

INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE ENDIREITAMENTO DE VARÕES DE AÇO PRODUZIDOS EM ROLO NAS SUAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E DE ADERÊNCIA



António M. Baptista

Investigador Principal
Departamento de
Estruturas, LNEC
ambaptista@lnec.pt



João Filipe

Bolseiro
Departamento de
Estruturas, LNEC
jfilipe@lnec.pt

SUMÁRIO

O presente trabalho apresenta uma comparação entre resultados de ensaios realizados sobre varões de aço produzidos em troços retos e realizados sobre varões de aço produzidos em rolo e posteriormente endireitados, colocando em evidência as principais consequências do processo de endireitamento sobre a alteração das características mecânicas dos varões de aço laminados a quente, e sobre a geometria das suas nervuras, que asseguram a sua aderência ao betão.

São também apresentadas algumas considerações sobre medidas possíveis para precaver a utilização de varões que deixem de cumprir as exigências regulamentares devido às consequências do seu endireitamento.

Palavras-chave: Betão armado; Varões de aço em rolo; Endireitamento; Geometria das nervuras; Características mecânicas.

1. INTRODUÇÃO

O fabrico de varões de aço laminados a quente e produzidos em rolo tem evoluído bastante ao longo dos últimos anos, permitindo reduzir significativamente o desperdício deste tipo de produto no fabrico de armaduras para betão estrutural. O enrolamento dos varões é feito nos processos finais de laminação, através do seu armazenamento em carretos (“spoolers”). Para além da redução do desperdício, em relação à utilização de varões fornecidos em comprimentos retos de 12 m, o transporte e o manuseamento de varões de aço em rolo é mais eficiente do que no caso de varões produzidos em barra.

Estes varões de aço em rolo são, em geral, produzidos até 16 mm de diâmetro, conforme prescrito na norma EN 10080:2005 [1]. No entanto, devido à grande evolução e melhoria deste processo de fabrico nos últimos anos, consegue-se hoje em dia produzir varões de aço em rolo nos diâmetros de 20 mm e 25 mm, sendo que em Portugal existem atualmente alguns fabricantes que produzem varões de aço em rolo até 25 mm de diâmetro.

São conhecidos dois métodos correntes de endireitamento de varões de aço, nomeadamente do tipo “roller” e do tipo “spinner”. O endireitamento de varões de aço pelo método “roller” é o mais comum e consiste na passagem do varão em rolo entre mandris, conferindo-lhe uma forma ondulada. De seguida, o varão é submetido um processo de inversão das deformações permanentes de flexão, através da sua passagem por mandris ajustados de modo a que o produto final tenha a forma de um troço reto. No processo de endireitamento pelo método “spinner”, o varão em rolo passa por um conjunto de moldes rotativos afastados entre si, de modo a que no final o varão esteja devidamente endireitado.



Figura 1. Aspeto de uma fase inicial do endireitamento de varões produzidos em rolo.



Figura 2. Aspeto de uma fase final do endireitamento de varões produzidos em rolo.

O processo de endireitamento a frio do varão em rolo poderá introduzir várias alterações nas suas características mecânicas, devidas ao endurecimento do aço, tais como o aumento da sua tensão de rotura e a diminuição da sua ductilidade. Além disso, a pressão exercida pelos mandris provoca deformações permanentes nas zonas de contacto com o varão durante o processo de endireitamento, de que resulta, por exemplo, a diminuição da altura das nervuras transversais do varão. A Figura 3 mostra um exemplo das deformações permanentes acentuadas sofridas pelas nervuras transversais de um varão durante o seu processo de endireitamento.

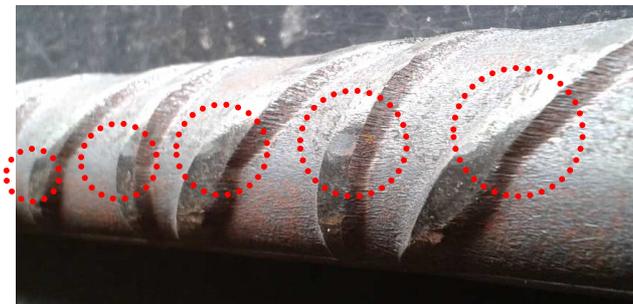


Figura 3. Deformações permanentes sofridas pelas nervuras transversais de um varão durante o seu processo de endireitamento.

Por outro lado, se um varão em rolo não for devidamente endireitado, apresentando desvios de forma em relação à direção do seu eixo longitudinal, a sua resistência à fadiga e a ações cíclicas de grande amplitude poderá ser diminuída, devido ao agravamento dos fenómenos de concentração de tensões provocado pelos esforços de segunda ordem resultantes da deformada inicial do varão.

De acordo com a normativa europeia (EN 10080:2005 [1]) e portuguesa (Especificações LNEC), aplicáveis a varões de aço para armaduras de betão armado, o endireitamento dos varões não é considerado como um processamento posterior ao seu fabrico. Para além disso, estes documentos normativos referem ainda que a entidade que efetua o endireitamento dos varões de aço deve assegurar que os varões continuam a cumprir as exigências regulamentares após o seu endireitamento, através da implementação de um procedimento interno que prevê a realização de ensaios sobre o produto endireitado.

As Especificações LNEC também referem que os varões de aço produzidos em rolo podem ser fornecidos em troços retos pelo fabricante, e que devem ter uma marcação adicional, através de um código que consiste no engrossamento de uma nervura transversal na série de nervuras em que não esteja presente a identificação do fabricante e do país de origem.

Atualmente existem 41 fabricantes de varões de aço laminados a quente, que produzem um total de 93 produtos deste tipo classificados pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Entre estes fabricantes, existem 18 que produzem varões de aço em rolo, ou em rolo e em barra, num total de 46 produtos diferentes. Se estes produtos forem organizados por classes de resistência do aço (Quadro 1), é ainda mais evidente a relevância deste assunto.

Quadro 1. Distribuição da quantidade de fabricantes e produtos produzidos em rolo e em barra

Classe	Quantidade de produtos			
	Rolo	Rolo / Barra	Barra	TOTAL
A400 NR	0	9	13	22
A500 NR	0	12	24	36
A400 NR SD	0	8	4	12
A500 NR SD	2	15	6	23

No caso das classes de resistência A400 NR e A500 NR existem mais fabricantes a produzir unicamente varões de aço em barra, apesar de existir uma quantidade significativa de fabricantes que produzem varões em rolo e em barra; no caso das classes A400 NR SD e A500 NR SD existem mais fabricantes que produzem estes varões de aço de ductilidade especial em rolo e em troços retos do que apenas em barra.

Este facto é ainda mais significativo se se tiver em conta que os varões de aço de ductilidade especial têm exigências acrescidas quanto às suas características mecânicas, nomeadamente no que diz respeito às resistências a ações cíclicas e à fadiga, que podem ser afetadas pelo processo de endireitamento.

