

## **Avaliação de resultados de ensaios cíclicos alternados sobre varões de aço para betão armado**



**António Manuel Baptista<sup>1</sup>**



**João Filipe<sup>2</sup>**

### **RESUMO**

A resistência a ações cíclicas dos varões de aço utilizados em estruturas de betão armado é uma das suas características importantes, sobretudo quando estes varões são utilizados em estruturas sujeitas a ações sísmicas. Esta característica é habitualmente avaliada através de ensaios cíclicos alternados.

Em Portugal, a colocação no mercado de produtos em aço destinados a serem utilizados como armaduras para betão armado depende do controlo periódico do fabrico destes produtos, na sequência das respetivas Ações de Acompanhamento da Certificação realizadas pela CERTIF. O Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) assegura o apoio técnico à realização destas ações que, no caso dos varões de aço de ductilidade especial, envolvem a realização de ensaios cíclicos alternados para avaliar a sua resistência a ações cíclicas.

O presente artigo apresenta um estudo de cerca de um milhar de resultados de ensaios cíclicos alternados obtidos ao longo de vários anos, no âmbito do controlo periódico do fabrico de varões de aço de ductilidade especial.

Este estudo permite concluir que, se bem que os resultados obtidos sejam satisfatórios em termos globais, a resistência a ações cíclicas destes varões pode variar significativamente com diversos parâmetros, tais como a classe de resistência do aço, o diâmetro dos varões e a sua origem (fabricante). Constatou-se igualmente que esta característica pode variar ao longo do tempo, eventualmente devido a alterações nos processos de produção.

No entanto, reconhece-se que o grau de confiança associado a estes resultados e, conseqüentemente, a estas conclusões, é muito baixo devido ao reduzido número de resultados disponíveis para cada caso particular (varões do mesmo tipo, com o mesmo diâmetro, produzidos pelo mesmo fabricante, p. ex.).

Por este motivo afigura-se necessário aumentar o número de ensaios a realizar no âmbito das Ações de Acompanhamento da Certificação destes varões, de modo a melhorar o grau de confiança associado à avaliação da sua resistência a ações cíclicas.

**Palavras-chave:** Betão armado / Certificação / Varões de aço / Resistência a ações cíclicas

<sup>1</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Lisboa, Portugal; e-mail: ambaptista@lnec.pt

<sup>2</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Lisboa, Portugal; e-mail: jfilipe@lnec.pt

## **1. INTRODUÇÃO**

A resistência a ações cíclicas dos varões de aço utilizados em estruturas de betão armado é uma das suas características importantes, sobretudo quando estes varões são utilizados em estruturas sujeitas a ações sísmicas. O ensaio cíclico alternado, utilizado para avaliar esta propriedade dos varões de aço, permite verificar se os varões conseguem suportar uma série de deslocamentos alternados em regime elastoplástico, com uma amplitude de deformação igual em compressão e em tração, antes de ocorrer a sua rotura.

Em Portugal, a colocação no mercado de produtos em aço destinados a serem utilizados como armaduras para betão armado está condicionada, para além da sua Classificação pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), pela sua prévia Certificação por um organismo acreditado no âmbito do Sistema Português Qualidade [1], [2]. O LNEC assegura o apoio técnico ao controlo periódico do fabrico destes produtos, na sequência das respetivas Ações de Acompanhamento da Certificação.

Uma das características mecânicas dos varões de aço de ductilidade especial para armaduras de betão armado [3], [4], controladas pelo LNEC, consiste na sua resistência a ações cíclicas. A experiência do controlo periódico desta característica, através da realização de ensaios cíclicos alternados, tem vindo a revelar que existem diversos fatores que podem influenciar a sua avaliação, tais como a classe de resistência do aço, o diâmetro dos varões e a dimensão das amostras ensaiadas.

O presente artigo apresenta um estudo dos resultados de ensaios cíclicos alternados obtidos ao longo de vários anos, no âmbito do acompanhamento do fabrico de varões de aço de ductilidade especial. No âmbito deste estudo procede-se a uma comparação dos resultados obtidos ao longo do tempo e para aços de diferentes classes de resistência e diversas proveniências.

## **2. O ENSAIO CÍCLICO ALTERNADO DE VARÕES DE AÇO**

O ensaio cíclico alternado de varões de aço de ductilidade especial, destinados a serem utilizados como armaduras para betão armado em Portugal, deve ser realizado segundo as Especificações LNEC E 455:2017 (A400 NR SD) [3] e LNEC E 460:2017 (A500 NR SD) [4]. De acordo com estes documentos, este ensaio consiste em submeter um provete a uma deformação axial cíclica simétrica, em tração e compressão, compreendida entre + 2,5% e - 2,5%, com uma frequência inferior a 3 Hz.

O ensaio deve ser interrompido após a aplicação de 10 ciclos completos; neste caso, o resultado do ensaio deve ser considerado satisfatório. Se a rotura total do provete ocorrer antes da aplicação de 10 ciclos completos, o resultado do ensaio deve ser considerado insatisfatório (não-conforme).

## **3. ENSAIOS NO ÂMBITO DAS AÇÕES DE ACOMPANHAMENTO DA CERTIFICAÇÃO**

As Ações a efetuar nos processos de Concessão e de Acompanhamento da Certificação de varões de aço de ductilidade especial para armaduras de betão armado devem ser realizadas de acordo com o Procedimento PE.PSG.06 da CERTIF (organismo acreditado neste domínio, no âmbito do Sistema Português da Qualidade) [5].

De acordo com este Procedimento [5], durante cada Ação de Acompanhamento, realizada com a periodicidade de um semestre, devem ser colhidas amostras de dois diâmetros entre a produção normal de cada tipo de varão produzido pelo fabricante em questão (A400 NR SD e/ou A500 NR SD). De cada diâmetro escolhido devem ser colhidas amostras de apenas um vazamento. Destas amostras é retirado um único provete, para a realização de apenas um ensaio cíclico alternado pelo LNEC. Deste modo, no âmbito das Ações de Acompanhamento da Certificação da produção de varões de ductilidade especial são realizados pelo LNEC apenas quatro ensaios por ano, ou seja: um único ensaio de cada um de dois diâmetros, duas vezes por ano (uma vez por semestre). Esta quantidade de ensaios afigura-se manifestamente insuficiente, devido ao muito baixo grau de confiança associado aos resultados obtidos, como se poderá constatar adiante.

