

Graus de confiança na avaliação de varões de aço em Portugal. Comparação com as normas EN 10080 e ISO 6935-2

Confidence levels in the evaluation of steel rebars in Portugal.
Comparison with EN 10080 and ISO 6935-2 standards

António Manuel Baptista

Resumo

A aplicação de produtos de aço em construções de betão armado em Portugal depende da sua prévia Classificação e Certificação.

O presente artigo apresenta um estudo comparativo sobre graus de confiança conferidos pelos planos de amostragem e pelos critérios de aceitação estabelecidos nos Procedimentos de Certificação aplicados em Portugal e nas normas EN 10080 e ISO 6935-2, para diferentes características essenciais dos varões de aço, em cada ação de controlo deste produto.

Os graus de confiança associados a amostras com resultados não conformes são discutidos em pormenor, apresentando-se vários quadros e figuras com a representação da probabilidade de rejeição (ou de aceitação) de lotes não conformes, em função da dimensão das amostras e do número de resultados individuais não conformes.

É ainda analisado o critério de avaliação estipulado no Anexo Nacional da EN 13670, sobre a execução de estruturas de betão, para os ensaios de receção dos varões em obra.

Abstract

The use of steel products in reinforced concrete constructions in Portugal depends on their previous Classification and Certification.

This article presents a comparative study on the confidence levels assured by the sampling plans and acceptance criteria established in the Certification Procedures applied in Portugal and in the EN 10080 and ISO 6935-2 standards, for different essential characteristics of steel rebars, in each type of control action of this product.

The confidence levels associated to samples with non-conforming results are discussed in detail, and several tables and figures are presented, indicating the probability of rejection (or acceptance) of non-conforming batches, depending on the size of the samples and on the number of individual non-conforming results obtained in the tests.

The evaluation criterion specified in the National Annex of the European Standard EN 13670, on the execution of concrete structures, for the acceptance tests of the rebars on deliveries is also analyzed.

Palavras-chave: Betão armado / Varões de aço / Controlo do fabrico / Planos de amostragem / Inspeção por variáveis / Inspeção por atributos / Graus de confiança / Ensaios de receção

Keywords: Reinforced concrete / Steel rebars / Manufacturing control / Sampling plans / Inspection by variables / Inspection by attributes / Confidence levels / Testing on deliveries

António Manuel Baptista

Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
ambaptista@lnec.pt

Aviso legal

Os conteúdos incluídos na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The contents included in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

BAPTISTA, A. – Graus de confiança na avaliação de varões de aço em Portugal. Comparação com as normas EN 10080 e ISO 6935-2
Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas. Ed. LNEC. Série III. n.º 21. ISSN 2183-8488. (março 2023) 35-48.

1 Introdução

A utilização em Portugal dos produtos de aço para armaduras de betão armado é regulada pelo REBAP [1] ou pela Norma Europeia NP EN 1992-1-1:2010 (Eurocódigo 2, Parte 1-1) [3].

O Decreto-Lei n.º 95/2019 [4] revoga o RSA [2] e o REBAP [1], no que diz respeito à sua aplicação a estruturas de betão para edifícios, embora estes se mantenham em vigor para outros tipos de estruturas. No entanto, o referido Decreto-Lei n.º 95/2019 [4] remete para o Despacho Normativo n.º 21/2019 [5] o estabelecimento das condições para a utilização dos Eurocódigos Estruturais nos projetos de estruturas de edifícios.

O REBAP [1] e a NP EN 1992-1-1:2010 [3] especificam os tipos de armaduras e as suas principais características, estipulando, no art. 23.º do REBAP e no Anexo Nacional da NP EN 1992-1-1:2010, a obrigatoriedade da sua prévia classificação pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), a qual se traduz na emissão de um Documento de Classificação (DC).

De acordo com o Decreto-Lei n.º 390/2007 [7], a utilização em Portugal de produtos de aço destinados a serem utilizados como armaduras em betão armado está sujeita, adicionalmente à sua classificação pelo LNEC, a certificação obrigatória. Esta certificação deve ser concedida por um organismo acreditado pela entidade competente no domínio da acreditação, em conformidade com as metodologias do Sistema Português da Qualidade (art.º 4.º do Decreto-Lei n.º 390/2007 [7]).

