

Aderência de varões de aço para betão armado utilizados em Portugal. Avaliação estatística de um novo parâmetro que caracteriza o perfil nervurado

Bond of steel bars to reinforced concrete used in Portugal. Statistical evaluation of a new parameter which characterizes the ribbed profile

Ana Sofia Louro

João Filipe

Resumo

Diversos fabricantes têm vindo a implementar alterações na superfície dos varões de aço para betão armado que impactam com a aderência varão-betão. As versões recentes dos projetos de norma destes produtos introduziram um novo parâmetro de controlo da geometria da superfície nervurada dos varões, paralelamente ao controlo da área relativa das nervuras transversais (f_R), que consiste na relação entre a largura da crista das nervuras transversais a meio do seu comprimento (b_R) e o afastamento das nervuras transversais (c).

Este artigo apresenta os resultados de um estudo estatístico sobre os valores de $b_{R/c}$ obtidos pelo LNEC nos últimos anos centrando-se no tipo de perfil nervurado. Para além de permitir caracterizar a relação $b_{R/c}$ em função de outros parâmetros como, por exemplo, o diâmetro nominal ou o tipo de produção dos varões, este estudo permitirá futuramente estabelecer critérios de aceitação aplicáveis à avaliação deste parâmetro, no âmbito da certificação de varões com novos tipos de perfil nervurado.

Abstract

Several manufacturers have implemented changes on the steel rebars surface that impact on the bond between rebar and concrete. Recent draft versions of these products standards have introduced a new parameter to control the ribbed surface geometry of the rebars, alongside the control of the relative area of the transverse ribs (f_R), which consists on the ratio between the ribs top width at the middle of their length (b_R) and the distance between the transverse ribs (c).

This paper presents the results of a statistical study of the $b_{R/c}$ values obtained by LNEC in recent years, focusing on the type of ribbed profile. As well as making possible to characterize the $b_{R/c}$ ratio, as a function of other parameters such as the nominal diameter or the type of production of the rebars, in future this study will allow to establish acceptance criteria applicable to the assessment of this parameter, within the scope of the certification of rebars with new ribbed profile types.

Palavras-chave: Aderência / Varões de aço / Perfil nervurado / Largura da crista das nervuras transversais / Eurocódigo 2

Keywords: Steel rebars / Ribbed profile / Ribs top width / Eurocode 2

Ana Sofia Louro

Investigadora Auxiliar
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
 0000-0002-3094-5967
analouro@lnec.pt

João Filipe

Doutorando, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
 0009-0009-9531-1381
jfilipe@lnec.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.

LOURO, A. [et al.] – Aderência de varões de aço para betão armado utilizados em Portugal. Avaliação estatística de um novo parâmetro que caracteriza o perfil nervurado **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 27. ISSN 2183-8488. (março 2025) 21-36.
<https://doi.org/10.34638/rpee-slIII-n27-002>

1 Introdução

A aderência dos varões de aço ao betão é garantida essencialmente pelas nervuras transversais existentes no perfil nervurado, pelo que importa caracterizar adequadamente a geometria do perfil nervurado dos varões, em especial quando os fabricantes implementam alterações na superfície do perfil nervurado.

As versões mais recentes dos projetos de normas europeias e internacionais destes produtos têm vindo a introduzir um novo parâmetro de controlo da geometria dos varões, paralelamente ao controlo da área relativa das nervuras transversais (f_R). Este parâmetro consiste na relação entre a largura da crista das nervuras transversais a meio do seu comprimento (b_R) e o afastamento das nervuras transversais (c).

Em Portugal, a aplicação de produtos de aço em construções de betão armado depende da sua prévia Classificação pelo LNEC e da sua Certificação por um organismo acreditado no âmbito do Sistema Português da Qualidade, sendo o LNEC responsável pelo apoio técnico ao controlo periódico do fabrico destes produtos, que envolve a avaliação de vários parâmetros geométricos que caracterizam o perfil nervurado. Embora a relação $b_{R/c}$ ainda não seja verificada no controlo periódico dos varões, o LNEC tem vindo a incluir a determinação desta propriedade nos ensaios de caracterização do perfil geométrico dos varões utilizados em Portugal.

A crescente utilização de novos perfis nervurados (Figura 1a), em alternativa aos indicados nas Especificações LNEC [1] aplicáveis, justifica também a necessidade de se conhecer a influência destes novos perfis nas características de aderência dos varões, especialmente porque as disposições de projeto, nomeadamente ao nível do Eurocódigo 2 [2], se baseiam em resultados de ensaios realizados com varões com perfis nervurados tradicionais (Figura 1b).



Exemplo de perfil nervurado especial (a)



Exemplo de perfil nervurado normal (b)

Figura 1 Perfis nervurados de varões de aço do tipo A500 NR SD

Assim, o presente artigo, para além de abordar uma temática, que naturalmente carecerá de reflexão aquando da elaboração do Anexo Nacional da segunda geração do Eurocódigo 2 [3], apresenta os resultados de um estudo estatístico sobre os valores de $b_{R/c}$, obtidos pelo LNEC ao longo dos últimos anos centrando-se no tipo de perfil nervurado dos varões. Para além de permitir caracterizar este parâmetro (tipo de perfil), em função de outros parâmetros como, por exemplo, o diâmetro nominal ou o tipo de produção dos varões, este estudo permitirá futuramente estabelecer critérios de aceitação aplicáveis à avaliação desta grandeza, no âmbito da certificação destes varões de aço.

2 A relevância da relação $b_{R/c}$ na capacidade de amarração dos varões

O fenómeno de mobilização da aderência é particularmente relevante para avaliar o comportamento de zonas de ancoragem e de emendas, sabendo-se que podem existir um dos seguintes modos de rotura da ligação entre o varão e o betão:

- Rotura por arrancamento do varão (*pull-out*), sem ou com pouco fendimento do betão (*splitting*), sem fendas visíveis de *splitting*, quando existe um forte confinamento e/ou recobrimento elevado, originando rotura por corte do betão entre nervuras transversais (Figura 2a);
- Rotura por *pull-out* induzida por *splitting* ou parte, com fendas visíveis de *splitting*, nos casos em que o confinamento é moderado e/ou o recobrimento limitado, ocorrendo a rotura por corte do betão entre nervuras transversais acompanhada de escorregamentos nas faces das nervuras transversais (Figura 2b);
- Rotura por *splitting* induzida por perda do recobrimento, quando não há confinamento e/ou o recobrimento é reduzido, conduzindo ao escorregamento nas faces das nervuras transversais (Figura 2c).

Portanto, para um mesmo nível de confinamento, a força máxima que pode ser transferida por aderência de um varão para o betão também diminui à medida que a área das nervuras se reduz, sendo esta a justificação para as normas de produto, desde há muitos anos, especificarem um limite inferior para a área relativa das nervuras

transversais (f_R), que representa a razão entre a área total das nervuras acima do núcleo do varão de aço e a área (nominal) do varão.

Pese embora não exista um modelo matemático consensual que relacione a área relativa das nervuras transversais com a aderência varão-betão, existem evidências experimentais que demonstram esta ligação. O aumento da aderência não é proporcional ao aumento de f_R , sendo que, tipicamente, um aumento de f_R de 0,060 para 0,120 resulta num incremento da aderência de cerca de 20% para 25% [5].

Quando o nível de confinamento é o suficiente para evitar a rotura por *splitting* (Figura 3a) pode, em alternativa, ocorrer a rotura por arrancamento (se o varão não entrar em cedência), em que o betão é cortado ao longo de uma circunferência sobre os topos/cristas das nervuras transversais e o varão é extraído do betão, deixando um orifício relativamente liso (Figura 3b). O atrito mobilizado na interface betão/betão na superfície de corte é superior ao atrito ao longo da interface betão/varão sobre os topos das nervuras transversais, sendo razoável assumir que a aderência depende principalmente da resistência ao corte do betão entre as nervuras. Pode-se, portanto, esperar que neste modo de rotura a aderência diminua à medida que aumenta a razão entre a largura das nervuras transversais (b_R) (medida paralelamente ao eixo do varão) e o afastamento longitudinal das nervuras transversais (c).

Um parâmetro alternativo e provavelmente mais preciso do que a relação $b_{R/c}$ é a área relativa de corte f_s , que inclui o efeito do espaço entre os conjuntos de nervuras. A área relativa de corte f_s

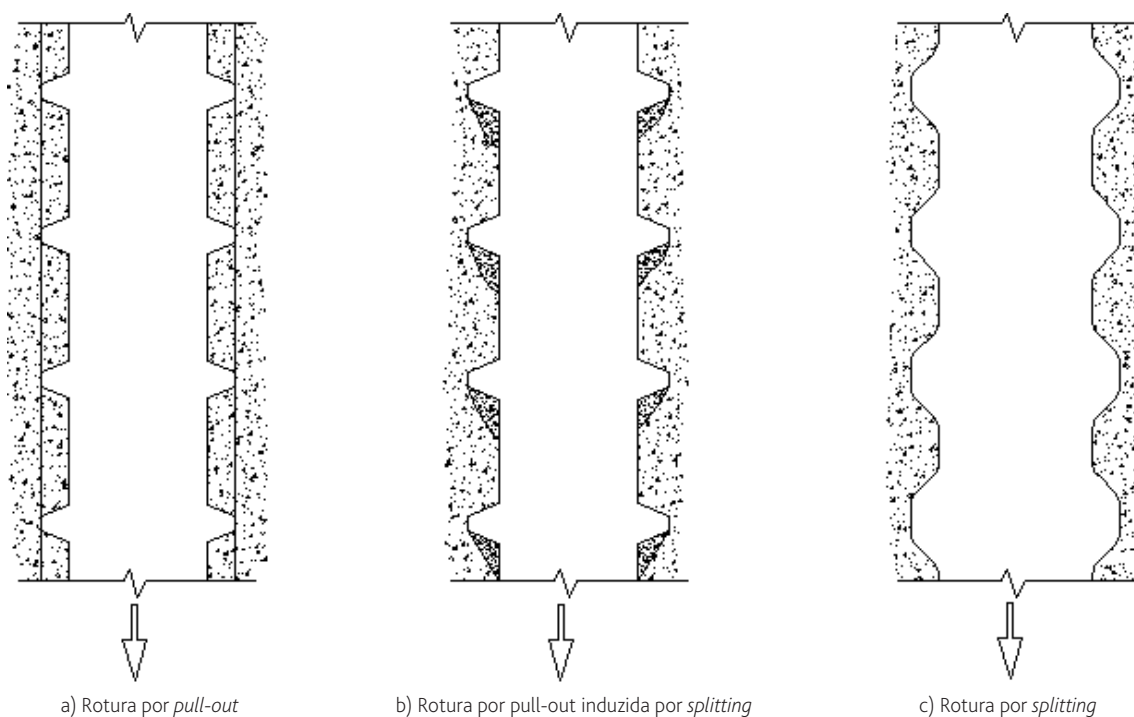


Figura 2 Diferentes modos de rotura da relação tensão de aderência - deslizamento propostos no *Bulletin 10 da fib* (adaptado de [4])