O presente trabalho apresenta uma comparação entre resultados de ensaios realizados sobre varões de aço de diferentes classes de resistência, produzidos em troços retos ou produzidos em rolo e posteriormente endireitados. Estes varões de aço foram produzidos ao longo dos últimos anos por 2 dos 18 fabricantes que produzem varões de aço em rolo e em barra.

Através desta comparação pretende-se evidenciar as principais consequências do processo de endireitamento sobre a alteração das características mecânicas dos varões de aço laminados a quente, e sobre a geometria das suas nervuras, que asseguram a sua aderência ao betão.

Em face da relevância deste tema e do facto de o fornecimento de varões de aço produzidos em rolo e posteriormente endireitados ser ainda relativamente recente no mercado nacional, são também apresentadas algumas considerações sobre medidas possíveis e estratégias a adotar para precaver a utilização de varões que deixem de cumprir as exigências regulamentares devido ao seu endireitamento.

2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

2.1 Considerações iniciais

Para este estudo foram considerados os resultados de ensaios de varões de aço de diferentes classes de resistência, produzidos através de laminagem a quente, em rolo e em troços retos, por dois fabricantes diferentes. No total foram analisados os resultados de 1429 ensaios de tração e de 1429 ensaios de determinação das características geométricas das nervuras, realizados pelos fabricantes e pelo LNEC sobre varões de aço com diversos diâmetros, conforme indicado no Quadro 2.

É de salientar o facto de não se terem analisado as consequências do endireitamento dos varões de aço para todos os diâmetros possíveis de cada um dos vários tipos de varões produzidos pelos dois fabricantes (não se apresentam resultados para varões com 6 mm e 14 mm de diâmetro). O mesmo se verifica para as classes de resistência, já que não são analisadas estas consequências em varões do tipo A500 NR.

Este facto é justificado pela dificuldade encontrada na obtenção de resultados de ensaios de tração e de determinação das características geométricas das nervuras sobre varões de aço de todas as classes de resistência e de todos os diâmetros, produzidos pelos fabricantes que fornecem varões em troços retos e em rolos.

A desproporção da quantidade de ensaios analisados, referentes a varões produzidos em troços retos e em rolo, para o mesmo diâmetro, é também justificada por este facto. Por exemplo, nos casos dos varões de aço das classes A400 NR e A400 NR SD produzidos pelo fabricante FAB2, apenas se obtiveram resultados para varões com 10 mm e 8 mm de diâmetro, respetivamente, como se pode observar no Quadro 2.

Quadro 2. Quantidade de ensaios de tração e de medição de nervuras analisados.

Fabricante	Tipo	Troço	Diâmetro (mm)					
			8	10	12	16	20	25
FAB1	A400 NR SD	Barra	60	60	0	100	0	0
		Rolo	60	20	0	20	0	0
	A500 NR SD	Barra	20	30	40	60	0	0
		Rolo	60	80	80	30	0	0
FAB2	A400 NR	Barra	0	20	0	0	0	0
		Rolo	0	40	0	0	0	0
	A400 NR SD	Barra	40	0	0	0	0	0
		Rolo	40	0	0	0	0	0
	A500 NR SD	Barra	20	100	60	60	80	80
		Rolo	40	20	40	40	9	20

Para cada uma das diferentes classes de resistência dos varões de aço produzidos pelos dois fabricantes indicados (FAB1 e FAB2), foram comparados os valores de várias características mecânicas e de aderência, entre varões de aço do mesmo diâmetro produzidos em rolo e em troços retos.

As características mecânicas consideradas neste estudo são: i) a tensão de cedência, R_{eH} , (ou a tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%, $R_{p0,2}$), ii) a tensão de rotura, R_m , e iii) a extensão total na força máxima, A_{gt} . Analisando estas características para os casos referidos, é possível verificar se existe um processo de endurecimento do aço nos varões produzidos em rolo.

No caso do estudo das consequências do processo de endireitamento dos varões de aço sobre as suas características de aderência ao betão, foram analisados apenas os valores da altura das nervuras transversais, a , obtidos nos ensaios de determinação das características geométricas das nervuras. Para além de se saber que o processo de endireitamento dos varões deforma as suas nervuras transversais, esta escolha é justificada pelo facto de esta característica geométrica ser a mais importante para a aderência dos varões de aço ao betão.

2.2 Análise dos resultados obtidos

Esta secção apresenta uma análise das diferenças entre os resultados obtidos em ensaios de varões de aço, dos vários tipos e diâmetros considerados, produzidos em troços retos e em rolo pelo fabricante FAB1 e pelo fabricante FAB2.

As consequências do processo de endireitamento dos varões de aço produzidos em rolo nas suas características mecânicas e de aderência podem ser inferidas com base nos resultados apresentados em cada uma das figuras seguintes (Figura 4 à Figura 19), relativos a cada uma das características mecânicas ou geométricas anteriormente referidas e determinadas nos ensaios de varões de aço indicados no Quadro 2.

Em termos gerais, verifica-se que os resultados da tensão de cedência, R_{eH} , (ou da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%, $R_{p0,2}$) e da tensão de rotura, R_m , obtidos para os varões de aço produzidos em rolo e posteriormente endireitados, se situam acima dos valores destas características mecânicas obtidos para os varões de aço produzidos em barra.

Este facto é particularmente notório no caso dos varões das classes A400 NR e A400 NR SD fornecidos pelo fabricante FAB2, se bem que o número de diâmetros considerados seja relativamente escasso. No entanto, também pode ser observado no caso dos varões da classe A400 NR SD fornecidos pelo fabricante FAB1, nomeadamente para os varões de diâmetro 16 mm e, no caso da tensão de rotura, R_m , para os varões de diâmetro 10 mm.

No caso dos varões da classe A400 NR SD, o aumento dos valores de R_{eH} , (ou de $R_{p0,2}$) e de R_m , nos varões de aço produzidos em rolo e posteriormente endireitados, é evidente praticamente em todos os diâmetros analisados, fornecidos pelos dois fabricantes, embora mereçam particular destaque os varões com 8 mm, 10 mm e 25 mm de diâmetro fornecidos pelo fabricante FAB2.

Por outro lado, os valores da extensão total na força máxima, A_{gt} , obtidos nos ensaios dos varões de aço produzidos em rolo e posteriormente endireitados são inferiores aos valores desta característica obtidos nos ensaios dos varões de aço produzidos em troços retos.

Este facto é observável na generalidade dos casos apresentados nas figuras seguintes, embora assumam um particular destaque: i) nos casos dos varões da classe A400 NR com 10 mm de diâmetro fornecidos pelo fabricante FAB2, ii) nos casos dos varões da classe A400 NR SD com 16 mm de diâmetro fornecidos pelo fabricante FAB1, e com 8 mm de diâmetro fornecidos pelo fabricante FAB2, e iii) nos casos dos varões da classe A500 NR SD com 10 mm, 16 mm e 25 mm de diâmetro fornecidos pelo fabricante FAB2.