2 Documentos normativos sobre varões de aço para betão armado

A classificação, pelo LNEC, dos varões de aço para betão armado é realizada de acordo com os requisitos estabelecidos nas respetivas Especificações LNEC [12], [13], [14], [15], [17].

Os Documentos de Classificação emitidos pelo LNEC constituem os documentos de referência na definição dos requisitos que estes varões de aço devem respeitar para que lhes seja concedida a certificação necessária à sua utilização em estruturas de betão armado em Portugal.

As ações a efetuar no âmbito da certificação destes varões de aço são descritas nos Procedimentos de Certificação [8], [9], [10], [11], produzidos pela Comissão Técnica de Certificação de Produtos Siderúrgicos (CTC 5).

Estes procedimentos nacionais de certificação dos varões de aço para betão armado (PCVA) estipulam que o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) assegura a consultoria técnica e a execução dos ensaios previstos para as ações de concessão e de acompanhamento da certificação dos referidos produtos de aço para armaduras de betão armado, à semelhança do que o LNEC vinha já garantindo nos termos do Decreto-Lei n.º 128/1999 [6].

Os PCVA estabelecem os critérios para a realização das auditorias de concessão e acompanhamento da certificação e, para cada uma destas ações, indicam as amostragens a realizar e os ensaios a efetuar sobre cada uma das amostras; além disso, os PCVA estabelecem o processo de avaliação dos resultados da auditoria e

dos ensaios, de modo a se tomar uma decisão sobre a concessão ou a manutenção de um certificado de conformidade, que permite a utilização do produto em questão em obras de betão armado realizadas em Portugal.

A Norma Europeia EN 10080:2005 [18] especifica os requisitos gerais e as definições para as características essenciais dos produtos de aço soldável para armaduras de betão armado, nomeadamente varões, produzidos sob a forma de comprimentos retos ou em rolos, e redes ou treliças eletrossoldadas.

Desde 2005, a EN 10080 tem vindo a ser submetida a um processo de revisão que, até à data presente, conduziu ao projeto de Norma Europeia prEN 10080:2022 [19].

Para além de definir as características essenciais dos referidos produtos de aço para betão armado, o prEN 10080:2022 estabelece os métodos de avaliação e verificação da constância do desempenho (Assessment and verification of constancy of performance – AVCP), através da determinação do tipo de produto, do controlo interno (pelo fabricante) da sua produção e do controlo externo por um organismo de certificação acreditado.

Em particular, tal como a EN 10080:2005 [18], o prEN 10080:2022 [19] estabelece os planos de amostragem e de ensaio aplicáveis a cada tipo de produto e para cada característica essencial, em cada um dos processos de AVCP acima referidos. Além disso, define os métodos de avaliação dos resultados dos ensaios e os critérios de verificação da conformidade destes resultados com os requisitos aplicáveis a cada uma das características essenciais.

Os planos de amostragem e de ensaio, os métodos de avaliação e os critérios de verificação da conformidade estipulados no prEN 10080:2022 apresentam algumas diferenças significativas em relação à EN 10080:2005, bem como em relação aos PCVA.

Da discussão da próxima versão da EN 10080 destaca-se a necessidade de compatibilizar os requisitos do mandato de normalização europeia M115 “Reinforcing steel for concrete” e do Regulamento dos Produtos de Construção (CPR), para a livre circulação de produtos para a construção, com os requisitos de qualidade e segurança compatíveis com os regulamentos e as normas em vigor ([1] e [3], p.ex.), nacionais ou europeus, de modo a não comprometer os níveis de confiança presumidos nestes documentos no processo de verificação da segurança das estruturas.

Ainda que, de acordo com o mandato M115 e o CPR, o desempenho associado a uma determinada característica essencial possa ser declarado pelo fabricante na sua Declaração de Desempenho (DoP - Declaration of Performance), torna-se necessário: i) por um lado, estabelecer um limite mínimo (e/ou máximo) para essa característica essencial, de modo a promover uma aplicação segura do produto, enquadrando-o num determinado tipo ou classe adotados no projeto da estrutura, e ii) estabelecer níveis de confiança mínimos para a verificação da conformidade do valor declarado pelo fabricante com o valor limite assumido no projeto.

Esta última condição é essencial para que os valores declarados por diferentes fabricantes para uma mesma característica, de um mesmo tipo de produto, sejam comparáveis (estejam associados a níveis de confiança aceitáveis e semelhantes entre si).