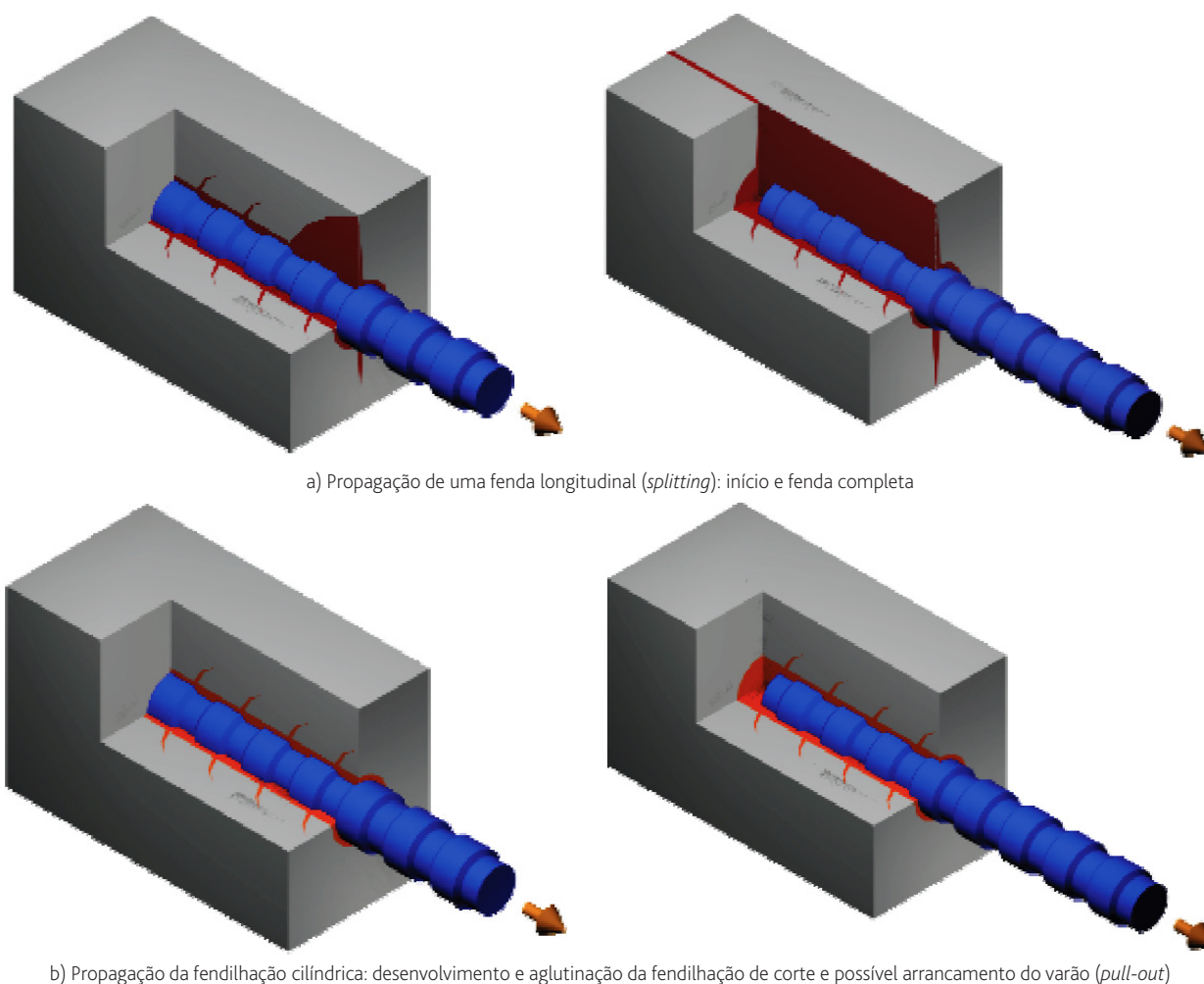


Figura 3 Rotura por *splitting* (a) e por *pull-out* (b) (adaptado de [6])

corresponde à área da interface de corte betão/betão como uma proporção da área de superfície nominal do varão, que diminui à medida que a relação $b_{R/C}$ aumenta.

Contudo, durante muitos anos a relação $b_{R/C}$ não se encontrava prevista nas normas aplicáveis, como uma das características fundamentais para controlo das propriedades geométricas das nervuras dos varões. A título de exemplo, a versão de 2005 da EN 10080 [7] permite que os fabricantes façam variar a largura e o afastamento das nervuras transversais em função do diâmetro nos varões. Portanto, no limite, um varão em que as nervuras transversais possuam uma dimensão mínima em termos de altura (no caso de um varão nervurado) ou em termos de largura da indentagem (no caso de varões indentados) e que se encontrem afastadas ao máximo entre si, possivelmente a sua aderência estará muito próxima da aderência de um varão liso, pois o comprimento da superfície de corte betão/betão é insuficiente para que se formem as cunhas de betão sob a superfície de apoio das nervuras transversais.

As últimas versões da EN 10080 introduziram a relação $b_{R/C}$. Em

particular, a versão que esteve em inquérito em 2023 [8] considera que quando as características de aderência dos varões são definidas em função da geometria da superfície nervurada do varão, deve ser declarado o valor máximo de $b_{R/C}$.

Na última década, na tentativa de reduzir consumos de energia, a produção de varões com perfis nervurados não-convencionais tem vindo a aumentar. Pese embora já tenham sido aplicados, na Europa, varões em que a relação $b_{R/C}$ é elevada (por exemplo, superior a 0,4), estes varões têm sido produzidos principalmente em diâmetros baixos, os quais têm maior capacidade de amarração ao betão do que varões de maior diâmetro, em situações equivalentes e nas quais basta uma espessura de recobrimento reduzida para que o modo de rotura da ligação varão/betão passe de *splitting* para *pull-out* (ver Figura 2).

Todavia, nos últimos anos, para além da produção de varões com perfil nervurado não convencional ser crescente, a gama de diâmetros da produção destes varões também tem vindo a aumentar. Contrariamente ao *Model Code 2010* [9], o Eurocódigo 2

publicado em 2004 [2] considera que o efeito do diâmetro dos varões na ligação varão/betão apenas deve ser considerado no caso de varões com diâmetros superiores a 32 mm. Acresce que as regras de cálculo dos comprimentos de amarração e emendas da segunda geração do Eurocódigo 2 [3] se baseiam nos estudos do *Bulletin 72* [11] da *fib*, os quais foram desenvolvidos com varões convencionais (ver Figura 1) e varões indentados. Para ter em conta este aspeto, o *Model Code 2020* [10] refere que as expressões de cálculo propostas para a ligação varão/betão foram desenvolvidas para varões cujo perfil nervurado apresenta uma relação $b_{R/C}$ inferior a 0,30.

Esta temática tem sido amplamente discutida no seio do *Task Group 2.5 – Bond and material models* da *fib – Fédération internationale du béton* e mais recentemente também na Subcomissão 2 do TC 250 – *Structural Eurocodes* responsável pelo desenvolvimento do Eurocódigo 2, especialmente porque a segunda geração do Eurocódigo 2 [3] vem permitir alargar a redução do comprimento de amarração dos varões, em função do confinamento associado ao recobrimento dos varões, contando com a contribuição de outros fatores que ajudam o efeito de confinamento, como sejam as armaduras transversais e a compressão transversal. A comunidade científica considera que estas novas regras podem, eventualmente, ser menos seguras no caso de varões com valores mais elevados da relação $b_{R/C}$.

Como tal, importa caracterizar adequadamente o perfil nervurado dos varões existentes no mercado, com superfície nervurada tradicional ou alternativa (ver Figura 1), tendo em vista a futura definição de limites aplicáveis a este novo parâmetro ($b_{R/C}$).

3 Apresentação de resultados

3.1 Considerações iniciais

Para o presente estudo foram considerados resultados de $b_{R/C}$ obtidos através de 3105 ensaios de determinação das características geométricas das nervuras realizados pelo LNEC, entre 2013 e 2022, sobre varões de aço do tipo A500 NR SD [1], no âmbito das sucessivas ações de certificação destes varões de aço.

Segundo a Especificação LNEC E 460 [1], os varões de aço do tipo

A500 NR SD devem apresentar um perfil nervurado da sua superfície com duas nervuras longitudinais contínuas, diametralmente opostas entre si, bem como duas séries opostas de nervuras transversais de secção variável, oblíquas em relação ao eixo longitudinal dos varões e simétricas em relação a um plano longitudinal que inclui os eixos das duas nervuras longitudinais. Em ambas as séries opostas de nervuras transversais, cada uma das nervuras tem uma inclinação, em relação ao eixo do varão, diferente da inclinação das duas nervuras que lhe são adjacentes e igual à inclinação da nervura que precede ou que se segue a cada uma das referidas nervuras adjacentes. O espaçamento entre os centros de nervuras transversais adjacentes é sempre o mesmo e igual nas duas séries (Figura 4). No âmbito deste estudo, estes varões de aço serão adiante designados por “normais”.