#### 4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados de ensaios cíclicos alternados apresentados no presente artigo foram obtidos ao longo de dezasseis anos, entre 2002 e 2017. Estes ensaios foram realizados pelo LNEC sobre varões de aço A400 NR SD [3] e A500 NR SD [4], de ductilidade especial para armaduras de betão armado, de todos os diâmetros controlados e previstos nas Especificações LNEC E 455:2017 [3] e LNEC E 460:2017 (6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 14 mm, 16 mm, 20 mm, 25 mm, 32 mm e 40 mm), produzidos por quinze fabricantes diferentes.

No total, foram analisados mais de mil resultados, 43% dos quais dizem respeito a varões de aço do tipo A400 NR SD e os restantes 57% a varões de aço do tipo A500 NR SD.

Os histogramas das Figs. 1 a 12 apresentam as distribuições dos resultados disponíveis e dos resultados não-conformes (figuras ímpares), bem como da relação (expressa em percentagem) entre o número de resultados não-conformes e o correspondente número de resultados disponíveis (figuras pares), referentes aos dois tipos de varões de aço (A400 NR SD e A500 NR SD), em função do diâmetro dos varões (Figs. 1 a 4), do respetivo fabricante (Fig. 5 a 8) ou do ano em que os varões foram ensaiados (Fig. 9 a 12).

As Figs. 13 e 14 apresentam, para cada tipo de varão (A400 NR SD e A500 NR SD), a distribuição dos resultados não-conformes referentes a cada um dos diâmetros de varões ensaiados em cada um dos anos considerados neste estudo (entre 2002 e 2017). Os varões ensaiados foram produzidos por diferentes fabricantes, controlados em cada um destes anos. Os resultados não-conformes são apresentados em percentagem do número total de resultados obtidos num dado ano para o diâmetro em questão.

As Figs. 15 e 16 apresentam, para cada tipo de varão (A400 NR SD e A500 NR SD), a distribuição dos resultados não-conformes referentes ao conjunto dos varões (com diferentes diâmetros) controlados em cada um dos anos considerados (entre 2002 e 2017) e provenientes de cada um dos fabricantes (designados através dos códigos F004 a F030). Os resultados não-conformes são apresentados em percentagem do número total de resultados obtidos num dado ano para o fabricante em questão.

As Figs. 17 e 18 apresentam, para cada tipo de varão (A400 NR SD e A500 NR SD), a distribuição dos resultados não-conformes referentes a cada um dos diâmetros dos varões ensaiados, produzidos por cada um dos fabricantes (designados através dos códigos F004 a F030) ao longo de todo o período considerado (entre 2002 e 2017). Os resultados não-conformes são apresentados em percentagem do número total de resultados obtidos para o diâmetro em questão, produzido por um dado fabricante.

#### 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

##### 5.1. Análise global dos resultados

No conjunto dos resultados obtidos para os varões A400 NR SD foram obtidos 3,2% de resultados não-conformes, que não satisfazem o requisito estipulado na Especificação LNEC E 455:2017. No conjunto dos resultados obtidos para os varões A500 NR SD foram obtidos 5,3% de resultados não-conformes. Em termos globais, estes valores afiguram-se satisfatórios; no entanto, uma análise mais detalhada indicia que o número de resultados não-conformes depende fortemente de vários parâmetros, tais como a classe de resistência do aço, o diâmetro do varão, a sua origem (fabricante) e a evolução, ao longo do tempo, da sua produção.

##### 5.2. Influência do diâmetro dos varões

Através da Fig. 2 e da Fig. 4 é possível constatar que a percentagem de resultados não-conformes depende fortemente do diâmetro dos varões ( $d$ ). A maioria destes resultados foi obtida no ensaio de varões com diâmetros compreendidos entre 16 mm e 40 mm, sendo a percentagem de resultados não-conformes particularmente elevada no caso dos varões com  $d=25$  mm e  $d=32$  mm. O valor obtido para os varões A500 NR SD com  $d=40$  mm (100 % de resultados não-conformes) deve-se ao facto de ter sido ensaiado um único varão com este diâmetro ao longo de todo o período de tempo em análise.

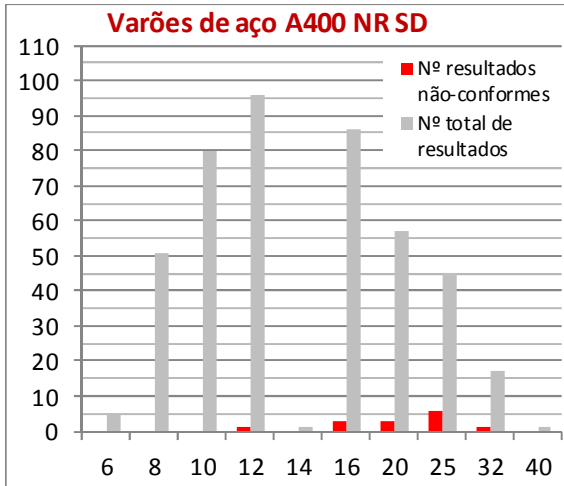


Figura 1. Distribuições dos resultados obtidos e dos resultados não-conformes, em função do diâmetro dos varões A400 NR SD.

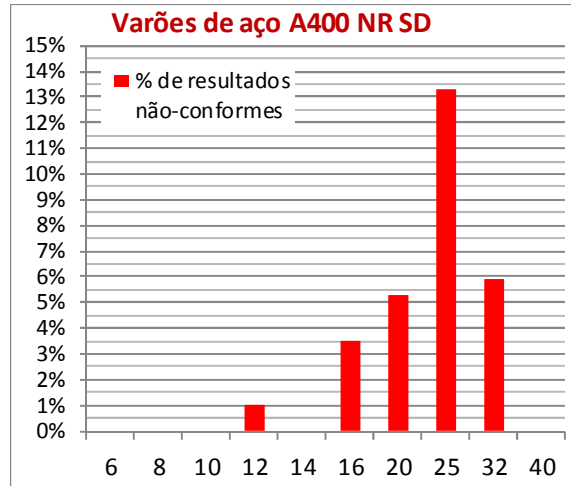


Figura 2. Percentagem de resultados não-conformes, em função do diâmetro dos varões A400 NR SD.