Esclarece-se que o prEN 10080:2022 [19], tal como a EN 10080:2005 [18], não define classes de resistência ou de ductilidade dos varões de aço, ao contrário do que acontece nas Especificações LNEC ou noutras normas de produto [20], [21].

O fabricante de um produto tem liberdade para declarar na sua DoP o valor que entender para cada uma das características essenciais desse produto, desde que a fundamentação desse valor seja suportada pelos respetivos processos de AVCP e desde que esse valor não viole o(s) respetivo(s) limite(s) estipulados na normalização europeia aplicável, que deverão ser respeitados por todos os fabricantes.

Além disso, é suposto os estados membros poderem definir requisitos adicionais, ou adotar limites mais severos que os estipulados na normalização europeia, para cada uma das características essenciais desse produto, de modo a que a sua aplicação não comprometa a filosofia de segurança existente nesse país, relativamente a construções, pessoas e bens.

A Norma Internacional ISO 6935-2:2019 [21] especifica os requisitos técnicos para varões nervurados destinados a serem utilizados como armaduras em betão armado. Tal como o prEN 10080:2022, para além de definir as características essenciais destes produtos, estabelece os métodos de avaliação da sua conformidade com os respetivos requisitos.

3 Características essenciais dos varões de aço para betão armado

O Regulamento dos Produtos de Construção (RPC), ou Construction Products Regulation (CPR) [24], que revogou a Diretiva dos Produtos de Construção (DPC) [25], estabelece regras harmonizadas para a comercialização de produtos de construção na UE.

O CPR fornece uma linguagem técnica comum para avaliar o desempenho dos produtos de construção, para que as diferentes partes interessadas (profissionais da construção, autoridades públicas e consumidores, por exemplo) possam comparar o desempenho de produtos de diferentes fabricantes em diferentes países.

Em novembro de 2016, a Comissão Europeia anunciou uma possível revisão do Regulamento dos Produtos de Construção (CPR). A proposta de regulamento revisto relativo aos produtos de construção foi adotada em 30 de março de 2022.

O Mandato de normalização europeia M115 define, em conformidade com as Basic Work Requirements BWR 1 (Mechanical resistance and stability) e BWR 2 (Safety in case of fire), estabelecidas no CPR [24], as características essenciais dos produtos para armaduras de aço para betão armado.

Esta definição encontra-se atualmente sujeita a um processo de revisão no âmbito do Processo CPR ACQUIS, promovido pela Comissão Europeia com o objetivo de assegurar a conformidade das futuras especificações técnicas europeias com o CPR [24] ou com uma futura versão revista deste Regulamento. Em particular, deverão ser definidos os métodos de avaliação dos produtos, as suas características essenciais, os métodos de ensaio aplicáveis, a forma de declaração dos resultados dos ensaios e a sua avaliação, e a definição de classes de desempenho ou de limites aplicáveis.

As características essenciais dos varões de aço para betão armado são descritas nas respetivas normas de produto, nomeadamente na Norma Europeia EN 10080:2005 [18] e, em Portugal, nas Especificações LNEC [12], [13], [14], [15], [17]. O Quadro 1 apresenta estas características essenciais, bem como a forma da sua avaliação.

Quadro 1 Características essenciais dos varões de aço para betão armado e sua avaliação

Característica essencial	EN 10080 prEN 10080	Especificações LNEC
Tensão de rotura, R_m	–	$X_{5\%}^{1)}$
Tensão de cedência, R_e	$X_{5\%}$	$X_{5\%}$
Relação $R_{e,act}/R_{e,nom}$	$X_{90\%}$	$X_{90\%}^{2)}$
Relação R_m/R_e	$X_{10\%}$	$X_{10\%}, X_{90\%}^{2)}$
Extensão total na força máxima, A_{gt}	$X_{10\%}$	$X_{10\%}$
Geometria das nervuras transversais:		
Área relativa das nervuras transversais, f_R	$X_{5\%}$	$X_{5\%}$
Altura das nervuras transversais, a	X_{min}	$X_{5\%}$
Afastamento das nervuras transversais, c	X_{min}, X_{max}	$X_{5\%}, X_{95\%}$
Inclinação das nervuras transversais, $\beta_1, \beta_2, \beta_1 - \beta_2$	X_{min}, X_{max}	$X_{5\%}, X_{95\%}$
Inclinação dos flancos das nervuras transversais, α	X_{min}	$X_{5\%}$
Perímetro sem nervuras transversais, Σf_i	X_{max}	$X_{95\%}$
Altura das nervuras longitudinais, a_l	X_{max}	$X_{95\%}$
Relação b_f/c	X_{max}	–
Composição química: C, P, S, N, Cu, C _{eq}	X_{max}	X_{max}
Dimensões e tolerâncias: $\Delta m, \Delta l, \Delta S$	X_{min}, X_{max}	$X_{5\%}, X_{95\%}$
Dobragem e dobragem/desdobragem, ϕ	X_{max}	X_{max}
Fadiga: $N, \sigma_{max}, 2\sigma_a$	X_{min}	X_{min}
Ensaio cíclico alternado: $N_{CLS}(\epsilon_c)$	X_{min}	X_{min}
Resistência a temperatura elevada, R_T, T	X_{min}	–