Na Figura 5 é apresentado o perfil nervurado dos varões de aço do tipo A500 NR SD com perfil alternativo ao estipulado na Especificação LNEC E 460 [1] que, também foram considerados para este estudo (adiante designados por “especiais”). A grande diferença em relação aos varões de aço com perfil nervurado tradicional (ver Figura 4), é que estes varões apresentam um perfil com quatro séries de nervuras transversais que formam dois conjuntos opostos de nervuras transversais, de altura aproximadamente constante, simétricas em relação ao plano longitudinal que inclui as duas nervuras longitudinais que intersectam as suas extremidades (ver Figura 1). Portanto, em termos de disposição das nervuras, a principal diferença entre os varões com perfil normal e especial é a existência de quatro nervuras longitudinais nos varões especiais, em oposição às duas longitudinais existentes nos varões normais.

Para os dois tipos de varões com diferentes perfis nervurados (normais e especiais), a largura da crista das nervuras transversais a meio do seu comprimento (b_R) deve ser medida segundo o eixo longitudinal do varão, de acordo com a Figura 4. Porém, nos ensaios de determinação das características geométricas das nervuras considerados neste estudo, foram determinados os valores da largura da crista das nervuras transversais a meio do seu comprimento, segundo a direção transversal ao eixo longitudinal das nervuras (b). Desse modo, existiu a necessidade de se calcular os valores de b_R tendo em conta os resultados das diferentes inclinações das nervuras transversais (β_1 e β_2) obtidos experimentalmente para os mesmos varões.

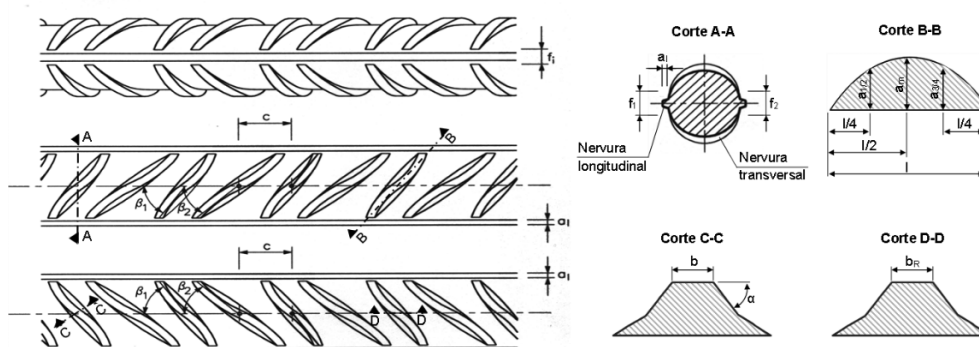


Figura 4 Disposição das nervuras transversais e longitudinais num varão de aço do tipo A500 NR SD, com perfil nervurado normal

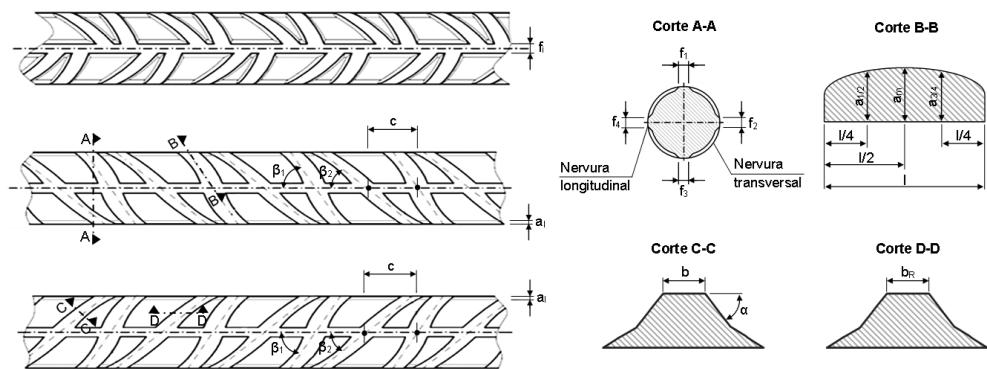


Figura 5 Disposição das nervuras transversais e longitudinais num varão de aço do tipo A500 NR SD, com perfil nervurado especial

No presente estudo, foram consideradas diversas análises dos resultados de $b_{R/c}$, nomeadamente quanto à influência do diâmetro nominal da secção transversal do varão, do tipo de produção (comprimento reto ou rolo) e do tipo de perfil nervurado, nos valores obtidos desta propriedade geométrica ($b_{R/c}$), cujos resultados se apresentam nas secções seguintes. Para além disso, foram ainda estabelecidas algumas relações entre os resultados de $b_{R/c}$ com outros parâmetros geométricos que caracterizam a superfície nervurada dos varões, como a área relativa das nervuras transversais (f_R) e com resultados de ensaios de caracterização de aderência (*pull-out tests*) realizados sobre os mesmos varões.

3.2 Análise dos resultados de $b_{R/c}$ por diâmetro da secção transversal dos varões

Na presente secção apresentam-se os resultados da análise estatística dos valores de $b_{R/c}$ em função do valor nominal do diâmetro da secção transversal dos varões. Os resultados gerais desta análise estatística são apresentados entre a Figura 6 e a Figura 13. O Quadro 1 apresenta uma síntese dos principais parâmetros estatísticos das distribuições apresentadas nestas figuras, respetivamente: i) o número de resultados (n), ii) o valor médio ($\bar{x}$), iii) o desvio-padrão (σ) e iv) o coeficiente de variação (ρ).

Os histogramas até à Figura 13 apresentam, separadamente, as distribuições estatísticas de resultados de $b_{R/c}$, considerando as diferentes inclinações das nervuras transversais β_1 e β_2 , para o conjunto de varões de todos os diâmetros ensaiados (6 mm a 32 mm) e para varões com diâmetros de 8 mm, 10 mm, 12 mm, 16 mm, 20 mm, 25 mm e 32 mm, independentemente do tipo de produção e de perfil nervurado.

Apesar de os resultados obtidos para varões com diâmetros de 6 mm e 14 mm terem sido considerados neste estudo, no presente artigo não são apresentados os histogramas referentes aos resultados obtidos para esses varões, devido às reduzidas dimensões das populações ensaiadas (apenas 10 e 60 resultados, respetivamente).

A análise dos resultados obtidos mostra que os valores médios de $b_{R/c}$ se situam entre 0,17 e 0,22, no caso de se considerar β_1 , e entre 0,20 e 0,26, no caso de se considerar β_2 . Os maiores valores médios de $b_{R/c}$ (iguais a 0,22) foram obtidos para os varões com diâmetros

de 8 mm e 16 mm de diâmetro, enquanto que o valor médio de $b_{R/c}$ mais baixo (igual a 0,17) foi obtido para os varões com 32 mm de diâmetro.

Quadro 1 Resumo dos resultados de $b_{R/c}$ obtidos por diâmetro do varão

Diâmetro [mm]	Considerando β_1				Considerando β_2			
	n	$\bar{x}$	σ	ρ [%]	n	$\bar{x}$	σ	ρ [%]
6	10	0,20	0,029	15%	10	0,23	0,036	18%
8	397	0,22	0,041	18%	397	0,26	0,046	19%
10	669	0,21	0,035	14%	669	0,25	0,040	16%
12	595	0,21	0,044	19%	595	0,24	0,050	21%
14	60	0,20	0,038	20%	60	0,23	0,045	21%
16	574	0,22	0,059	27%	574	0,26	0,068	27%
20	355	0,18	0,021	11%	355	0,21	0,023	10%
25	280	0,18	0,032	17%	280	0,20	0,037	20%
32	165	0,17	0,022	12%	165	0,20	0,027	15%
Todos	3105	0,20	0,045	25%	3105	0,24	0,052	21%

Em geral, verifica-se que os valores médios de $b_{R/c}$ diminuem com o aumento do diâmetro do varão, com exceção dos resultados obtidos para os varões com 6 mm de diâmetro, em que o número de ensaios é muito reduzido, e para os varões com 16 mm de diâmetro, em que a dispersão de resultados é bastante elevada em comparação com os restantes diâmetros de varões, com um coeficiente de variação igual a 27% no caso de considerar β_1 ou β_2 .

A variação dos valores das inclinações das nervuras transversais, no caso de se considerar β_1 ou β_2 , tem uma influência relativa na variação dos valores médios de $b_{R/c}$ que situa entre os 14% a 19%, para os resultados obtidos para os diferentes diâmetros de varões ensaiados. Este facto mostra que a variação da inclinação das nervuras dos varões de aço do tipo A500 NR SD tem uma influência importante na determinação dos valores de $b_{R/c}$.

Os valores do desvio-padrão de $b_{R/c}$ obtidos para as diferentes distribuições de resultados situam-se entre 0,021 e 0,059,

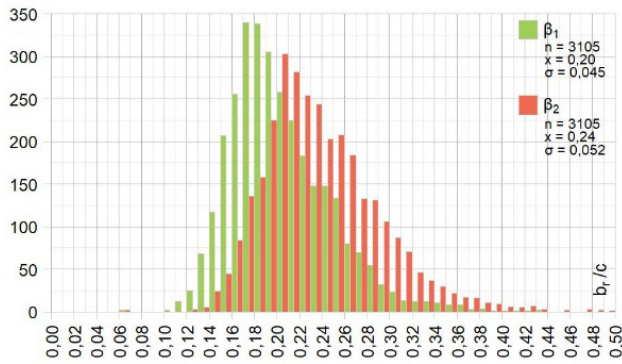


Figura 6 Resultados de $b_{R/c}$ obtidos para varões do tipo A500 NR SD de todos os diâmetros

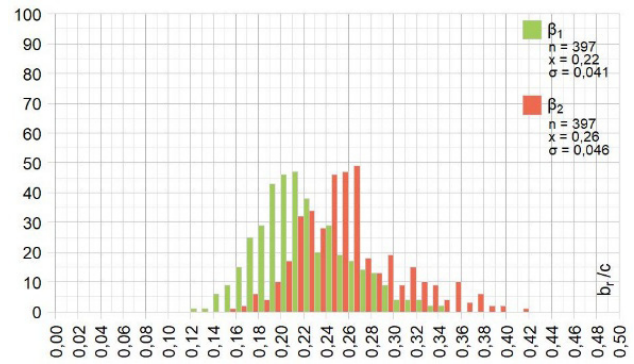


Figura 7 Resultados de $b_{R/c}$ obtidos para varões do tipo A500 NR SD com 8 mm de diâmetro