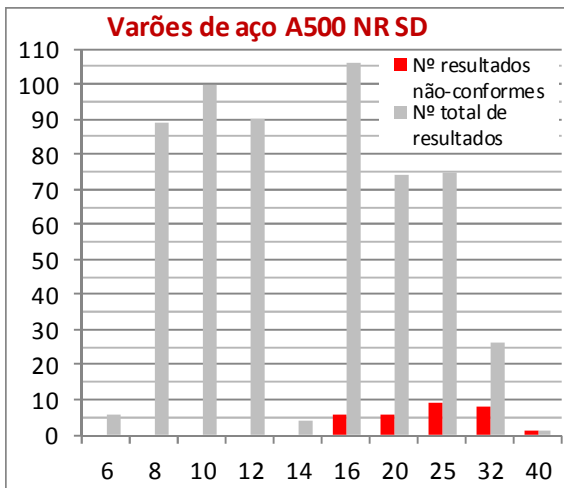


Figura 3. Distribuições dos resultados obtidos e dos resultados não-conformes, em função do diâmetro dos varões A500 NR SD.

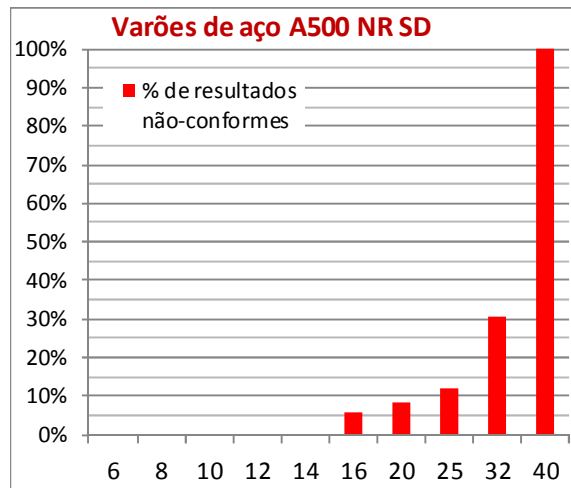


Figura 4. Percentagem de resultados não-conformes, em função do diâmetro dos varões A500 NR SD.

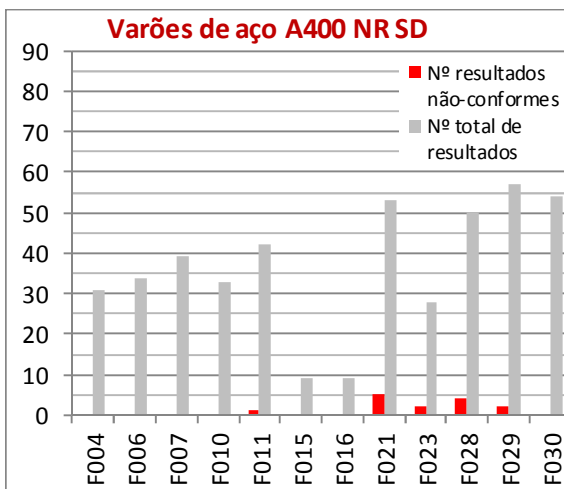


Figura 5. Distribuições dos resultados obtidos e dos resultados não-conformes, para cada fabricante de varões A400 NR SD.

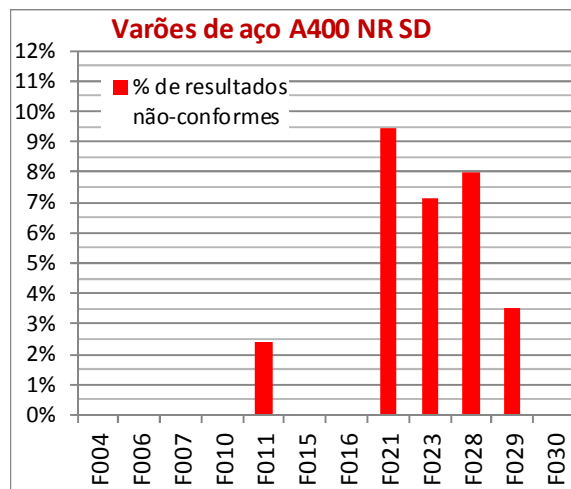


Figura 6. Percentagem de resultados não-conformes, referentes a cada fabricante de varões A400 NR SD.

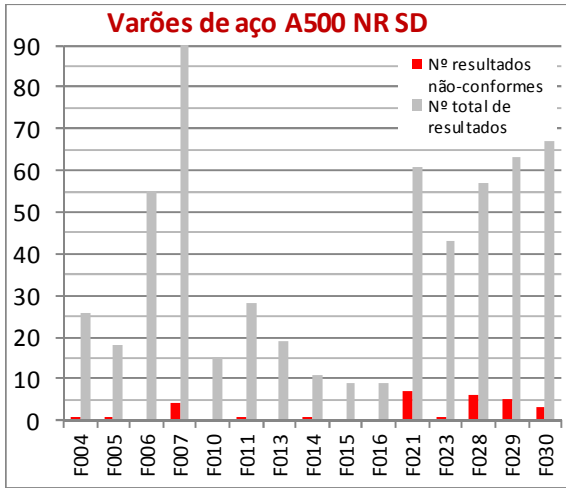


Figura 7. Distribuições dos resultados obtidos e dos resultados não-conformes, para cada fabricante de varões A500 NR SD.