1) Varões de aço dos tipos A400 NR, A500 NR e A500 ER

2) Varões de aço dos tipos A400 NR SD e A500 NR SD

4 Avaliação das características essenciais

A avaliação de cada característica essencial pode ser feita por uma análise de variáveis ou por atributos.

No primeiro caso, são determinados a média e o desvio-padrão dos valores dessa característica, presumindo que estes se enquadram numa distribuição normal; em seguida é calculado um valor característico, $X_{c\%}$, correspondente a uma probabilidade especificada (c%) de não ser atingido numa hipotética série de ensaios limitada [17].

De acordo com as Especificações LNEC, um valor característico $X_{c\%}$ corresponde ao limite inferior (ou superior) de um intervalo para o qual se admite, com um grau de confiança de 90%, existirem c% de valores inferiores (ou 100% – c% de valores superiores) a esse limite.

As Especificações LNEC estabelecem limites mínimos e/ou limites máximos para os valores característicos de cada característica essencial. No caso da relação R_m/R_e , entre a tensão de rotura e a tensão de cedência, por exemplo, a Especificação LNEC E460 [17] estipula um limite mínimo de 1,15 para o valor característico $(R_m/R_e)_{10\%}$ e um limite máximo de 1,35 para o valor característico $(R_m/R_e)_{90\%}$ (ver o Quadro 1). Estes limites significam que se admite, com um grau de confiança de 90%, que existem 10% ou menos valores de R_m/R_e inferiores a 1,15 (valores não conformes) e 90% ou mais valores de R_m/R_e inferiores a 1,35, ou seja 10% ou menos valores de R_m/R_e superiores a 1,35 (valores não conformes).

O cálculo de um valor característico $X_{c\%}$ sujeito a um limite mínimo é calculado através da equação (1):

$$X_{c\%} = \bar{X} - k_{c\%,n} s \quad (1)$$

em que \bar{X} e s representam, respetivamente, a média e o desvio-padrão dos valores da amostra da característica X em análise e $k_{c\%,n}$ é um coeficiente que depende do grau de confiança, do quantilho c% do valor característico em questão e da dimensão n dessa amostra.

O cálculo de um valor característico $X_{c\%}$ sujeito a um limite máximo é calculado através da equação (2):

$$X_{c\%} = \bar{X} + k_{c\%,n} s \quad (2)$$

em que $k_{c\%,n}$ é um coeficiente que depende do grau de confiança, do quantilho c% = (100-C)% do valor característico em questão e da dimensão n dessa amostra.

O grau de confiança $\gamma = 90\%$ significa que, na aplicação de um determinado critério de avaliação de conformidade, existe uma probabilidade $\alpha = 1 - \gamma = 10\%$ de aceitar o produto controlado se esse produto for não conforme, ou seja existe uma probabilidade de 90% de rejeitar o produto controlado se esse produto for não conforme.

Assim, ainda no caso do exemplo anterior, se o valor característico $(R_m/R_e)_{10\%}$, calculado com base nos resultados de uma amostra de varões A500 NR SD [17], for igual a 1,15, existe uma probabilidade $\gamma = 90\%$ de rejeitar o lote de varões onde essa amostra foi colhida se existirem 10% de varões nesse lote com $R_m/R_e < 1,15$ (valores não conformes).