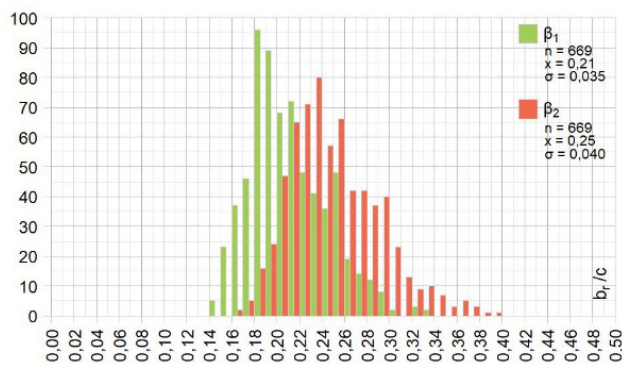


Figura 8 Resultados de $b_{R/c}$ obtidos para varões do tipo A500 NR SD com 10 mm de diâmetro

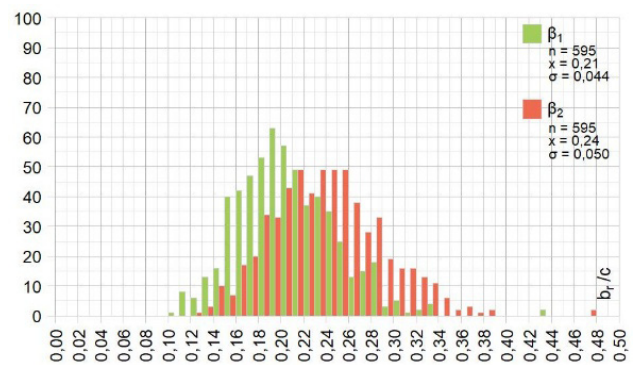


Figura 9 Resultados de $b_{R/c}$ obtidos para varões do tipo A500 NR SD com 12 mm de diâmetro.

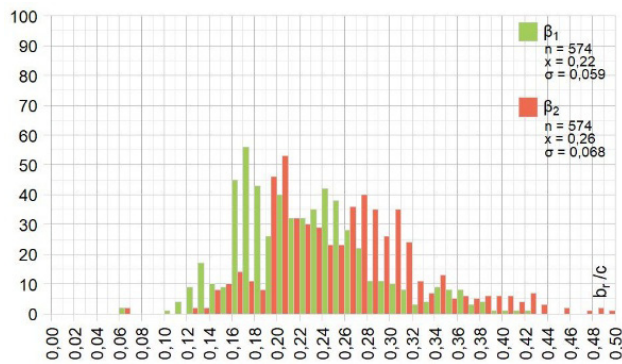


Figura 10 Resultados de $b_{R/c}$ obtidos para varões do tipo A500 NR SD com 16 mm de diâmetro

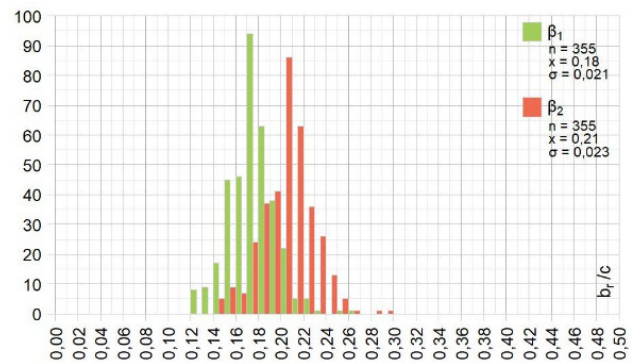


Figura 11 Resultados de $b_{R/c}$ obtidos para varões do tipo A500 NR SD com 20 mm de diâmetro.

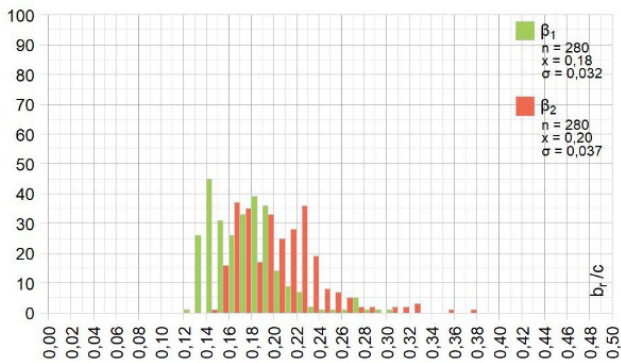


Figura 12 Resultados de $b_{R/c}$ obtidos para varões do tipo A500 NR SD com 25 mm de diâmetro

considerando β_1 , e entre 0,023 e 0,068, considerando β_2 . Por sua vez, os valores dos coeficientes de variação de $b_{R/c}$ situam-se entre 11% e 27%, no caso de se considerar β_1 , e entre 10% e 27%, no caso de se considerar β_2 .

De facto, através da comparação dos diferentes histogramas, apresentados entre a Figura 6 e a Figura 13, é possível verificar que a dispersão de resultados de $b_{R/c}$ é significativa. Em geral, para além de não se verificar uma grande concentração de resultados próximos do respetivo valor médio, alguns histogramas aparentam resultar da sobreposição de diferentes distribuições de resultados, como é o caso dos resultados obtidos para os varões com diâmetros de 10 mm (Figura 8), 16 mm (Figura 10) e 25 mm (Figura 12). Esta ocorrência pode estar associada à influência relativa de diversos parâmetros, como a variação dimensional das propriedades geométricas das nervuras, o tipo de perfil nervurado (em alternativa ou não à Especificação LNEC E 460 [1]), o tipo de produção (em comprimento reto ou em rolo) ou até a alterações na produção dos varões ao longo do tempo.

3.3 Análise dos resultados de $b_{R/c}$ por tipo de produção e de perfil nervurado

Nesta secção são apresentados os resultados da análise estatística dos valores de $b_{R/c}$ tendo em conta i) o tipo de produção dos varões de aço do tipo A500 NR SD, respetivamente em comprimentos retos (adiante designado por barra) ou sob a forma de rolos, e tendo em conta ii) o tipo de perfil nervurado da superfície de varões de aço do tipo A500 NR SD, seja ele semelhante (adiante designado por normal) ou alternativo (adiante designado por especial) ao estipulado na Especificação LNEC E 460 [1].

Os resultados globais destas duas análises estatísticas são apresentados entre a Figura 14 e a Figura 19. O Quadro 2 e o Quadro 3 apresentam uma síntese dos principais parâmetros estatísticos das distribuições apresentadas nestas figuras, nomeadamente: i) o número de resultados (n), ii) o valor médio ($\bar{x}$), iii) o desvio-padrão (σ) e iv) o coeficiente de variação (ρ).

Os histogramas da Figura 14 e da Figura 15 apresentam, de forma separada, as distribuições estatísticas de resultados de $b_{R/c'}$ considerando varões produzidos sob a forma de rolos ou em

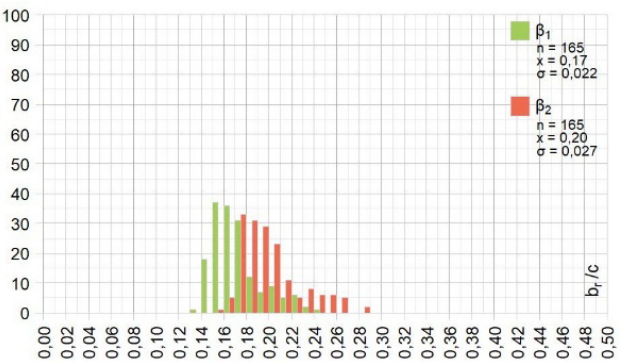


Figura 13 Resultados de $b_{R/c}$ obtidos para varões do tipo A500 NR SD com 32 mm de diâmetro

comprimentos retos, respetivamente, no caso de se considerar as inclinações das nervuras transversais β_1 e β_2 . Os histogramas da Figura 16 e da Figura 17 apresentam, separadamente, as distribuições estatísticas de resultados de $b_{R/c'}$ considerando varões com um perfil nervurado normal ou especial, respetivamente, no caso de se considerar as inclinações das nervuras transversais β_1 e β_2 . Por último, os histogramas da Figura 18 e da Figura 19 apresentam, separadamente, as distribuições estatísticas de resultados de $b_{R/c'}$ considerando varões com um perfil nervurado normal (exclusivamente produzido sob a forma de rolos) ou especial, respetivamente, no caso de se considerar as inclinações das nervuras transversais β_1 e β_2 .

Quadro 2 Resumo dos resultados de $b_{R/c}$ obtidos por tipo de produção

Produção	Considerando β_1				Considerando β_2			
	n	$\bar{x}$	σ	ρ [%]	n	$\bar{x}$	σ	ρ [%]
Rolo	955	0,24	0,050	21%	955	0,27	0,058	22%
Barra	2150	0,19	0,034	16%	2150	0,22	0,041	18%

Quadro 3 Resumo dos resultados de $b_{R/c}$ obtidos por tipo de perfil

Produção	Considerando β_1				Considerando β_2			
	n	$\bar{x}$	σ	ρ [%]	n	$\bar{x}$	σ	ρ [%]
Normal	2460	0,19	0,034	16%	2460	0,23	0,041	18%
Especial	645	0,25	0,054	20%	645	0,28	0,064	21%
Normal ^(a)	310	0,21	0,029	14%	310	0,25	0,035	12%

(a) Varões produzidos exclusivamente sob a forma de rolos.