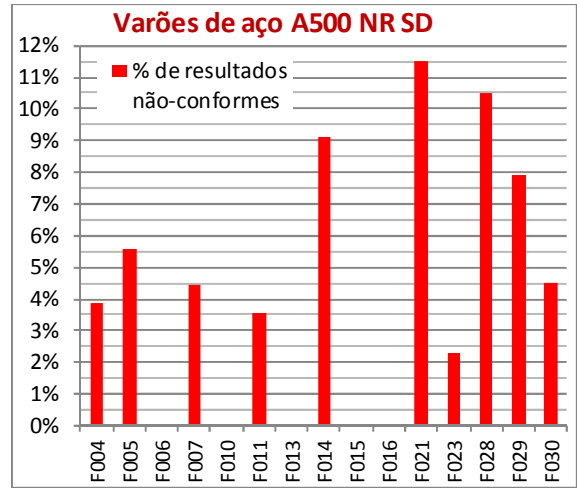


Figura 8. Percentagem de resultados não-conformes, referentes a cada fabricante de varões A500 NR SD.

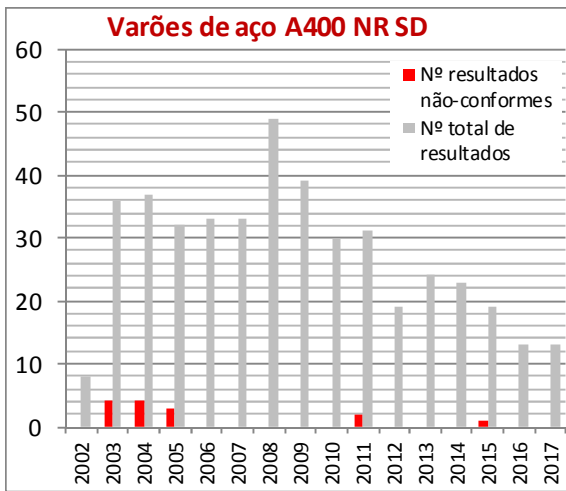


Figura 9. Distribuições dos resultados obtidos e dos resultados não-conformes, de varões A400 NR SD, obtidos entre os anos de 2002 e 2017.

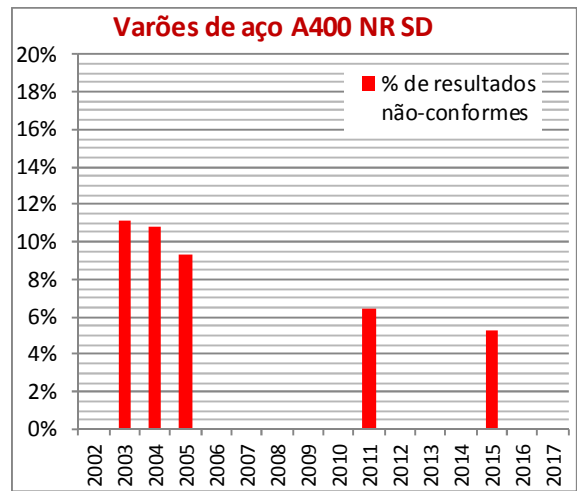


Figura 10. Percentagem de resultados não-conformes de varões A400 NR SD, obtidos entre 2002 e 2017.

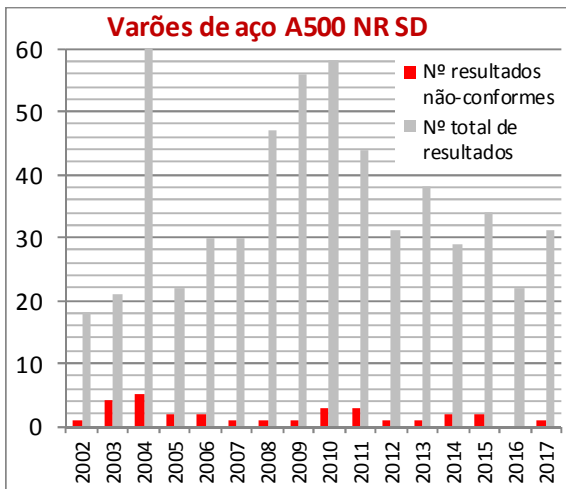


Figura 11. Distribuições dos resultados obtidos e dos resultados não-conformes, de varões A500 NR SD, obtidos entre os anos de 2002 e 2017.

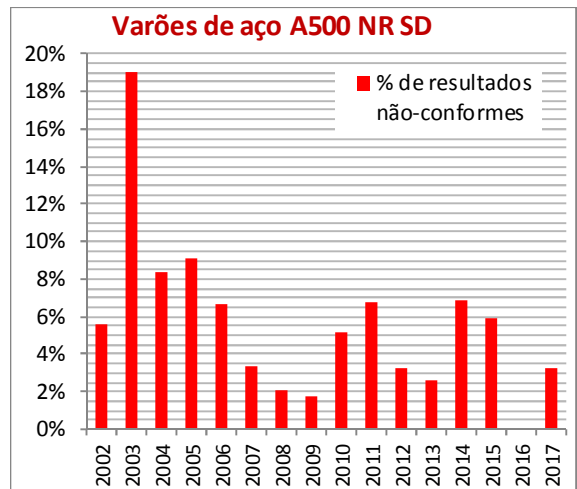


Figura 12. Percentagem de resultados não-conformes de varões A500 NR SD, obtidos entre 2002 e 2017.