No caso de uma avaliação por atributos, o resultado de um ensaio de um varão resume-se a dois valores possíveis, “conforme” ou “não conforme” com o requisito aplicável à característica avaliada. Neste caso, a probabilidade $P_a = \alpha$ de aceitação do lote de varões em análise pode ser estimada através da equação (3), baseada na distribuição binomial e considerando o somatório do conjunto dos cenários em que o número de resultados individuais não conformes se encontra compreendido entre $x = 0$ e $x = c$:

$$P_a = \sum_{x=0}^c \frac{n!}{x!(n-x)!} p^x (1-p)^{(n-x)} \quad (3)$$

em que:

p percentagem de varões não conformes estabelecida para a característica avaliada, na população em análise;

n número total de resultados individuais da característica avaliada, obtidos nos ensaios da amostra da população em análise;

- x número de resultados individuais não conformes da característica avaliada, obtidos nos ensaios da amostra da população em análise;
- c limite máximo do número de resultados individuais não conformes, para a característica avaliada.

- iv) pelo equilíbrio entre os riscos associados aos planos de amostragem, do fabricante (de ver rejeitado um lote de produto conforme) e do consumidor (de aceitar um lote de produto não conforme), tendo em conta a sua probabilidade de ocorrência e as respetivas consequências.

5 Planos de amostragem para avaliação do desempenho do produto

O Mandato de normalização europeia M115 estabelece para todos os produtos abrangidos o sistema de avaliação e verificação da regularidade do desempenho 1+, o qual exige uma apreciação experimental do tipo de produto (Product Type Testing), um controlo contínuo da produção pelo fabricante e o seu acompanhamento por um organismo acreditado.

Os planos de amostragem previstos na EN 10080, no prEN 10080 e nos PCVA, dependem do tipo de controlo em questão (controlo interno da produção, pelo fabricante, ou controlo externo, por um organismo de certificação acreditado), do tipo de ação realizada (auditoria de concessão ou de acompanhamento da certificação), e do tipo de ensaio a que as amostras colhidas serão submetidas.

Em geral, a definição destes planos de amostragem é condicionada:

- i) pelo tipo de avaliação das características em causa, por variáveis ou por atributos;
- ii) pelos custos associados à recolha, transporte e ensaio das amostras, bem como à posterior análise dos resultados obtidos;
- iii) pelos limites de conformidade impostos pelo consumidor (diretamente ou por via de normalização ou legislação, nacional ou europeia), de modo a cumprir os requisitos básicos estabelecidos no CPR [24] e salvaguardar a segurança e a integridade das construções, das pessoas e dos bens;

No presente artigo serão discutidos, essencialmente, apenas os planos de amostragem estipulados para as ações de controlo externo da produção. O Quadro 2 indica a dimensão das amostras (número de provetes a ensaiar) a colher no decurso de cada uma destas ações.

As ações periódicas de acompanhamento (Audit Testing) são realizadas pelo menos duas vezes por ano, para cada tipo de varão de aço. O número de provetes amostrados para cada tipo de ensaio (ex: $3 \times 2 \times 10 = 60$), indicado no Quadro 2, foi calculado da seguinte forma:

$3 \times 2 \times 10 = 3$ diâmetros $\times 2$ unidades de ensaio por diâmetro $\times 10$ ensaios por unidade de ensaio.

A unidade de ensaio (test unit) é definida como uma determinada quantidade de um produto (varões de aço, p. ex.) que se presume ter sido produzida de modo uniforme, da qual é retirada uma amostra.

É possível constatar que, na fase de concessão, o número de ensaios de tração previsto nos PCVA é apenas 2/3 do estipulado na EN 10080, no caso dos varões NR e ER, e igual no caso dos varões NR SD. No caso dos ensaios de dobragem, de avaliação dos desvios de massa e de medição da geometria das nervuras transversais (aderência), o número de ensaios previsto no PCVA é duas ou três vezes superior.

O mesmo não acontece no caso dos ensaios de fadiga, em que o número de ensaios previstos nos PCVA é 15 vezes inferior ao estipulado na normalização europeia. No entanto, salienta-se o

Quadro 2 Dimensão das amostras (número de provetes a ensaiar) colhidas para cada tipo de ensaio, em cada ação de controlo da produção