A partir da análise dos resultados da Figura 14 e da Figura 15 verifica-se que os valores médios de $b_{R/c}$ das distribuições de resultados obtidos para varões produzidos sob a forma de rolos são superiores aos valores médios das distribuições de resultados obtidos para varões produzidos em comprimentos retos. Os valores médios de $b_{R/c}$ dos resultados obtidos para varões produzidos sob a forma de rolos são iguais a 0,24 e 0,27, respetivamente no caso de se considerar β_1 ou β_2 ; os valores médios de $b_{R/c}$ dos resultados obtidos

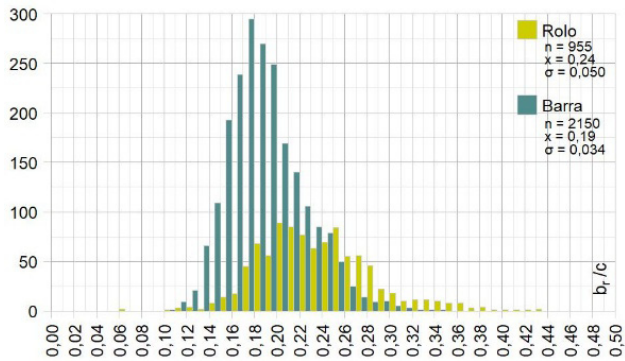


Figura 14 Resultados de $b_{R/c}$ obtidos para varões do tipo A500 NR SD produzidos em rolo e em comprimentos retos, considerando β_1

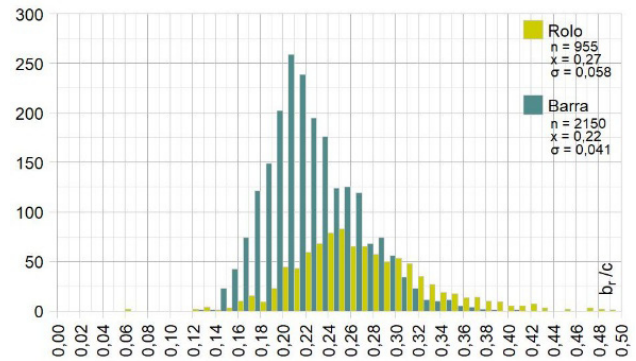


Figura 15 Resultados de $b_{R/c}$ obtidos para varões do tipo A500 NR SD produzidos em rolo e em comprimentos retos, considerando β_2

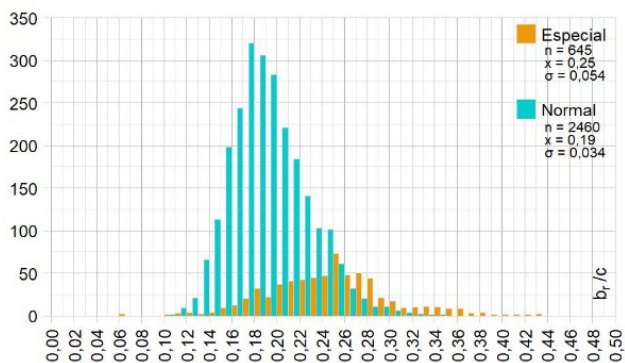


Figura 16 Resultados de $b_{R/c}$ obtidos para varões do tipo A500 NR SD com perfil normal e especial, considerando β_1

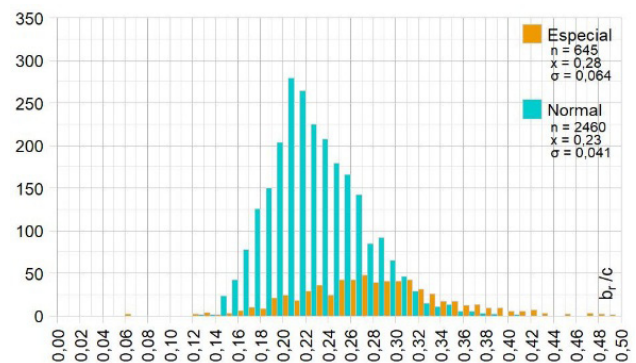


Figura 17 Resultados de $b_{R/c}$ obtidos para varões do tipo A500 NR SD com perfil normal e especial, considerando β_2

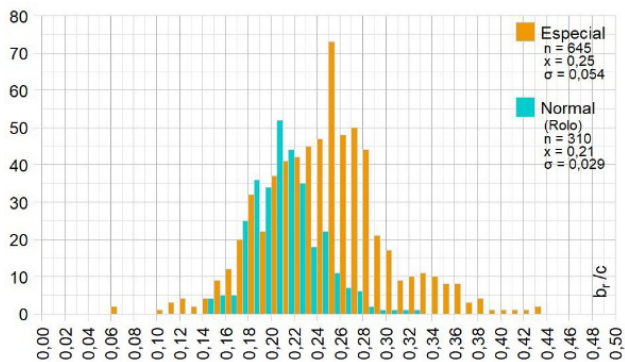


Figura 18 Resultados de $b_{R/c}$ obtidos para varões do tipo A500 NR SD com perfil normal (produzidos em rolo) e especial, considerando β_1

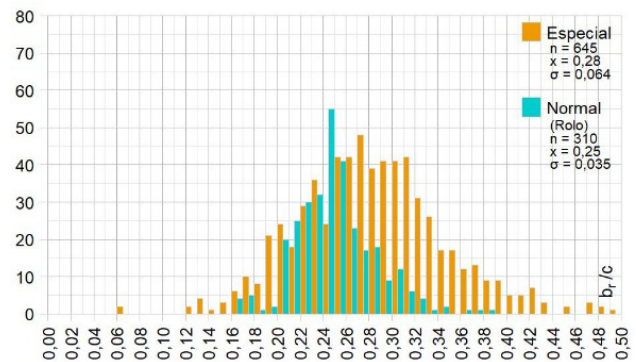


Figura 19 Resultados de $b_{R/c}$ obtidos para varões do tipo A500 NR SD com perfil normal (produzidos em rolo) e especial, considerando β_2

para varões produzidos em comprimentos retos, são iguais a 0,19 e 0,22, respetivamente considerando β_1 ou β_2 .

Os valores do desvio-padrão de $b_{R/C}$ obtidos para as distribuições de resultados por tipo de produção (Figura 14 e Figura 15) estão compreendidos entre 0,050 (considerando β_1) e 0,058 (considerando β_2), no caso de varões produzidos sob a forma de rolos, e entre 0,034 (considerando β_1) e 0,041 (considerando β_2), no caso de varões produzidos em comprimentos retos.

Apesar da dispersão de resultados obtidos para varões produzidos sob a forma de rolos ser consideravelmente superior à dispersão de resultados obtidos para varões produzidos em comprimentos retos, os valores dos coeficientes de variação obtidos para as distribuições de resultados dos diferentes tipos de produção (rolo ou barra), encontram-se relativamente próximos. Em particular, verifica-se que os valores do coeficiente de variação para os conjuntos de resultados obtidos para varões produzidos sob a forma de rolos são iguais a 21% e 22% (para β_1 ou β_2) enquanto que os valores do coeficiente de variação para as distribuições de resultados obtidos para varões produzidos em comprimentos retos são iguais a 16% e 18% (para β_1 ou β_2).

No caso da análise de resultados em função do tipo de perfil nervurado (Figura 16 e Figura 17), verifica-se que os valores médios das distribuições de resultados de $b_{R/C}$ obtidos para varões com perfil especial, que são iguais a 0,25 e 0,28 (respetivamente para β_1 ou β_2), são superiores aos valores médios das distribuições de resultados obtidos para varões com perfil normal, que são iguais a 0,19 e 0,23 (respetivamente para β_1 ou β_2).

A dispersão dos valores de $b_{R/C}$ (Figura 16 e Figura 17) é também superior no caso das distribuições de resultados obtidos para varões com perfil especial, com valores do desvio-padrão iguais a 0,054 e 0,064 e coeficientes de variação iguais a 20% e 21% (respetivamente para β_1 ou β_2), em relação às distribuições de resultados obtidos para varões com perfil normal, com valores do desvio-padrão iguais a 0,034 e 0,041 e coeficientes de variação iguais a 16% e 18% (respetivamente para β_1 ou β_2).

No entanto, há que ter em conta que os varões com perfil especial, considerados no presente estudo, foram produzidos exclusivamente sob a forma de rolos, enquanto que os varões com perfil normal foram produzidos sob a forma de rolos ou em comprimentos retos. Desse modo, as distribuições de resultados obtidos para varões com

perfil normal (Figura 16 e Figura 17) podem ser influenciadas pelo tipo de produção.

Para o efeito, na Figura 18 e na Figura 19, são apresentadas as distribuições de resultados de β_1 ou β_2 obtidos para varões com perfil normal e especial, ambos produzidos apenas sob a forma de rolos. A partir da análise destes resultados verifica-se que a influência do tipo de produção não teve qualquer significado na análise da influência do tipo de perfil nervurado. As distribuições de resultados de $b_{R/C}$ obtidos para varões com perfil normal produzidos em comprimentos retos ou sob a forma de rolos e para varões com perfil normal produzidos apenas sob a forma de rolos (ver Quadro 3) são praticamente idênticas apesar de, neste último caso, a dimensão da população ser muito mais reduzida (310 resultados). Estes resultados indicam que o tipo de perfil nervurado (normal ou especial) tem um peso significativo na determinação dos valores experimentais de $b_{R/C}$.