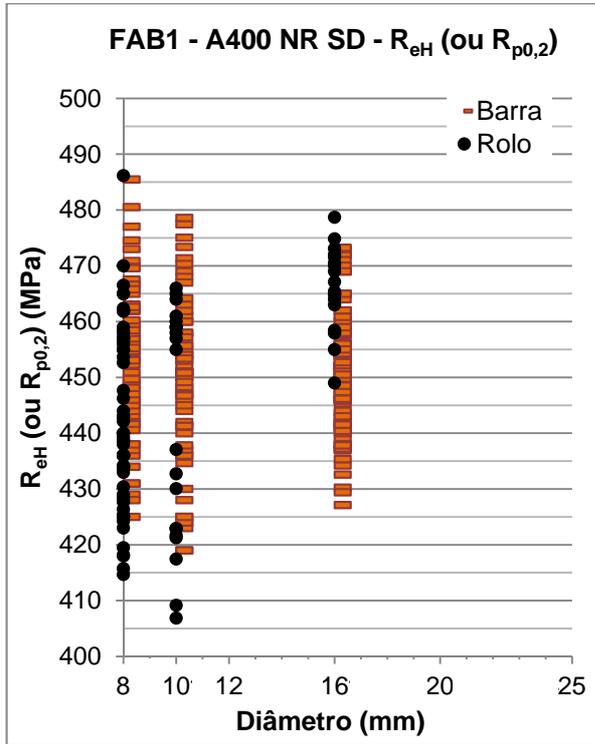


Figura 4. Tensão de cedência dos varões A400 NR SD do fabricante FAB1.

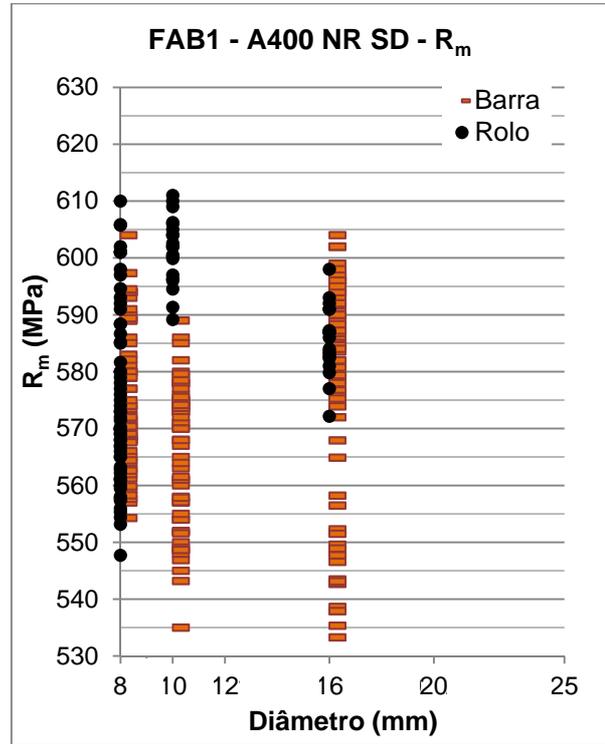


Figura 5. Tensão de rotura dos varões A400 NR SD do fabricante FAB1

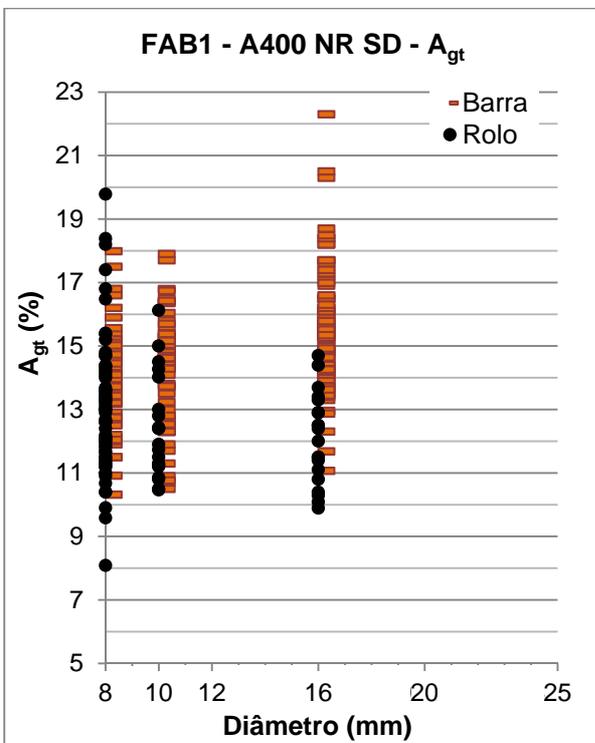


Figura 6. Extensão total na força máxima dos varões A400 NR SD do fabricante FAB1.

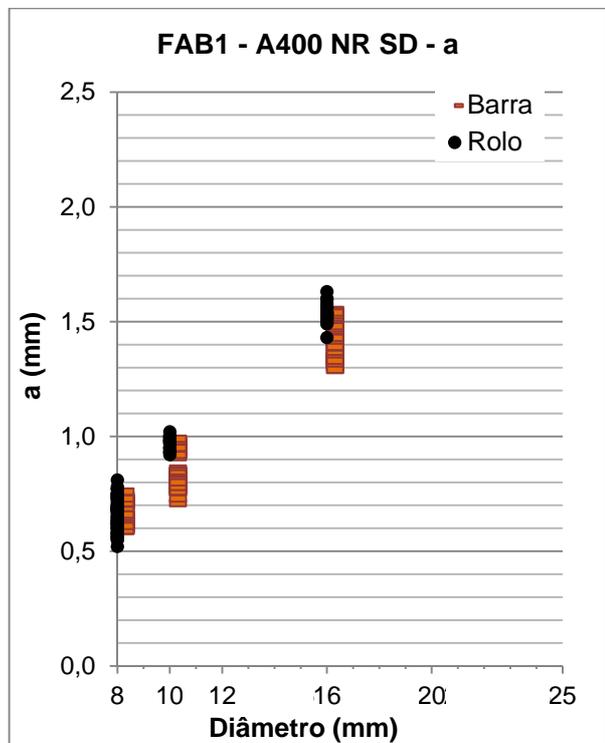


Figura 7. Altura das nervuras transversais dos varões A400 NR SD do fabricante FAB1.