## Varões de aço A400 NR SD

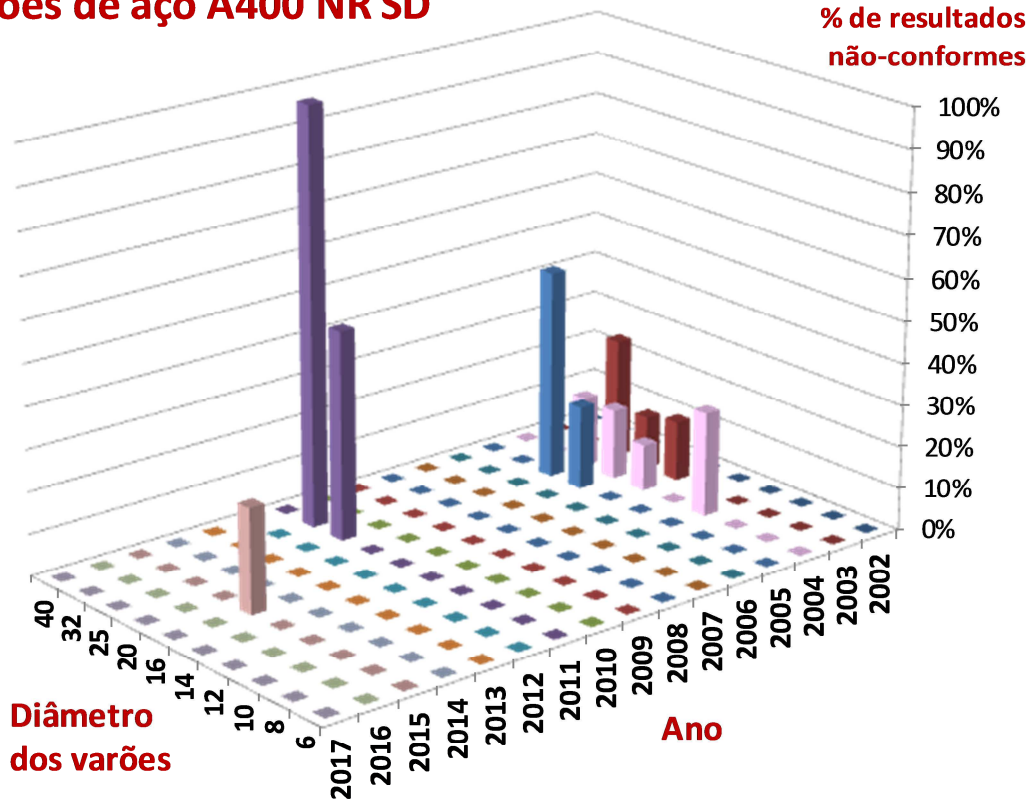


Figura 13. Percentagem de resultados não-conformes de varões A400 NR SD, obtidos em cada um dos anos compreendidos entre 2002 e 2017, para cada um dos diâmetros controlados.

## Varões de aço A500 NR SD

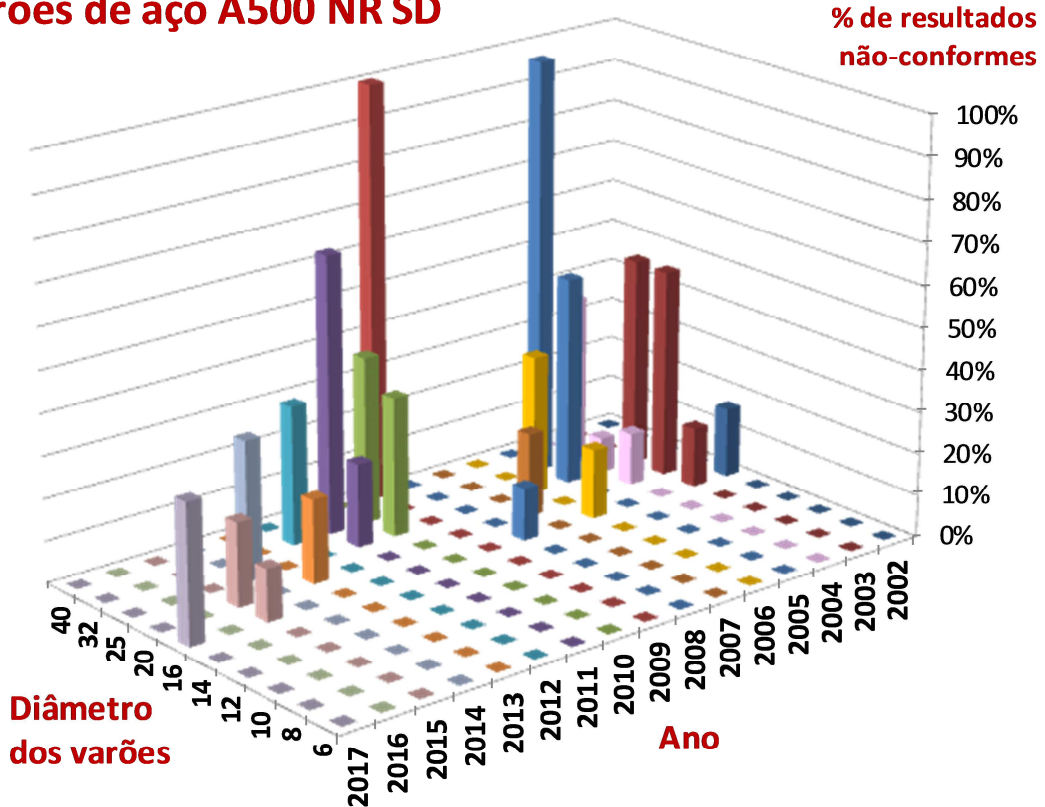


Figura 14. Percentagem de resultados não-conformes de varões A500 NR SD, obtidos em cada um dos anos compreendidos entre 2002 e 2017, para cada um dos diâmetros controlados.