Quadro 4 Valores médios das distribuições de resultados de $b_{R/C}$ por diâmetro e tipo de perfil

Diâmetro [mm]	Considerando β_1			Considerando β_2		
	Tipo de perfil		Diferença relativa	Tipo de perfil		Diferença relativa
	Normal	Especial		Normal	Especial	
6	–	0,20	–	–	0,23	–
8	0,21	0,26	25%	0,25	0,29	19%
10	0,20	0,24	17%	0,24	0,27	12%
12	0,19	0,25	27%	0,23	0,28	24%
14	0,20	–	–	0,23	–	–
16	0,21	0,26	26%	0,24	0,29	21%
20	0,17	0,20	16%	0,20	0,22	9%
25	0,17	0,28	62%	0,20	0,32	62%
32	0,17	–	–	0,20	–	–
Todos	0,19	0,25	29%	0,23	0,28	24%

No Quadro 4, na Figura 20 e na Figura 21 apresentam-se os valores médios de cada uma das distribuições de resultados de $b_{R/C}$ para varões com perfil normal e especial, para cada um dos diâmetros de varões ensaiados. Chama-se a atenção para o facto de não existirem resultados de ensaios realizados sobre varões com perfil normal

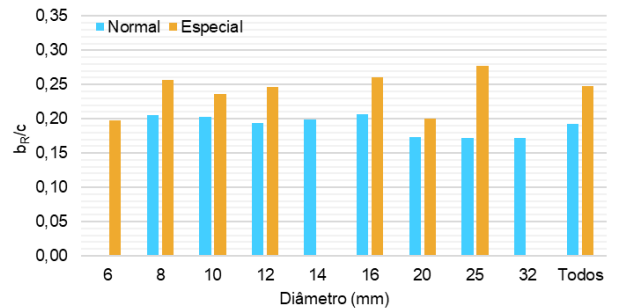


Figura 20 Valores médios de $b_{R/C}$ obtidos em função do diâmetro do varão e do tipo de perfil nervurado, considerando β_1

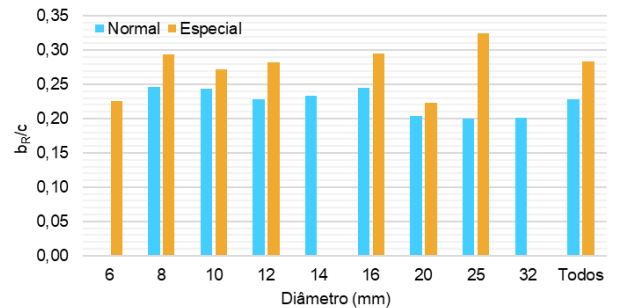


Figura 21 Valores médios de $b_{R/C}$ obtidos em função do diâmetro do varão e do tipo de perfil nervurado, considerando β_2

com 6 mm de diâmetro, e com perfil especial com os diâmetros de 14 mm e 32 mm.

Através da análise dos resultados apresentados no Quadro 4, na Figura 20 e na Figura 21, é possível também verificar que os valores médios das distribuições de $b_{R/c}$ para um mesmo diâmetro, são sempre superiores no caso de varões com um perfil especial relativamente a varões com perfil normal. Este facto é especialmente evidente no caso dos resultados obtidos para varões com 25 mm de diâmetro, onde se observa um acréscimo relativo de 62% do valor médio de $b_{R/c}$ quando se comparam os varões com perfil especial com os varões com perfil normal; nos restantes diâmetros de varões este acréscimo relativo varia entre os 9% e os 27%. No caso de se considerar os resultados obtidos para todos os diâmetros, verifica-se um acréscimo do valor médio de $b_{R/c}$ igual a 29% (para β_1) e 24% (para β_2), comparando os varões com perfil especial com os varões com perfil normal.

3.4 Relação dos valores de $b_{R/c}$ com os valores de f_R em função do tipo de perfil nervurado

Conforme anteriormente referido, o principal parâmetro geométrico que tem sido usado para caracterizar as propriedades de aderência de um determinado perfil nervurado é a área relativa das nervuras transversais (f_R), que é calculada tendo em conta os valores de diversas propriedades geométricas das nervuras que são obtidos experimentalmente. No caso de varões de aço com um perfil nervurado normal, a fórmula da parábola (Equação 1) é a que melhor se adequa; por sua vez, nos casos de varões com perfil nervurado especial, os estudos realizados demonstraram que a fórmula de Simpson (Equação 2) é a que melhor se adapta ao desenvolvimento geométrico das nervuras transversais deste tipo de perfil.

$$f_R = \frac{2a_m(\pi\phi - \Sigma f_i)}{3\pi\phi c} \quad (1)$$

$$f_R = \frac{(2a_{1/4} + a_m + 2a_{3/4})(\pi\phi - \Sigma f_i)}{6\pi\phi c} \quad (2)$$

Os parâmetros apresentados nas Equações 1 e 2 são os seguintes: altura das nervuras transversais a meio do seu comprimento (a_m), valor nominal do diâmetro da secção transversal do varão (ϕ), perímetro sem nervuras transversais (Σf_i), afastamento das nervuras transversais (c), altura das nervuras transversais a $1/4$ do seu comprimento ($a_{1/4}$) e altura das nervuras transversais a $3/4$ do seu comprimento ($a_{3/4}$).

No Quadro 5, na Figura 22 e na Figura 23 apresentam-se os valores médios de f_R em função do tipo de perfil nervurado e do diâmetro do varão: i) no caso de se considerar apenas a fórmula da parábola (Equação 1) para varões com ambos tipos de perfis (normal e especial), ou ii) no caso de se considerar a fórmula da parábola (Equação 1) para os varões com perfil normal e a fórmula de Simpson (Equação 2) para os varões com perfil especial. Também neste caso, assinala-se que não existem resultados de ensaios realizados sobre varões com perfil normal com 6 mm de diâmetro, e com perfil especial com os diâmetros de 14 mm e 32 mm.

Quadro 5 Valores médios dos valores de f_R por diâmetro e tipo de perfil

Diâmetro [mm]	Apenas fórmula da parábola			Fórmula da parábola e Simpson		
	Tipo de perfil		Diferença relativa	Tipo de perfil		Diferença relativa
	Normal	Especial		Normal	Especial	
6	–	0,063	–	–	0,075	–
8	0,074	0,054	-27%	0,074	0,065	-12%
10	0,075	0,052	-30%	0,075	0,062	-18%
12	0,079	0,058	-26%	0,079	0,071	-10%
14	0,087	–	–	0,087	–	–
16	0,085	0,056	-34%	0,085	0,069	-19%
20	0,082	0,061	-26%	0,082	0,068	-18%
25	0,087	0,058	-33%	0,087	0,061	-30%
32	0,087	–	–	0,087	–	–
Todos	0,081	0,056	-31%	0,081	0,067	-17%

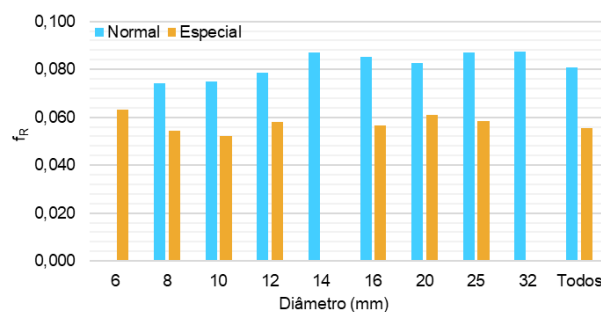


Figura 22 Valores médios de f_R obtidos através da fórmula da parábola, em função do diâmetro do varão e do tipo de perfil nervurado

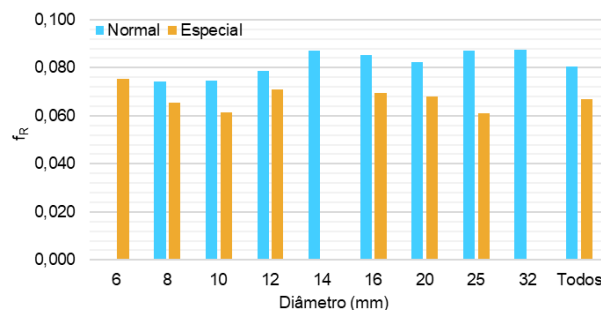


Figura 23 Valores médios de f_R obtidos através da fórmula de Simpson, em função do diâmetro do varão e do tipo de perfil nervurado.

Verifica-se que, independentemente da fórmula utilizada para a determinação de f_R (Equações 1 ou 2), os varões de aço com perfil nervurado normal apresentam sempre valores de f_R superiores aos obtidos para varões de aço com perfil nervurado especial. Estas

diferenças traduzem-se num decréscimo dos valores de f_R que se situa entre os 26% e 34%, quando se comparam valores obtidos para varões com perfil especial e normal, ambos calculados através da fórmula da parábola (Figura 22); no caso de se considerar os valores de f_R dos varões com perfil especial calculados através da fórmula de Simpson, verifica-se um decréscimo que se situa entre os 10% e os 30%, quando comparados com os valores de f_R obtidos para varões com perfil normal, calculados através da fórmula da parábola (Figura 23).

Verifica-se também que os valores médios de f_R obtidos para varões com os dois tipos de perfis nervurados (normal e especial) aproximam-se quando se considera a fórmula da parábola para os varões com perfil normal e a fórmula de Simpson para os varões com perfil especial, em comparação ao caso de se utilizar unicamente a fórmula da parábola para os dois tipos de perfil.

Importa então saber se existe alguma relação entre os valores de f_R e de $b_{R/c}$ obtidos para varões com perfil nervurado normal e especial. Para o efeito, no Quadro 6, na Figura 24 e na Figura 25, são apresentados os valores médios de $b_{R/c}$ (considerando as inclinações β_1 e β_2) e os valores médios de f_R obtidos para varões com perfil nervurado normal e especial, em função do diâmetro do varão.

Quadro 6 Valores médios das distribuições de resultados de $b_{R/c}$ e de f_R por diâmetro e tipo de perfil

Diâmetro [mm]	Considerando β_1		Considerando β_2		f_R	
	Tipo de perfil		Tipo de perfil		Tipo de perfil	
	Normal	Especial	Normal	Especial	Normal	Especial
6	–	0,20	–	0,23	–	0,075
8	0,21	0,26	0,25	0,29	0,074	0,065
10	0,20	0,24	0,24	0,27	0,075	0,062
12	0,19	0,25	0,23	0,28	0,079	0,071
14	0,20	–	0,23	–	0,087	–
16	0,21	0,26	0,24	0,29	0,085	0,069
20	0,17	0,20	0,20	0,22	0,082	0,068
25	0,17	0,28	0,20	0,32	0,087	0,061
32	0,17	–	0,20	–	0,087	–
Todos	0,19	0,25	0,23	0,28	0,081	0,067

Assinala-se que foram considerados os valores de f_R obtidos através da fórmula da parábola (Equação 1) para varões com perfil normal, e os valores de f_R obtidos através da fórmula de Simpson (Equação 2) para varões com perfil especial. Assinala-se ainda que na Figura 24 e na Figura 25 não se apresentam os resultados obtidos para varões com diâmetros de 6 mm, 14 mm e 32 mm pois, como mencionado anteriormente, não existem resultados de ensaios realizados sobre varões com perfil normal com 6 mm de diâmetro, e com perfil especial com os diâmetros de 14 mm e 32 mm.