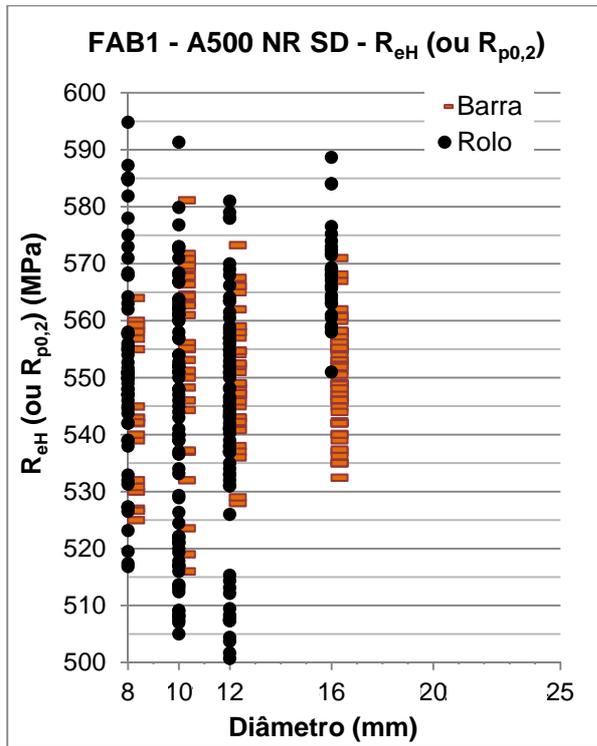


Figura 8. Tensão de cedência dos varões A500 NR SD do fabricante FAB1.

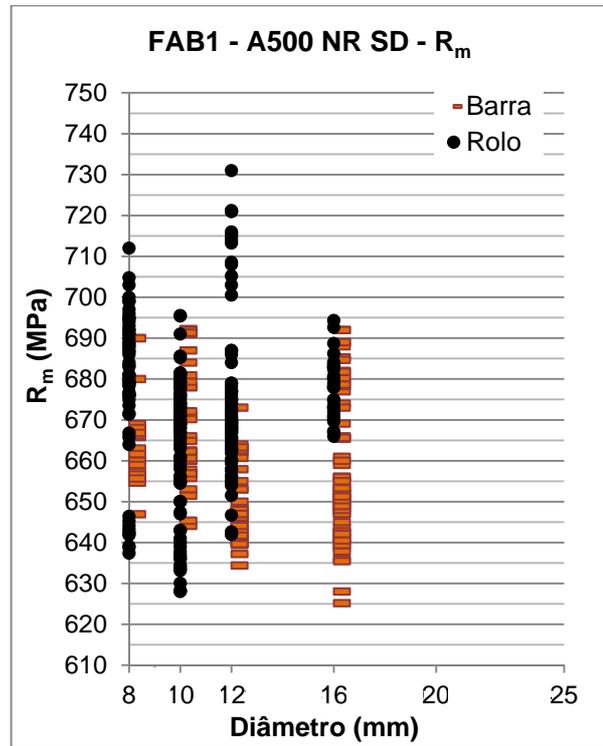


Figura 9. Tensão de rotura dos varões A500 NR SD do fabricante FAB1.

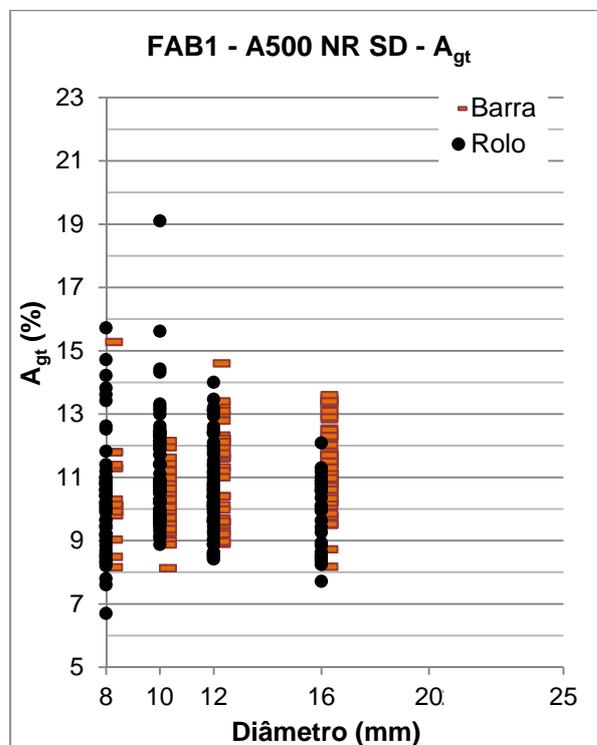


Figura 10. Extensão total na força máxima dos varões A500 NR SD do fabricante FAB1.

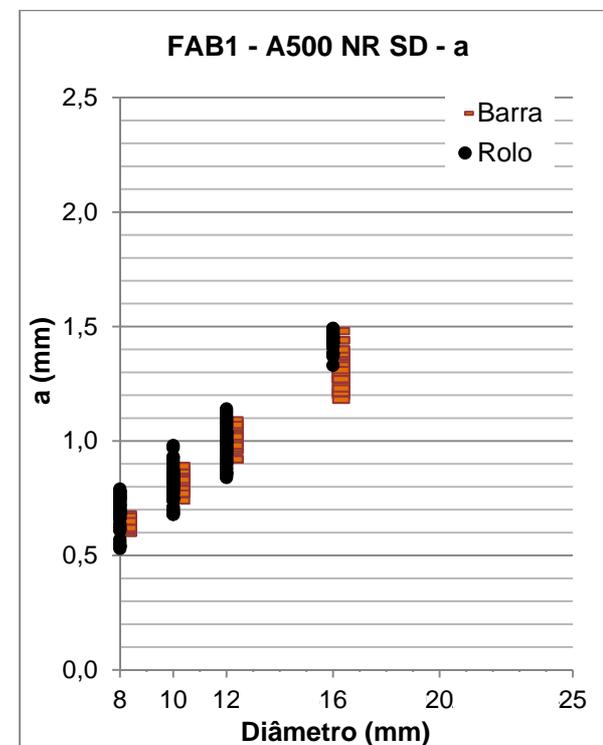


Figura 11. Altura das nervuras transversais dos varões A500 NR SD do fabricante FAB1.

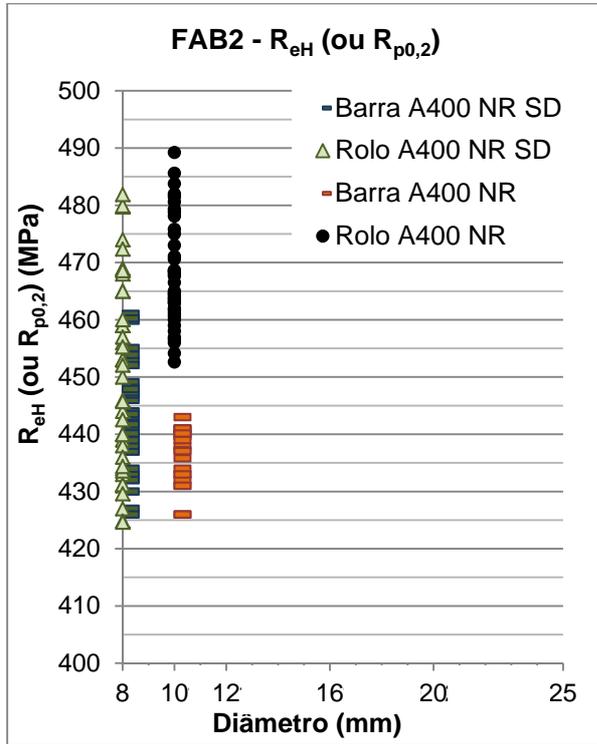


Figura 12. Tensão de cedência dos varões A400 NR e A400 NR SD do fabricante FAB2.