Ensaio	Initial Type Testing	Product Type Testing	Concessão	Audit Testing	Audit Testing	Acompanhamento
	EN 10080	prEN 10080	PCVA	EN 10080	prEN 10080	PCVA
Tração	$3 \times 3 \times 10 = 90$	$3 \times 3 \times 10 = 90$	$3 \times 2 \times 10 = 60^{1)}$ $3 \times 3 \times 10 = 90^{2)}$	$1 \times 3 \times 10 = 30$	$1 \times 3 \times 10 = 30$	$1 \times 1 \times 10 = 10^{1)}$ $2 \times 1 \times 10 = 20^{2)}$
Aderência	$3 \times 3 \times 3 = 27$	$3 \times 3 \times 3 = 27$	$3 \times 2 \times 10 = 60^{1)}$ $3 \times 3 \times 10 = 90^{2)}$	$1 \times 3 \times 3 = 9$	$1 \times 3 \times 3 = 9$	$1 \times 1 \times 10 = 10^{1)}$ $2 \times 1 \times 10 = 20^{2)}$
Desvio da massa	$3 \times 3 \times 3 = 27$	$3 \times 3 \times 3 = 27$	$3 \times 2 \times 10 = 60^{1)}$ $3 \times 3 \times 10 = 90^{2)}$	$1 \times 3 \times 3 = 9$	$1 \times 3 \times 3 = 9$	$1 \times 1 \times 10 = 10^{1)}$ $2 \times 1 \times 10 = 20^{2)}$
Dobragem	$3 \times 3 \times 3 = 27$	$3 \times 3 \times 3 = 27$	$3 \times 2 \times 10 = 60^{1)}$ $3 \times 3 \times 10 = 90^{2)}$	$1 \times 3 \times 3 = 9$	$1 \times 3 \times 3 = 9$	$1 \times 1 \times 10 = 10^{1)}$ $2 \times 1 \times 10 = 20^{2)}$
Fadiga	$3 \times 3 \times 5 = 45$	$3 \times 3 \times 5 = 45$	$3 \times 1 = 3^{2)}$	$1 \times 3 \times 5 = 15^{3)}$	$1 \times 1 \times 5 = 5$	$1 \times 1 \times 1 = 1^{2)}$
Cíclico alternado	–	$3 \times 3 \times 1 = 9$	$3 \times 3 \times 1 = 9^{2)}$	–	$1 \times 3 \times 1 = 3$	$2 \times 1 \times 1 = 2^{2)}$

1) Varões de aço dos tipos A400 NR, A500 NR e A500 ER

2) Varões de aço dos tipos A400 NR SD e A500 NR SD

3) Número de ensaios a realizar anualmente

facto de o ensaio de fadiga ser particularmente útil na deteção de defeitos nos varões de aço, independentemente de estes poderem vir a ser submetidos a ações de fadiga ou não.

Na fase de acompanhamento da produção, o número de ensaios de tração previsto na EN 10080 é superior ao indicado nos PCVA (3 vezes superior, no caso dos varões NR e ER).

No caso dos ensaios de dobragem, de avaliação dos desvios de massa e de medição da geometria das nervuras transversais (aderência), o número de ensaios previsto nos procedimentos nacionais (PCVA) é semelhante ao da EN 10080, no caso dos varões NR e ER, ou mais do dobro no caso dos varões NR SD.

O mesmo não sucede no caso dos ensaios de fadiga; o número de ensaios previstos no PCVA [9] é 7,5 vezes (15/2) inferior ao estipulado na normalização europeia.

A situação é idêntica no caso da resistência dos varões às ações cíclicas alternadas, sendo o número de ensaios previsto no prEN 10080 ainda mais baixo. O número de ensaios previsto no PCVA [9] (dois ensaios por semestre), embora seja mais elevado que no caso da resistência à fadiga, é, ainda assim, muito reduzido. No entanto, destaca-se o facto de esta característica resistente ser muito relevante para as construções em betão armado realizadas em Portugal, devido aos riscos associados às ações sísmicas, ao contrário do que acontece noutros países europeus onde este tipo de preocupação não é tão significativo.

Salienta-se também, a propósito, o facto de o prEN 10080 [19] não requerer a realização de ensaios de fadiga nem de ensaios cíclicos alternados, no âmbito do controlo interno da produção, pelo fabricante.

Por outro lado, em Portugal, a resistência à fadiga e a resistência às ações cíclicas alternadas também não são analisadas no âmbito da avaliação dos resultados do controlo interno da produção, pelo fabricante, no seguimento das ações de acompanhamento da produção [8], [9].