Verifica-se que existe uma ligeira tendência para que os valores de f_R diminuam com o aumento dos valores de $b_{R/c}$ para varões com um mesmo tipo de perfil nervurado (normal ou especial). Este facto é mais evidente nos resultados obtidos para varões com perfil

nervurado normal, onde apenas no caso dos varões com 16 mm de diâmetro não se verifica esta tendência de variação dos resultados. No entanto, há que ter em conta que a dispersão de resultados de $b_{R/c}$ obtidos para varões com perfil nervurado especial ser superior à obtida para varões com perfil nervurado normal, conforme se evidenciou na secção 3.3 do presente artigo; o efeito da dispersão de resultados pode ter influenciado a obtenção de uma relação mais clara entre os valores de f_R e de $b_{R/c}$.

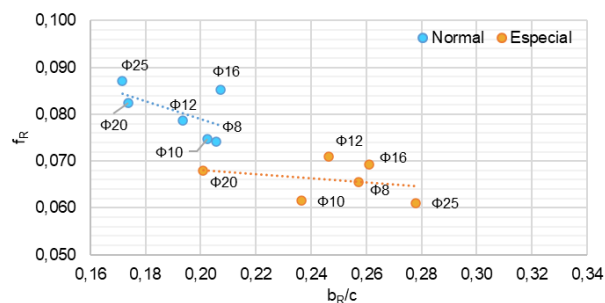


Figura 24 Relação entre os valores médios de f_R e de $b_{R/c}$ considerando β_1 , obtidos para varões com perfil normal e especial

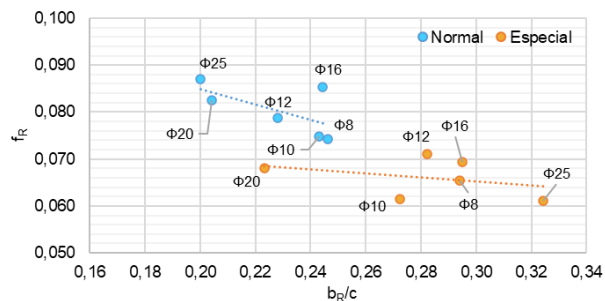


Figura 25 Relação entre os valores médios de f_R e de $b_{R/c}$ considerando β_2 , obtidos para varões com perfil normal e especial.

3.5 Relação dos valores de $b_{R/c}$ e de f_R com tensões de aderência (τ_m , τ_r), em função do tipo de perfil nervurado

A caracterização da geometria das nervuras dos varões serve para avaliar, de forma indireta, as propriedades de aderência dos varões ao betão. Porém, existem alguns métodos experimentais de avaliar a aderência como, por exemplo, através da realização de ensaios de arrancamento de varões (*pull-out tests*) e de ensaios de viga (*beam tests*) que permitem testar, de forma efetiva, a resistência da ligação dos varões de aço ao betão. Deste modo, interessa também saber de que forma os resultados obtidos em ensaios de avaliação direta da aderência se relacionam com os resultados de propriedades geométricas das nervuras dos varões como, por exemplo, os valores de $b_{R/c}$ e de f_R .

Para o efeito, foram considerados os resultados de 125 ensaios de arrancamento de varões de aço do tipo A500 NR SD, para os quais também foram realizados ensaios de determinação das características geométricas das nervuras, onde foram determinados os valores de $b_{R/c}$ e de f_R . No Quadro 7 e entre a Figura 26 e a Figura 31 são apresentados os valores médios das distribuições de resultados de $b_{R/c}$ e de f_R , considerando os valores médios da tensão média de aderência (τ_m) e da tensão de aderência na rotura (τ_r), obtidos através de ensaios de arrancamento realizados sobre os mesmos varões.

A tensão de aderência na rotura corresponde à tensão de aderência máxima obtida em cada ensaio de arrancamento. Em todos os ensaios de arrancamento as tensões de aderência encontram-se normalizadas a uma resistência à compressão do betão de 25 MPa, determinada em cilindros. Os resultados são apresentados, uma vez mais, em função do diâmetro e tipo de perfil dos varões (normal ou especial), considerando as inclinações β_1 e β_2 na determinação de $b_{R/c}$; os valores de f_R de varões com perfil normal foram obtidos através da fórmula da parábola (Equação 2) enquanto que os valores de f_R de varões com perfil especial foram obtidos através da fórmula de Simpson (Equação 2).

A análise dos resultados apresentados na Figura 26 e na Figura 27 não revela uma relação evidente entre os valores médios de f_R e as tensões de aderência (τ_m , τ_r), obtidos em ensaios realizados sobre os mesmos varões, possivelmente devido à reduzida dimensão da população em causa. Ainda assim, parece existir uma ligeira tendência de aumento dos valores médios das tensões de aderência com o aumento dos valores médios de f_R , no caso dos varões com perfil especial; por outro lado, e embora não seja tão evidente, no caso dos varões com perfil normal, o valor médio das tensões parece diminuir com o aumento dos valores médios de f_R , ao contrário do que seria esperado.

Verifica-se também que apesar dos valores médios de f_R obtidos para varões com perfil nervurado normal serem, em geral, superiores aos valores médios de f_R obtidos para varões com perfil nervurado especial, os valores médios das tensões de aderência (τ_m , τ_r) são praticamente semelhantes entre os dois tipos de perfil nervurado.

A análise dos resultados apresentados entre a Figura 28 e a Figura 31, revela que também não é possível estabelecer uma relação clara entre os valores médios de $b_{R/c}$ e das tensões de aderência (τ_m , τ_r). À semelhança da análise dos resultados de f_R , verifica-se que existe uma ligeira tendência de variação dos valores médios de τ_m e τ_r em função da variação dos valores médios de $b_{R/c}$, para um mesmo tipo de perfil nervurado. No caso dos varões com perfil normal, os valores médios de τ_m e τ_r parecem aumentar com o aumento dos valores médios de $b_{R/c}$; porém, no caso dos varões com perfil especial, parece haver uma ligeira tendência de diminuição dos valores médios das tensões de aderência (τ_m , τ_r) com o aumento dos valores médios de $b_{R/c}$.

No entanto, importa realçar que existem diversos fatores que poderão ter influenciado os resultados obtidos através desta análise, como:

- i) o reduzido número de ensaios de arrancamento considerados,
- ii) o facto de terem sido considerados resultados obtidos para varões com diferentes diâmetros, iii) o número de ensaios considerados por diâmetro ser reduzido (no máximo 10 resultados por diâmetro),
- iv) a variação natural das propriedades geométricas das nervuras dos varões, v) a variação das propriedades do betão ou o facto de terem ocorrido roturas por fendilhação transversal do betão (*splitting*) nos ensaios de arrancamento. Todos estes fatores poderão, de alguma forma, ter condicionado a obtenção de uma relação clara entre os valores das tensões de aderência (τ_m e τ_r) e os valores das características geométricas das nervuras dos varões que foram consideradas neste artigo (f_R , $b_{R/c}$).

Quadro 7 Valores médios das distribuições de resultados de $b_{R/c}$, f_R , τ_m e τ_r , por diâmetro e tipo de perfil

Diâmetro [mm]	$b_{R/c}$				f_R		τ_m [MPa]		τ_r [MPa]	
	Considerando β_1		Considerando β_2							
	Tipo de perfil		Tipo de perfil		Tipo de perfil		Tipo de perfil		Tipo de perfil	
	Normal	Especial	Normal	Especial	Normal	Especial	Normal	Especial	Normal	Especial
6	–	0,20	–	0,23	–	0,075	–	12,50	–	20,31
8	0,26	0,19	0,32	0,23	0,090	0,081	18,81	15,09	24,76	22,41
10	0,24	---	0,29	---	0,081	–	13,14	–	21,64	–
12	0,17	0,21	0,20	0,24	0,084	0,106	12,51	15,74	21,36	24,67
14	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
16	0,20	0,20	0,25	0,22	0,079	0,076	12,32	16,89	20,45	25,51
20	0,19	0,23	0,22	0,25	0,099	0,082	10,09	10,62	15,93	16,03
25	0,17	0,28	0,20	0,32	0,092	0,061	10,80	6,12	17,11	11,78
32	0,18	–	0,21	–	0,082	–	9,52	–	15,69	–
Todos	0,20	0,22	0,23	0,25	0,087	0,080	12,01	12,83	19,16	20,12

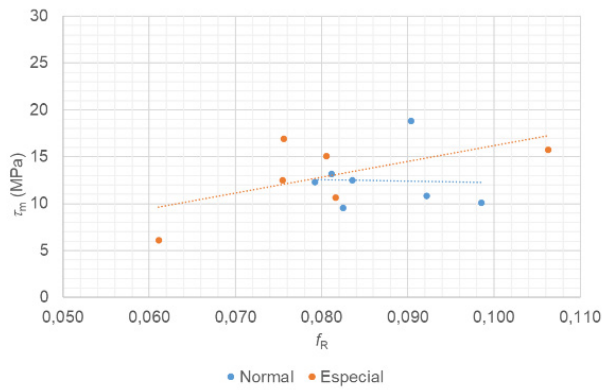


Figura 26 Relação entre os valores médios de τ_m e de $f_{R'}$ obtidos para varões com perfil normal e especial

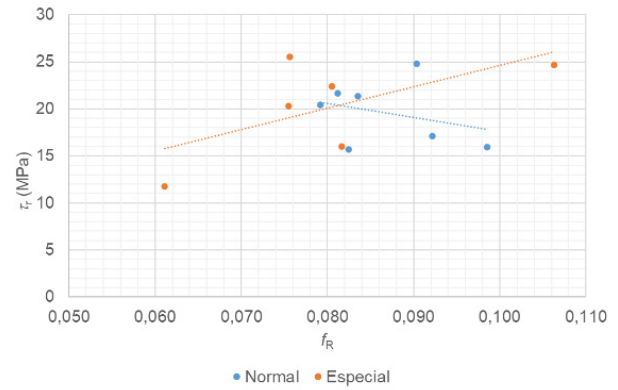


Figura 27 Relação entre os valores médios de τ_r e de $f_{R'}$ obtidos para varões com perfil normal e especial