## Varões de aço A400 NR SD

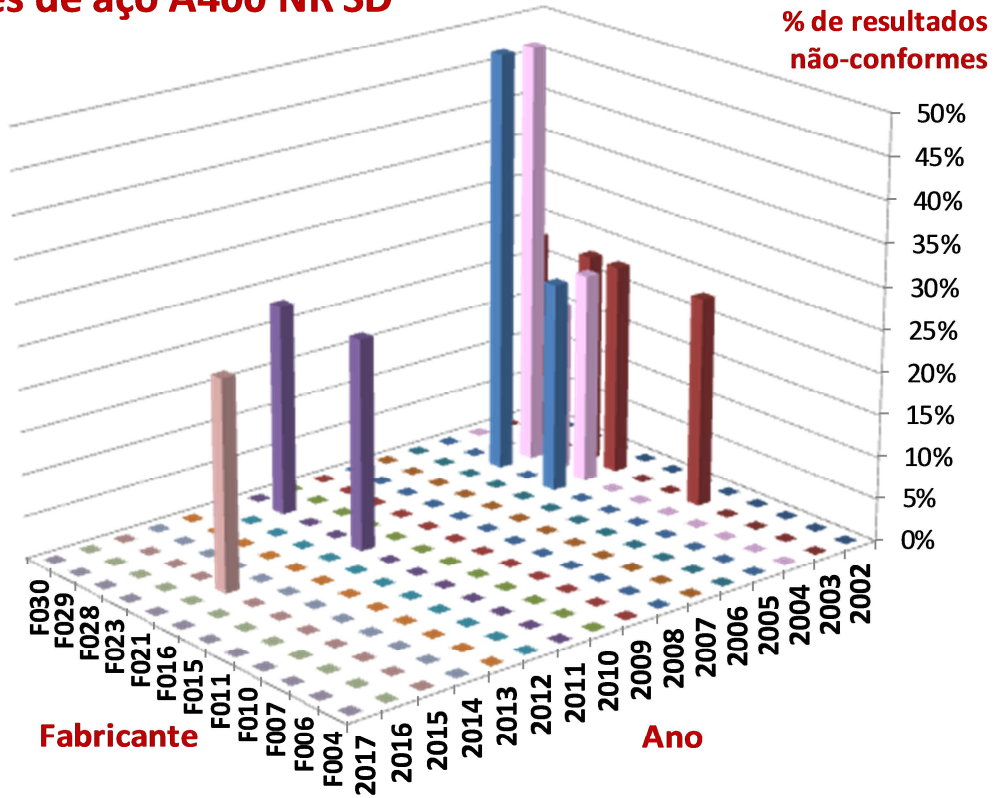


Figura 15. Percentagem de resultados não-conformes de varões A400 NR SD, obtidos em cada um dos anos compreendidos entre 2002 e 2017, para cada um dos fabricantes destes varões.

## Varões de aço A500 NR SD

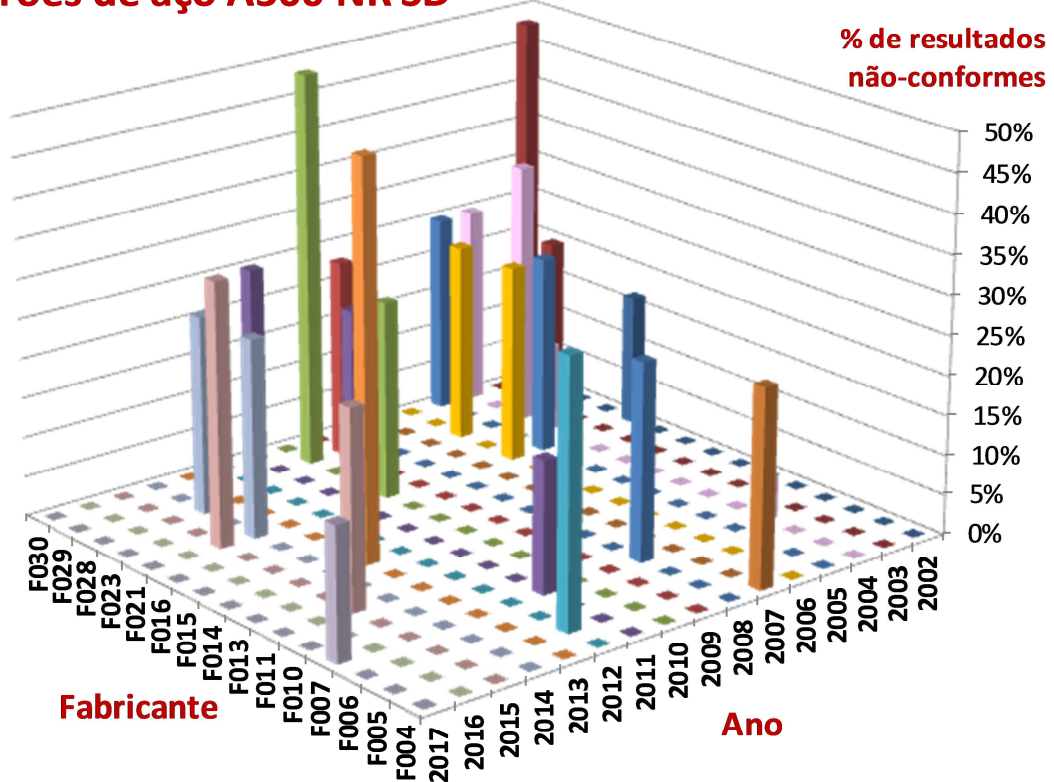


Figura 16. Percentagem de resultados não-conformes de varões A500 NR SD, obtidos em cada um dos anos compreendidos entre 2002 e 2017, para cada um dos fabricantes destes varões.