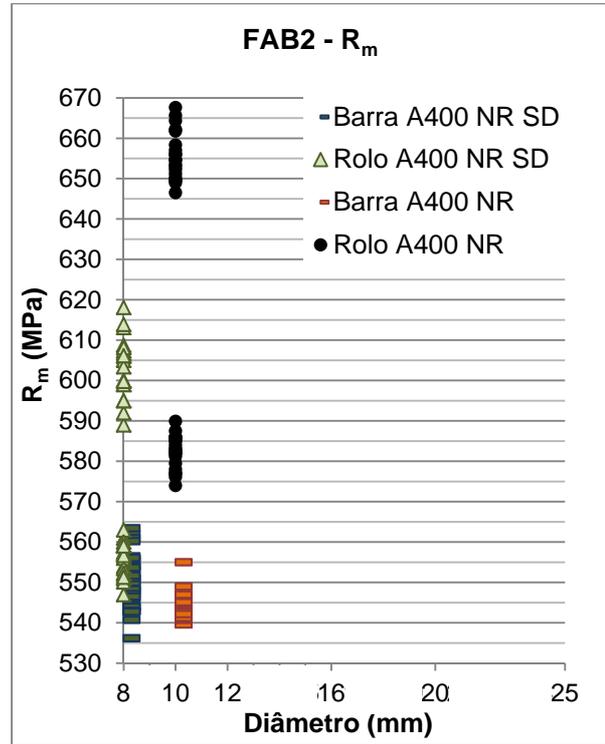


Figura 13. Tensão de rotura dos varões A400 NR e A400 NR SD do fabricante FAB2.

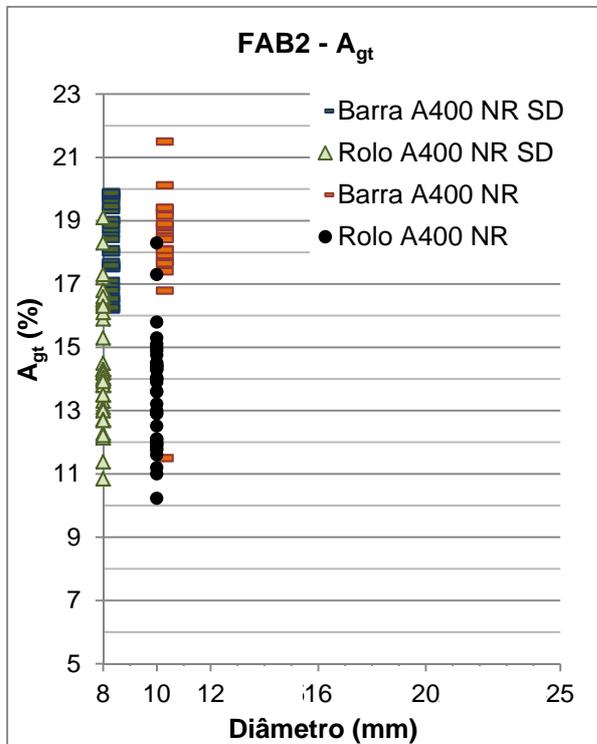


Figura 14. Extensão total na força máxima dos varões A400 NR e A400 NR SD do fabricante FAB2.

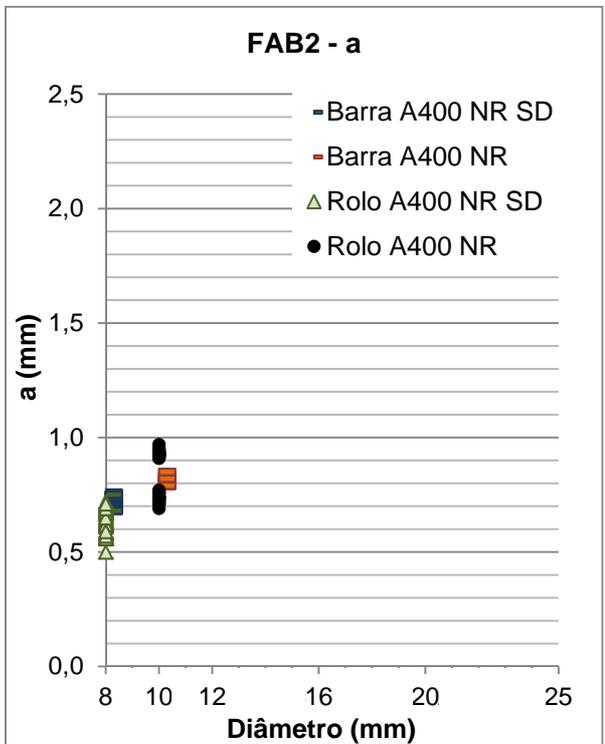


Figura 15. Altura das nervuras transversais dos varões A400 NR e A400 NR SD do fabricante FAB2.

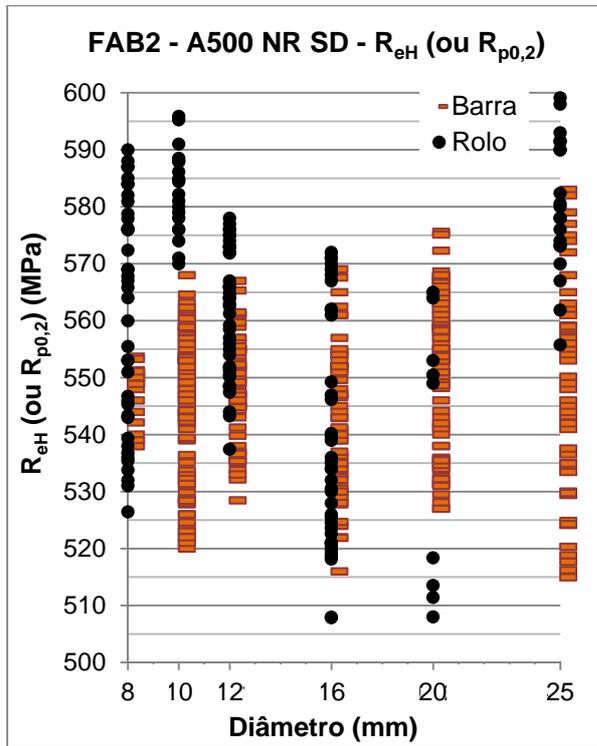


Figura 16. Tensão de cedência dos varões A500 NR SD do fabricante FAB2.