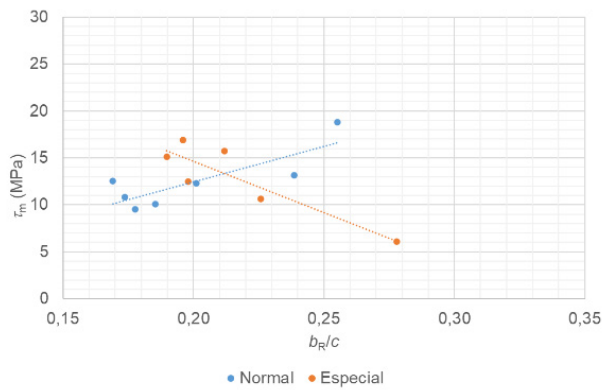


Figura 28 Relação entre os valores médios de τ_m e de $b_{R/c'}$ considerando β_1 , obtidos para varões com perfil normal e especial

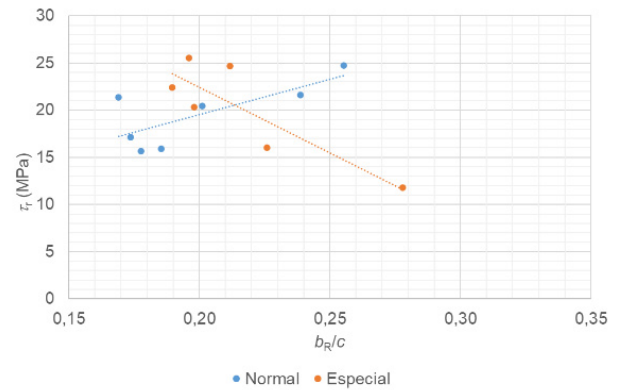


Figura 29 Relação entre os valores médios de τ_r e de $b_{R/c'}$ considerando β_1 , obtidos para varões com perfil normal e especial

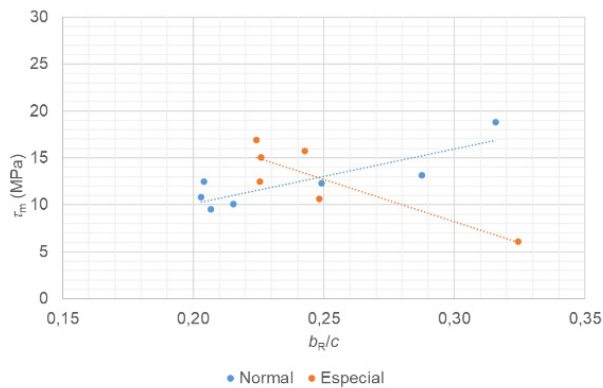


Figura 30 Relação entre os valores médios de τ_m e de $b_{R/c'}$ considerando β_2 , obtidos para varões com perfil normal e especial

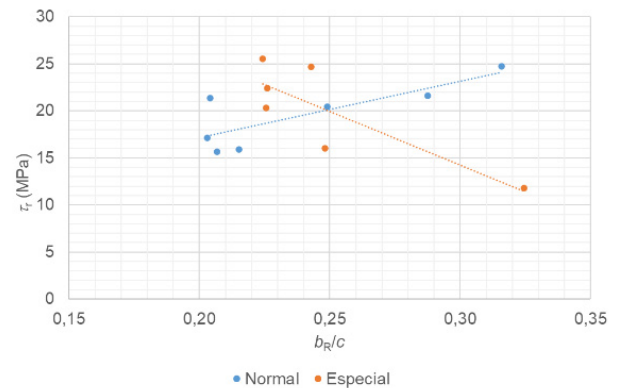


Figura 31 Relação entre os valores médios de τ_r e de $b_{R/c'}$ considerando β_2 , obtidos para varões com perfil normal e especial

4 Considerações finais

O estudo desenvolvido no presente artigo evidencia a relevância da adequada caracterização de aderência de varões de aço para betão armado, como forma de assegurar que os varões existentes no mercado possuem adequada capacidade de amarração, em especial quando os fabricantes implementam alterações na superfície do perfil nervurado dos varões.

Considerando que para a caracterização de aderência dos varões, as versões mais recentes dos projetos de normas destes produtos têm vindo a introduzir um novo parâmetro de controlo da geometria dos varões ($b_{R/c}$), paralelamente ao controlo da área relativa das nervuras transversais (f_R), desenvolveu-se um estudo estatístico deste novo parâmetro ($b_{R/c}$), baseado na variação do tipo de perfil nervurado dos varões, seja ele semelhante ou alternativo ao estipulado na Especificação LNEC E 460 [1].

O desenvolvimento do estudo compreendeu quatro partes principais, nomeadamente as seguintes:

- análise dos resultados de $b_{R/c}$ por diâmetro da secção transversal dos varões;
- análise dos resultados de $b_{R/c}$ por tipo de produção (rolo ou barra) e de perfil nervurado (normal ou especial);
- análise da relação dos valores de $b_{R/c}$ com os valores de f_R , em função do tipo de perfil nervurado;
- análise da relação dos valores de $b_{R/c}$ e de f_R em termos de tensões de aderência (τ_m , τ_p), em função do tipo de perfil nervurado.

Os resultados mostram que, em geral, os valores médios de $b_{R/c}$ diminuem com o aumento do diâmetro do varão e que a variação dos valores da inclinação das nervuras (β_1 ou β_2) de varões de aço do tipo A500 NR SD, tem uma influência importante na determinação dos valores de $b_{R/c}$ (diferenças relativas entre os 14% a 19%). Verifica-se também que os valores médios de $b_{R/c}$ obtidos para varões produzidos sob a forma de rolos são superiores aos valores médios de $b_{R/c}$ obtidos para varões produzidos em comprimentos retos (barra).

Em relação às análises efetuadas quanto à variação do tipo de perfil nervurado, verifica-se que os valores médios de $b_{R/c}$ obtidos para um mesmo diâmetro, são sempre superiores no caso de varões com um perfil especial relativamente a varões com perfil normal. Esta diferença traduz-se num aumento de 29% e 24% (respetivamente, considerando β_1 ou β_2), para o conjunto de todos os diâmetros. Verifica-se também que a influência do tipo de produção (rolo ou barra) não teve qualquer significado na análise da influência do tipo de perfil nervurado.

Também foi possível observar que, independentemente da fórmula utilizada para a determinação de f_R , os varões de aço com perfil nervurado normal apresentam sempre valores de f_R superiores aos obtidos para varões de aço com perfil nervurado especial. Porém, quando se considera a fórmula da parábola para os varões com perfil normal e a fórmula de Simpson para os varões com perfil especial, os valores médios de f_R obtidos para varões com os dois tipos de perfis nervurados aproximam-se. Verifica-se também que existe uma ligeira tendência para que os valores de f_R diminuam com o

aumento dos valores de $b_{R/c}$ para varões com um mesmo tipo de perfil nervurado.

Apesar das limitações do estudo e dos diversos fatores apresentados na secção 3.5, os resultados da análise em termos de tensões de aderência mostram que não existe uma relação evidente entre os valores médios de f_R e as tensões de aderência (τ_m , τ_p) e entre os valores médios de $b_{R/c}$ e as tensões de aderência (τ_m , τ_p). Em particular, quanto ao tipo de perfil nervurado, verifica-se que os valores médios destas tensões (τ_m , τ_p) aumentam, em geral, com o aumento dos valores médios de $b_{R/c}$, no caso dos varões com perfil normal. Também se verifica que existe uma ligeira tendência de diminuição dos valores médios das tensões de aderência (τ_m , τ_p) com o aumento dos valores médios de $b_{R/c}$, no caso dos varões com perfil especial.

Agradecimentos

Os autores agradecem à aluna Maria Beatriz Bezerra, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, o tratamento de parte dos resultados do presente estudo, desenvolvido no âmbito do estágio do Programa de Introdução à Prática Profissional integrado no Protocolo LNEC - FCT Nova.

Os autores agradecem também ao Eng.º António Baptista, investigador principal aposentado do LNEC, o apoio na revisão do presente artigo.

Referências

- Especificação LNEC E 460:2017 – “Varões de aço A500 NR de ductilidade especial para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, janeiro 2017.
- EN 1992-1-1:2004 (E) – “Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings”, European Committee for Standardization (CEN), 2004, 225 p.
- EN 1992-1-1: 2023 (E) – “Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures”, European Committee for Standardization (CEN), 2023, 402 p.
- Bulletin 10: State-of-art report: Bond of reinforcement in concrete, *fib*, Lausanne, Switzerland, 2000. 434 p. doi.org/10.35789/fib.BULL.0010
- Louro, Ana S. – “Caracterização da aderência de varões nervurados sujeitos a ações repetidas e alternadas”. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil, Especialidade em Estruturas. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2014, 435 p.
- Dominguez, N. – “Etude de la Liaison Acier-Béton: De la modélisation du Phénomène à la Formulation d'un Élément fini enrichi “Béton Armé””, Thèse de Doctorat, Laboratoire de Mécanique et Technologie, L'Ecole Normale Supérieure de Cachan, Cachan, France, 2005.
- EN 10080-2005 (E) – “Steel for the reinforcement of concrete – Weldable reinforcing steel”, European Committee for Standardization (CEN), 2005, 69 p.
- prEN 10080:2023 (E) – “Steel for the reinforcement of concrete – Weldable reinforcing steel – General”, European Committee for Standardization (CEN), 2023, 91 p.

- [9] *fib* Model Code for Concrete Structures 2010.
ISBN: 978-3-433-03061-5, Ernst & Sohn, 2013, 434 p.
- [10] *fib* Model Code for Concrete Structures 2020.
ISBN: 978-2-88394-175-5, *fib*, Lausanne, Switzerland, 2023, 780 p.
- [11] Bulletin 72: Bond and anchorage of embedded reinforcement:
Background to the *fib* Model Code for Concrete Structures 2010, *fib*,
Lausanne, Switzerland, 2014, 170 p.