónicos como nos ensaios cíclicos realizados nos varões de 16mm de diâmetro, apontam para a possibilidade de utilização das armaduras com maior área relativa das nervuras transversais em estruturas ou elementos estruturais nos quais se pretende um melhor desempenho. Salienta-se que os varões do lote B apresentam em média e após o ensaio cíclico a mesma tensão máxima de aderência e deslizamento da mesma ordem de grandeza que os varões do lote A em regime monotónico.

Este benefício parece ser também aplicável quando a armadura atinge a cedência e no betão de maior resistência. No entanto, está prevista a realização de ensaios adicionais para fundamentar melhor este aspeto.

4.1 Perspetivas futuras

O programa experimental final inclui ainda alguns ensaios cíclicos adicionais, para esclarecer a influência da direção de carregamento tração (tração ou compressão), especialmente nos provetes com maior área relativa das nervuras e nos provetes em que ocorre a cedência da armadura.

Este estudo também inclui a exploração analítica dos resultados obtidos, para melhor compreensão do comportamento local da aderência quando a armadura entra em cedência e em simultâneo é sujeita a ações repetidas e alternadas, a fim de contribuir para uma utilização mais racional das armaduras disponíveis, melhorando o desempenho de elementos de betão armado em zonas sísmicas.

Finalmente prevê-se ainda a utilização dos resultados já obtidos neste estudo, para avaliar a adequação dos novos fatores de redução da tensão de aderência previstos pelo MC 2010, para o caso de ações cíclicas e da entrada em cedência da armadura.

AGRADECIMENTOS

A primeira autora agradece à *Fundação para a Ciência e Tecnologia* o apoio financeiro através da bolsa individual de doutoramento concedida com a referência SFRH/BD/68957/2010. Agradece-se também o apoio das empresas Açomonta, Sotecnisol e Ibermetais, bem como do fornecedor das armaduras.

REFERÊNCIAS

- [1] Limkatanyu, S.; Spacone, E. (2003). Effects of Reinforcement Slippages on Nonlinear Responses of RC Frame Structures under Cyclic Loadings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32 (15): 2407-2424.
- [2] Cairns, J.; Plizzari, G.A. (2003). Towards a harmonised European bond test. *Materials and Structures*, Volume 36: 498-506.
- [3] Santos, J.; Henriques, A. A.; (2010). Evolução da Resistência e Ductilidade dos Varões de Aço de Ductilidade Especial em Profundidade; BE2010 – Encontro Nacional de Betão Estrutural; pp. 111-113 (Ed. CD-ROM: 10 pag.).
- [4] NP EN 12390-2. 2009, Ensaios do betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica. IPQ.
- [5] EN ISO 15630-1. 2010, Steel for the reinforcement and prestressing of concrete. Test methods. Part 1: Reinforcing bars, wire rod and wire.

- [6] Eligehausen, R., Popov, E.P., Bertero, V.V. 1983. 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.
- [7] NP EN 1992-1-1. 2010, Eurocódigo 2 - Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios.
- [8] Lowes, L.N. (1999). "Finite element modeling of reinforced concrete beam-column bridge connections", PhD Thesis, University of California, Berkeley.
- [9] Bamonte, P.F. and P.G. Gambarova (2007). High-Bond Bars in NSC and HPC: Study on Size Effect and on the Local Bond Stress-Slip Law, *Journal of Structural Engineering* 133(2): 225-234.
- [10] Mayer, U.; Eligehausen, R. (1998). Bond behaviour of ribbed bars at inelastic steel strains; 2nd Ph.D. International Symposium in Civil Engineering; Budapest.
- [11] Louro, Ana S.; Pipa, Manuel (2012). Bond characterization of ribbed bars subjected to repeated and reversed actions; *Bond in Concrete 2012: Bond, Anchorage, Detailing* (4th International Symposium); pp. 169-175; Brescia, Italy.
- [12] CEB Task Group Bond Models. (2000). State-of-art report: Bond of Reinforcement in Concrete. *fib Bulletin* 10, 434 p.
- [13] ACI Committee 408 (1992). Report on Bond Under Cyclic Loads (Reapproved 2005).
- [14] Darwin, D., Zuo, J. Tholen, M., and Idun, E. 1996. Development length criteria for conventional and high relative rib area reinforcing bars. *ACI Structural Journal*, 93-3: 347-359.