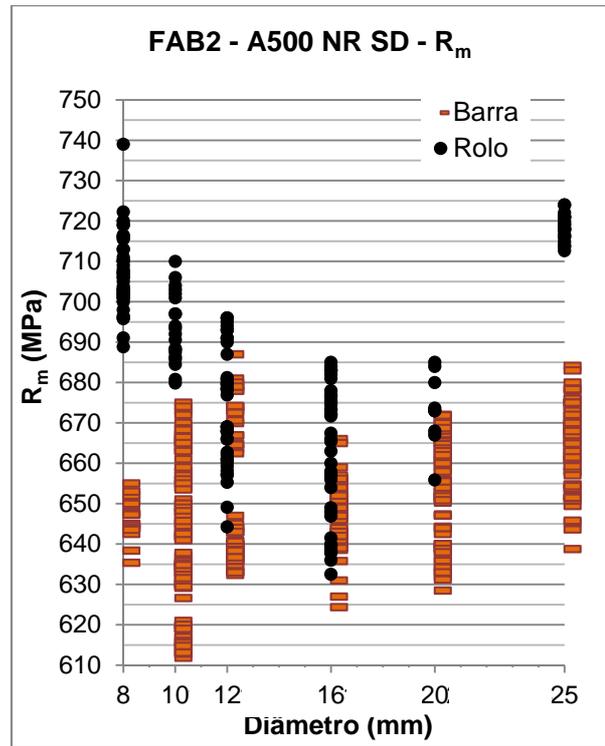


Figura 17. Tensão de rotura dos varões A500 NR SD do fabricante FAB2.

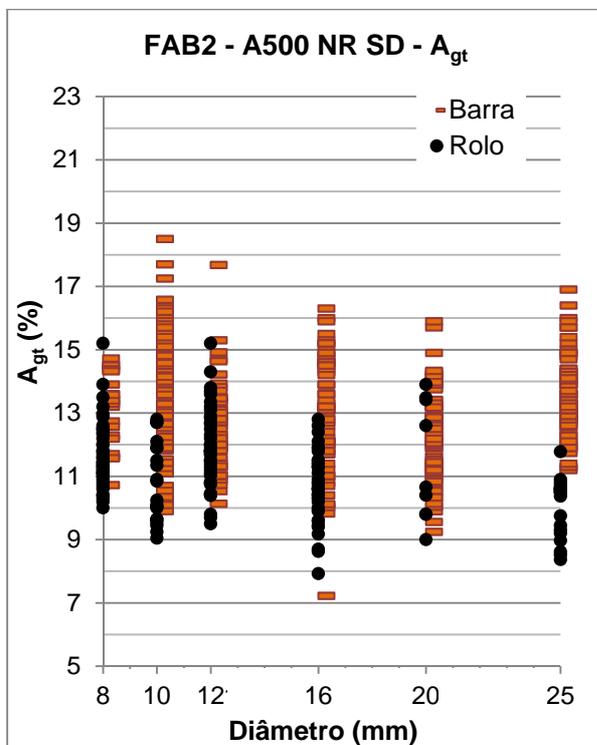


Figura 18. Extensão total na força máxima dos varões A500 NR SD do fabricante FAB2.

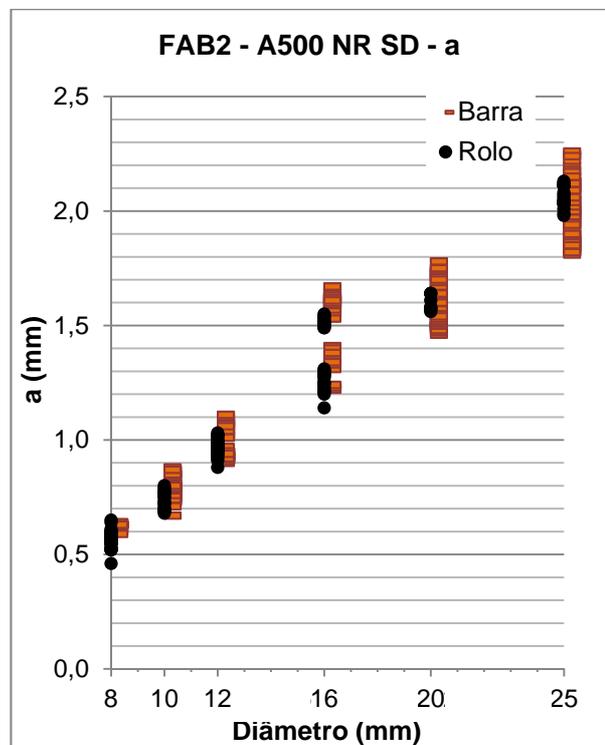


Figura 19. Altura das nervuras transversais dos varões A500 NR SD do fabricante FAB2

Estes resultados comprovam que o endireitamento dos varões de aço fabricados em rolo provoca um endurecimento do aço e a conseqüente redução da sua ductilidade. O processo de endireitamento pode ser mais gravoso nos casos dos varões com maiores diâmetros, devido às deformações plásticas introduzidas pela pressão dos mandris, embora também possa ser relevante nos casos dos varões com menores diâmetros, quando estes são submetidos a um estiramento significativo durante o seu endireitamento.

A conclusão anterior é corroborada pela representação gráfica, apresentada na Figura 20, das variações médias das características mecânicas dos varões produzidos em rolo, em relação às dos varões produzidos em troços retos, no conjunto dos vários tipos de varões fornecidos pelos dois fabricantes. Embora a variação das tensões não seja muito elevada, verificam-se diminuições acentuadas nos valores da extensão total na força máxima, A_{gt} , em alguns diâmetros.

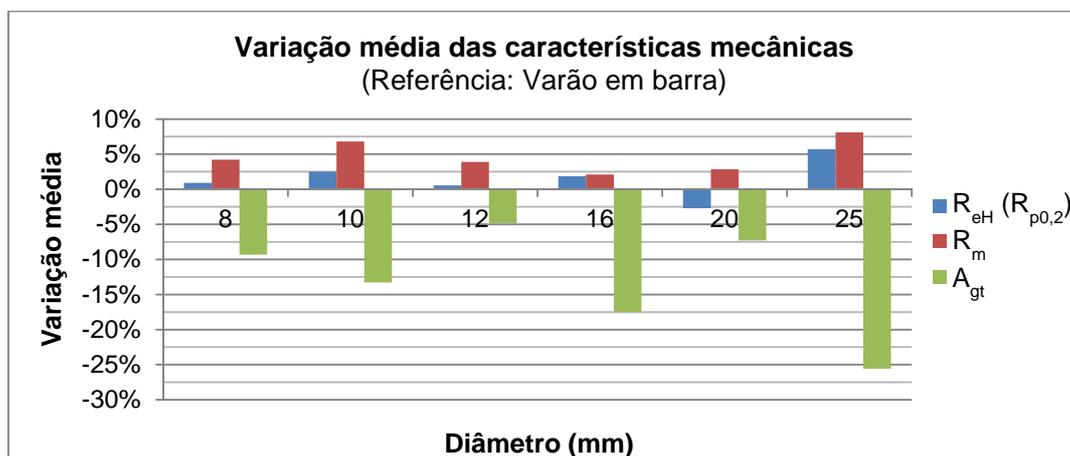


Figura 20. Variação média das características mecânicas dos varões produzidos em rolo.