## Varões de aço A400 NR SD

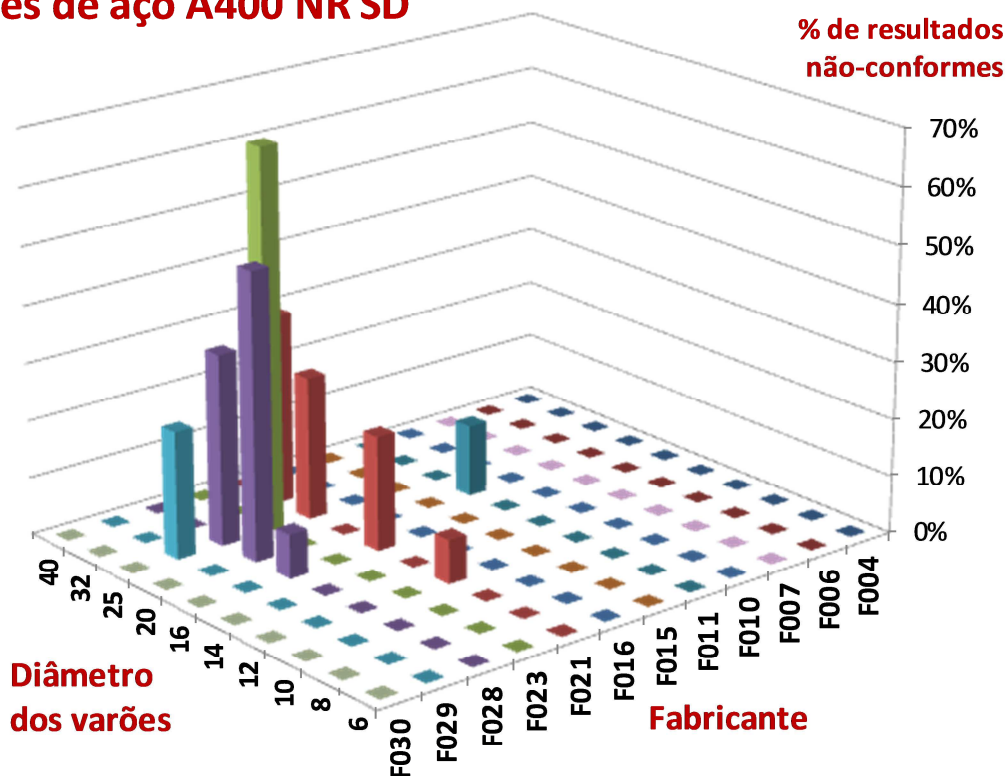


Figura 17. Percentagem de resultados não-conformes de varões A400 NR SD, referentes a cada um dos fabricantes destes varões, obtidos para cada um dos diâmetros controlados.

## Varões de aço A500 NR SD

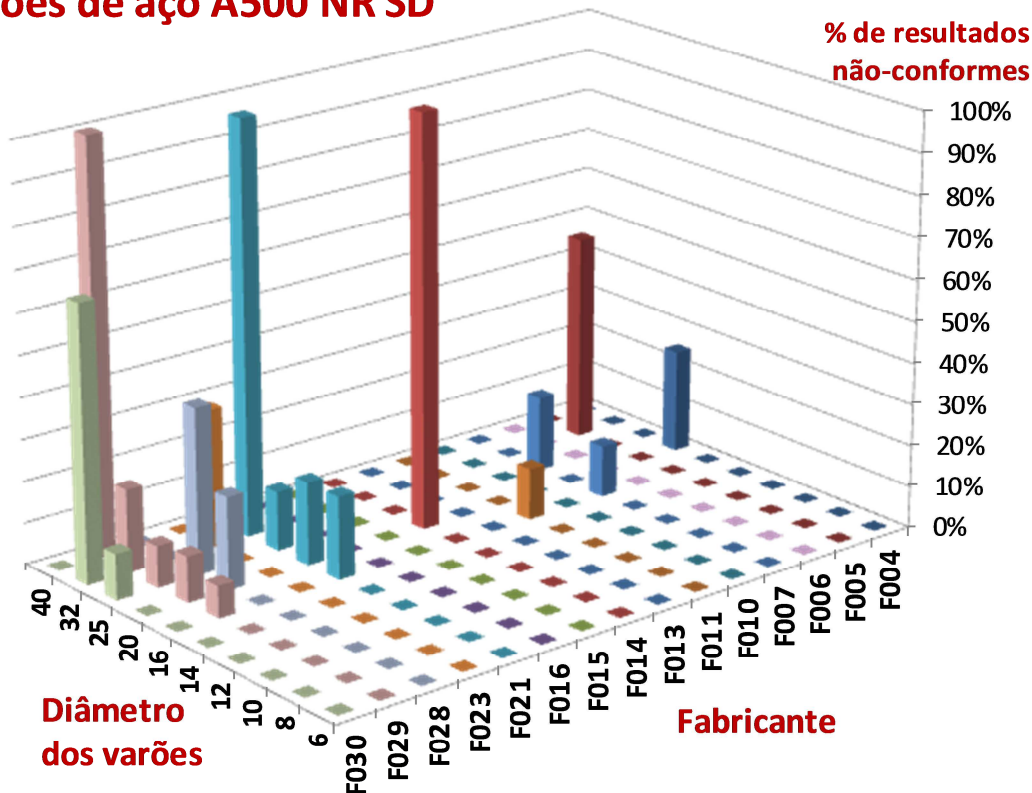


Figura 18. Percentagem de resultados não-conformes de varões A500 NR SD, referentes a cada um dos fabricantes destes varões, obtidos para cada um dos diâmetros controlados.



### **5.3. Influência da origem dos varões**

Através da Fig. 6 e da Fig. 8 é possível constatar que a percentagem de resultados não-conformes varia bastante de um fabricante para outro. No caso dos varões A400 NR SD, três dos fabricantes apresentam uma percentagem de resultados não-conformes (entre 7% e 9%) bastante mais elevada que a dos restantes nove fabricantes; de entre estes últimos, sete deles apresentam 0% de resultados não-conformes, embora seja de referir o facto de se dispor de menos de dez resultados para dois desses fabricantes.

No caso dos varões A500 NR SD, quatro dos fabricantes apresentam uma percentagem de resultados não-conformes (entre 8% e 11%) bastante mais elevada que a dos restantes onze fabricantes; de entre estes últimos apenas um apresenta mais de 5% de resultados não-conformes, embora seja de referir o reduzido número de resultados obtidos para esse fabricante. É aliás de realçar o facto de se dispor de menos de vinte resultados para cada um de 40% dos fabricantes, no conjunto dos dezasseis anos cobertos por este estudo.

### **5.4. Evolução ao longo do tempo**

A percentagem de resultados não-conformes varia também ao longo do tempo, como se pode observar na Fig. 10 e na Fig. 12. No caso dos varões A400 NR SD, os resultados não-conformes ocorreram sobretudo entre 2003 e 2005. Nestes anos, ocorreu uma percentagem de resultados não-conformes elevada (entre 9% e 11%); a partir daí só voltaram a ser registados resultados não-conformes nos anos de 2011 (6%) e 2015 (5%) e, ainda assim, em menor quantidade. No caso dos varões A500 NR SD, os resultados não-conformes ocorreram de modo mais regular, embora as percentagens mais elevadas (entre 8% e 19%) também tenham ocorrido entre 2003 e 2005.

### **5.5. Influência conjunta de diferentes parâmetros**

As análises anteriores, realizadas em função de um único parâmetro, apresentam a limitação de não refletirem a influência dos restantes parâmetros. A fim de melhor esclarecer o efeito conjunto de diferentes parâmetros, as Figs. 13 a 18 mostram as distribuições da percentagem de resultados não-conformes em função de dois parâmetros, para cada tipo de varão.