Observa-se também que não existe uma relação direta entre a alteração das características mecânicas e o diâmetro do varão, o que se explica em grande parte pela elevada dispersão dos resultados. Vários fatores associados às incertezas dos resultados, como o tipo de varão, o seu fabricante e o método de ensaio podem ter uma influência importante.

Ainda no que se refere às características mecânicas dos varões, os resultados dos ensaios analisados neste trabalho exibem uma ausência do patamar de cedência em grande parte dos varões de aço produzidos em rolo. Este facto comprova o endurecimento do aço, devido ao processo de endireitamento. Mesmo no caso dos varões produzidos em rolo que possuem patamar de cedência comprovou-se uma redução do comprimento desse patamar após o seu endireitamento.

Se a influência do processo de endireitamento dos varões sobre as características mecânicas dos varões de aço fabricados em rolo parece evidente, em face dos resultados analisados, a mesma conclusão não é óbvia no que respeita às suas características de aderência.

Através da análise dos resultados dos ensaios de determinação das características geométricas das nervuras dos varões produzidos pelos dois fabricantes, constata-se que só nalguns casos se verifica uma diminuição da altura das nervuras transversais nos varões produzidos em rolo, em relação aos varões do mesmo diâmetro produzidos em troços retos.

Nos outros casos, as consequências do processo de endireitamento na redução da altura das nervuras transversais não são evidentes. Para além da dispersão elevada dos resultados referentes a esta característica, é provável que este facto possa estar relacionado com as recomendações feitas pelo LNEC, à semelhança de outros organismos europeus, de aumentar a altura das nervuras dos varões produzidos em rolo, de modo a compensar a sua posterior diminuição durante o processo de endireitamento.

Para além desta medida preventiva, é também possível que a evolução dos equipamentos e a melhoria dos processos utilizados no endireitamento dos varões tenha contribuído para evitar a degradação das suas características de aderência.

Ainda assim, verifica-se que existem casos de varões produzidos em rolo e posteriormente endireitados que apresentam nervuras transversais com alturas inferiores às dos varões produzidos em troços retos. Este facto significa que, nestes casos, as medidas preventivas atrás referidas terão sido insuficientes para compensar a deformação das nervuras durante o processo do seu endireitamento.

É ainda importante referir que os resultados analisados dizem respeito a varões produzidos em rolo e endireitados em laboratório pelos próprios fabricantes, em condições controladas, de modo a minimizar a alteração das suas características. É por isso provável que os varões recebidos em obra, endireitados pelos armadores em condições mais desfavoráveis, possam apresentar uma maior diminuição na altura das nervuras transversais, cujos valores poderão ser não só inferiores aos das nervuras dos varões produzidos em barra como, até, se situarem abaixo dos limites mínimos estipulados nos documentos normativos aplicáveis. Deste facto poderá resultar uma diminuição da eficiência da amarração das armaduras ao betão envolvente, quando aplicadas em obra.

3. SITUAÇÃO ATUAL E POSSÍVEIS MEDIDAS FUTURAS

Atualmente, a gama de diâmetros de varões que podem ser produzidos em rolo por um determinado fabricante é indicada no Documento de Classificação emitido pelo LNEC para a identificação do produto em questão. Além disso, a fim de facilitar a identificação em obra dos varões produzidos em rolo e posteriormente endireitados, o LNEC obriga à introdução de uma marca adicional (em relação aos varões produzidos em troços retos), que consiste no engrossamento de uma nervura transversal na série de nervuras transversais oposta à que contém a identificação do fabricante e do país de origem. Esta marca adicional deve ser repetida uniformemente ao longo do comprimento do varão, com um intervalo não superior a 1,50 m.

Durante o processo de Classificação do produto e ao longo do acompanhamento periódico da sua produção semestral, no âmbito da respetiva Certificação, o LNEC verifica se as características dos varões de aço em questão, incluindo os varões de aço produzidos em rolo e posteriormente endireitados, respeitam as exigências estipuladas na Especificação LNEC aplicável.

No entanto, tal como foi referido, os varões produzidos em rolo controlados pelo LNEC foram endireitados em laboratório pelos próprios fabricantes, em condições controladas, de modo a minimizar a alteração das suas características. Deste modo, as conclusões do controlo efetuado pelo LNEC no âmbito da certificação destes varões são aplicáveis apenas aos varões endireitados em condições idênticas às utilizadas pelo fabricante.

Na prática, estes varões são fornecidos sob a forma de rolo aos armadores, que asseguram o seu endireitamento antes de serem utilizados no fabrico das armaduras para elementos de betão estrutural. As condições em que o processo de endireitamento é realizado dependem da qualidade e da adequação do equipamento utilizado pelo armador, da formação e da experiência do pessoal operador, e da metodologia adotada nestas operações.

Sendo assim, não é possível garantir que, após o seu endireitamento pelo armador, as características dos varões continuam a respeitar as exigências estipuladas na correspondente Especificação LNEC, uma vez que se desconhece se as consequências do endireitamento realizado pelo armador são equivalentes às do processo utilizado pelo fabricante no endireitamento dos varões controlados pelo LNEC.

De acordo com a regulamentação em vigor, o endireitamento de varões produzidos sob a forma de rolos não é considerado processamento posterior. A entidade que efetua o endireitamento dos varões é responsável pela implementação de um procedimento interno que inclua a realização de ensaios sobre amostras do produto endireitado, de modo a confirmar que este satisfaz todos os requisitos da Especificação LNEC que lhe é aplicável. No entanto, não existe um dispositivo exterior ao armador que verifique, de forma independente, o cumprimento desta exigência.

Entre as várias hipóteses possíveis para a resolução deste problema, a implementação de um sistema de certificação dos armadores afigura-se como sendo, possivelmente, a solução mais eficaz. Existem outros países, nomeadamente na Europa, onde esta solução foi adotada e teve uma boa aceitação por parte das várias entidades envolvidas.

Devido à atual situação do mercado e às dificuldades económicas que as empresas ligadas à área da construção enfrentam, é possível que alguns dos armadores se mostrem pouco recetivos a uma solução deste tipo, pelo facto de implicar custos adicionais.

Porém, a implementação de um sistema de certificação de carácter voluntário poderá assegurar uma solução para a atual situação, com vantagens claras para o consumidor final deste produto, que pode deste modo estender a sua confiança no produto certificado (fornecido pelo respetivo fabricante) às armaduras fornecidas pelos armadores, que

asseguram o endireitamento dos varões que as integram. Por outro lado, a certificação do processo de endireitamento dos varões pelo armador constituirá uma oportunidade de melhoria da sua produção, e um atestado de qualidade dos seus serviços e dos produtos fornecidos aos seus clientes, que se poderão revelar uma vantagem bastante valiosa num mercado muito concorrencial e cada vez mais competitivo.