Deste modo, as Figs. 13 e 15 mostram que as maiores percentagens de resultados não-conformes de varões A400 NR SD (entre 11% e 50%) foram obtidas entre 2003 e 2005, para varões com diâmetros de 12 mm, 16 mm, 20 mm e 25 mm, produzidos essencialmente por três dos doze fabricantes. As percentagens elevadas verificadas nos anos de 2011 e de 2015 (entre 25% e 100%) devem-se essencialmente ao reduzido número de resultados disponíveis nesse ano para um mesmo diâmetro ou para um mesmo fabricante, uma vez que em cada caso foi registado apenas um resultado não-conforme.

Por sua vez, as Figs. 14 e 16 mostram que as maiores percentagens de resultados não-conformes de varões A500 NR SD (entre 25% e 50%) se distribuem de modo relativamente uniforme, entre 2003 e 2015, pela generalidade dos fabricantes, embora quase só digam respeito aos diâmetros de 16 mm, 20 mm, 25 mm e 32 mm. A percentagem de 100% registada nos anos de 2005 e de 2009 deve-se ao facto de ter sido colhido e ensaiado um único varão com os diâmetros em questão (32 mm e 40 mm).

A Fig. 17 mostra que as maiores percentagens de resultados não-conformes (entre 22% e 67%), de varões A400 NR SD ensaiados durante o período considerado neste estudo (entre 2002 e 2017), se referem a varões com diâmetros de 16 mm, 20 mm e 25 mm, produzidos essencialmente por três dos doze fabricantes. Por fim, a Fig. 18 mostra que as maiores percentagens de resultados não-conformes (entre 20% e 100%) de varões A500 NR SD, ensaiados durante o mesmo período (entre 2002 e 2017), se referem a varões com diâmetros de 16 mm, 20 mm e 25 mm, produzidos essencialmente por quatro dos quinze fabricantes.

A percentagem de 100% de resultados não-conformes, referente aos varões A500 NR SD com diâmetros de 20 mm e de 40 mm, deve-se ao facto de ter sido ensaiado um único varão de cada fabricante em questão. Porém, a percentagem de 100% referente a estes varões com 32 mm de diâmetro diz respeito a um conjunto de três resultados não-conformes obtidos para varões produzidos por um mesmo fabricante.

## **6. CONCLUSÕES**

O presente artigo apresenta um estudo dos resultados de cerca de mil ensaios cíclicos alternados de varões de aço dos tipos A400 NR SD [3] e A500 NR SD [4] realizados pelo LNEC, entre 2002 e 2017, no âmbito das Ações de Acompanhamento da Certificação destes tipos de varão.

Em termos globais, as percentagens de resultados não-conformes (3,2% no caso dos varões A400 NR SD e 5,3% no caso dos varões A500 NR SD) afiguram-se satisfatórias. No entanto, estes resultados não se repartem de forma uniforme. A sua distribuição em função do diâmetro dos varões mostra que os varões de maior diâmetro (igual ou superior a 16 mm) são os que apresentam uma percentagem de resultados não-conformes mais elevada.

A resistência às ações cíclicas também varia com a origem dos varões; a quase totalidade dos varões A400 NR SD com resultados não-conformes foi produzida por quatro dos doze fabricantes controlados. No caso dos varões A500 NR SD os resultados não-conformes encontram-se distribuídos pela generalidade dos fabricantes, embora quatro deles apresentem, no seu conjunto, cerca do triplo de resultados não conformes obtidos no conjunto dos restantes onze.

Por fim, constata-se que o número de resultados não-conformes também evoluiu ao longo do tempo. No caso dos varões A400 NR SD, a sua maioria ocorreu nos anos de 2003 a 2005; posteriormente verificaram-se algumas ocorrências em 2011 e 2015, apenas. Já no caso dos varões A500 NR SD os resultados não-conformes encontram-se distribuídos entre 2002 e 2017, embora com uma maior incidência no período compreendido entre 2003 e 2005.

Outra conclusão importante reside na constatação do muito baixo grau de confiança associado aos resultados obtidos, devido à reduzida dimensão das amostras ensaiadas em cada Ação de Acompanhamento da Certificação (um único ensaio de cada um de dois diâmetros de entre os produzidos por cada fabricante, em cada semestre). Deste facto resultam as elevadas percentagens (entre 50% e 100%) de resultados não-conformes obtidas quando a análise se restringe a um único fabricante ou a um único diâmetro, por exemplo; não parece provável que valores desta ordem de grandeza sejam representativos dos fabricantes ou dos diâmetros em questão.

Por outro lado, existem muitos casos em que a inexistência de resultados não-conformes terá resultado apenas do facto de o diâmetro ou o fabricante em questão não terem sido controlados no ano em análise; mesmo nos casos em que esse controlo ocorreu, a inexistência de resultados não-conformes poderá ter resultado apenas do baixo grau de confiança desses resultados, devido ao reduzido número de ensaios efetuados.

Em face destas conclusões afigura-se necessário aumentar o número de ensaios a realizar no âmbito das Ações de Acompanhamento da Certificação de varões de aço de ductilidade especial para armaduras de betão armado, de modo a melhorar o grau de confiança associado à avaliação da resistência destes varões a ações cíclicas.

## **REFERÊNCIAS**

- [1] Decreto-Lei nº 128/99, de 21 de abril.
- [2] Decreto-Lei nº 390/2007, de 10 de dezembro.
- [3] Especificação LNEC E 455:2017 “Varões de aço A400 NR de ductilidade especial para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação”. LNEC, 2017.
- [4] Especificação LNEC E 460:2017 “Varões de aço A500 NR de ductilidade especial para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação”. LNEC, 2017.
- [5] Procedimento PE.PSG.06 “Concessão e Acompanhamento da Certificação. Varão de aço de ductilidade especial para armaduras de betão armado”. CERTIF – Associação para a Certificação, Ed. 10 / Mai. 2017, 13 p.