De um modo geral, este esquema de certificação do sistema produtivo dos armadores poderia consistir na realização de auditorias regulares às suas instalações, aos equipamentos utilizados no endireitamento dos varões e à qualificação da sua mão-de-obra para realizar esta operação. A fim de se diferenciar os produtos fornecidos pelos armadores certificados, cada uma destas entidades poderia recorrer a uma marcação própria, que seria impressa no varão após o seu endireitamento, e que evidenciaria a verificação das exigências regulamentares por parte das armaduras colocadas em obra por esse armador.

Para além da melhoria substancial do sistema de controlo da qualidade das armaduras de aço e, conseqüentemente, das construções em betão armado realizadas em Portugal, a certificação dos armadores seria vantajosa para os principais intervenientes ligados à produção e aplicação destes produtos.

Entre estes destacam-se: i) os fabricantes de varões de aço em rolo que, deste modo, não correriam o risco de ver comprometidos os seus investimentos na certificação deste produto, pelo seu posterior endireitamento defeituoso; ii) os armadores certificados, que assegurariam uma posição diferenciada da sua produção num mercado competitivo, graças à sua marcação; iii) as fiscalizações em obra, que dispõem de um mecanismo complementar ao da certificação dos varões pelos respetivos fabricantes, garantindo que, após o seu processamento pelos armadores, os varões em causa continuariam a respeitar as exigências que lhe são impostas pela regulamentação em vigor; iv) os donos de obra, os promotores imobiliários e o consumidor final, pela garantia acrescida da qualidade das armaduras utilizadas e, conseqüentemente, da conformidade da construção final com os pressupostos em que se baseia a avaliação da sua segurança, estipulada nos regulamentos e normas que definem as regras de projeto aplicáveis.

4. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho mostram que tanto as características mecânicas como as de aderência dos varões de aço produzidos em rolo sofrem alterações com o processo do seu endireitamento. Entre estas alterações destaca-se o endurecimento do aço resultante das deformações plásticas introduzidas durante as operações de endireitamento. O endurecimento do aço provoca variações nas suas características mecânicas, tais como o aumento da tensão de cedência e da tensão de rotura, e a diminuição da sua ductilidade, implicando uma redução da extensão total na força máxima e o frequente desaparecimento do patamar de cedência. Este facto pode ter conseqüências importantes no caso dos varões

de aço de ductilidade especial, cujas características particulares podem ficar comprometidas devido ao processo de endireitamento.

No caso das características de aderência, não se verificou uma diferença manifesta entre as alturas das nervuras transversais nos varões produzidos em troços retos e nos varões produzidos em rolo e posteriormente endireitados. Apesar da grande dispersão de resultados, que se supõe ser devida à aleatoriedade das deformações plásticas sofridas pelo topo das nervuras durante o processo de endireitamento, este facto poderá ser devido a um acréscimo da altura das nervuras transversais nos varões produzidos em rolo, introduzido pelos fabricantes, na sequência de recomendações feitas pelo LNEC, para compensar a sua diminuição durante o endireitamento dos varões.

Ainda assim, verificaram-se algumas situações em que a altura das nervuras transversais nos varões produzidos em rolo e posteriormente endireitados era inferior à das nervuras dos varões com o mesmo diâmetro produzidos em troços retos. Este facto significa que, nestes casos, as medidas preventivas recomendadas pelo LNEC terão sido insuficientes para compensar a deformação das nervuras durante o processo do seu endireitamento.

O facto de as diferenças registadas não serem significativas poderá também estar relacionado com o facto de os resultados analisados no presente trabalho se referirem a varões endireitados em laboratório pelos próprios fabricantes, em condições controladas, de modo a minimizar a alteração das suas características. Na prática, é provável que os varões recebidos em obra, endireitados pelos armadores em condições mais desfavoráveis, possam apresentar uma maior diminuição na altura das nervuras transversais, cujos valores poderão situar-se abaixo dos limites mínimos estipulados nos documentos normativos aplicáveis, implicando uma diminuição da eficiência da amarração das armaduras ao betão.

Se os varões produzidos em rolo e endireitados pelo fabricante são controlados através dos ensaios relativos à sua certificação, é um facto que os varões de aço endireitados pelos armadores não são objeto de qualquer controlo. Assim, não é possível garantir que um varão produzido em rolo, aplicado em obra após o seu endireitamento por um armador, possua as características mecânicas e de aderência impostas pela regulamentação aplicável.

Uma solução possível para ultrapassar este problema reside na certificação dos armadores, que, ainda que de carácter voluntário, ateste que as entidades certificadas possuem os meios necessários e adequados para a realização, em condições satisfatórias, do processo de endireitamento de varões de aço produzidos em rolo.

Pelas razões atrás expostas, este sistema de certificação dos armadores, já implementado noutros países europeus, poderá revelar-se vantajosa para os principais intervenientes ligados à produção e aplicação destes produtos, tais como os fabricantes de varões de aço em rolo, os armadores certificados que efetuam o seu posterior endireitamento, as fiscalizações em obra, os donos de obra, os promotores imobiliários e o consumidor final.

Sendo o risco sísmico em Portugal um dos principais temas de discussão na atualidade, importa criar os mecanismos necessários para eliminar as possíveis dúvidas que possam surgir sobre as características de ductilidade e de aderência das armaduras, na sequência de operações de fabrico não controladas como é o caso, atualmente, do processo de endireitamento de varões de aço pelos armadores.

REFERÊNCIAS

- [1] CEN – EN 10080:2005. *Steel for the reinforcement of concrete - Weldable reinforcing steel - General*, 2005, 69 p.
- [2] Laboratório Nacional de Engenharia Civil – *Especificação LNEC E 449:2010. Varões de aço A400 NR para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação*, 2010, 7 p.
- [3] Laboratório Nacional de Engenharia Civil – *Especificação LNEC E 450:2010. Varões de aço A500 NR para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação*, 2010, 7 p.
- [4] Laboratório Nacional de Engenharia Civil – *Especificação LNEC E 455:2010. Varões de aço A400 NR de ductilidade especial para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação*, 2010, 7 p.
- [5] Laboratório Nacional de Engenharia Civil – *Especificação LNEC E 460:2010. Varões de aço A500 NR de ductilidade especial para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação*, 2010, 7 p.
- [6] Moreira, C., Pipa, M. *Evolução do enquadramento e mercado das armaduras de aço para betão armado*, Encontro Nacional Betão Estrutural, Lisboa, 2010, 12 p.
- [7] CARES – *The CARES Guide to Reinforcing Steels. Part 2: Manufacturing Process Routes for Reinforcing Steels*, 2011, 6 p.