A ausência de uma avaliação externa do controlo interno da resistência à fadiga e às ações cíclicas alternadas dos varões, no decurso da sua produção, aumenta a importância da avaliação destas características no âmbito dos ensaios de acompanhamento realizados pelo LNEC sobre as amostras recolhidas semestralmente pela entidade certificadora. No entanto, o número de ensaios realizado (um ou dois ensaios por semestre, respetivamente, no conjunto de diâmetros produzidos pelo fabricante) é muito reduzido, sendo o grau de confiança associado a este controlo muito baixo.

6 Avaliação das características controladas

Em face dos planos de amostragem indicados no Quadro 2, existem diferentes estratégias possíveis para a avaliação das características controladas, dependendo da maior ou menor estratificação dos resultados obtidos em função da sua origem.

Esta estratificação pode depender de diversos parâmetros, tais como o diâmetro dos varões, o lote de fabrico dos varões ou a data da sua produção.

Uma abordagem possível, prevista no prEN 10080 [19], consiste no englobamento de todos os resultados obtidos para uma determinada característica, no caso de o valor declarado pelo fabricante para essa característica, na DoP do produto em questão, ser independente do diâmetro do varão. Esta abordagem não está contemplada na norma EN 10080 em vigor [18].

No entanto, é de referir que em certos produtos se observam, por vezes, diferenças significativas entre os valores de determinadas características, em função do diâmetro dos varões e do seu lote de fabrico, apesar de o fabricante declarar o mesmo valor dessa característica para todos os varões.

Por este motivo, a prática seguida no LNEC tem consistido na análise individual de cada conjunto de resultados referentes a um mesmo diâmetro e a um mesmo lote de fabrico. Esta prática tem-se revelado adequada e conducente a avaliações geralmente satisfatórias.

Excetuam-se os casos em que a avaliação é efetuada com recurso a uma inspeção por atributos, sobretudo quando a dimensão das amostras disponíveis é muito reduzida, como acontece nos casos dos resultados dos ensaios de fadiga ou cíclicos alternados. Nestas situações, ainda que todos os resultados dos ensaios sejam satisfatórios, pode não ser possível assegurar graus de confiança significativos sem aumentar a dimensão das amostras ensaiadas.

Além disso, é de referir que existem indícios de que os resultados dos ensaios de fadiga variam com o diâmetro do varão ensaiado [26], pelo que, sendo o controlo externo realizado sobre um único diâmetro (Quadro 2), os resultados obtidos só representam, em princípio, o desempenho dos varões com o diâmetro controlado.

Julga-se por isso necessária a realização de estudos prévios para fundamentar a adoção de outras estratégias de avaliação das características controladas, tais como o englobamento de resultados obtidos a partir de amostras colhidas em diferentes ações sucessivas de acompanhamento da produção dos varões, por exemplo.

7 Graus de confiança conferidos pelos planos de amostragem

7.1 Inspeção por variáveis

Os graus de confiança conferidos pelos planos de amostragem dependem do tipo de inspeção das características, por variáveis ou por atributos, e da dimensão das amostras controladas (número de ensaios realizados). As Especificações LNEC preveem o recurso à inspeção por variáveis sempre que tal seja possível; a inspeção por atributos é aplicada apenas aos resultados dos ensaios de dobragem, de dobragem/desdobragem, de fadiga e cíclicos alternados.

A vantagem da inspeção por variáveis reside no facto de permitir ter em conta mais informação sobre a distribuição estatística dos resultados obtidos, nomeadamente a sua dispersão que, frequentemente, se encontra associada ao nível de controlo da produção e à homogeneidade das características controladas, ao longo de um único varão ou no conjunto dos varões de um mesmo lote. Além disso, através da escolha de um coeficiente $k_{c\%,n}$ adequado (ver equações (1) e (2)), de acordo com a ISO 12491 [19], é possível assegurar um determinado grau de confiança na

determinação do valor característico da característica em questão, independentemente da dimensão da amostra controlada (número de resultados disponíveis).

Como foi já referido, as Especificações LNEC estabelecem que os valores característicos devem ser determinados com um grau de confiança $\gamma = 90\%$. Esta condição significa que existe uma probabilidade $\alpha = 10\%$ ($\alpha = 100\% - \gamma$) de aceitar um lote de varões não conforme com os respetivos requisitos.

Sendo assim, no caso da determinação de um valor característico correspondente ao quantilho de 5% da distribuição da característica avaliada (1), a partir de um conjunto de 10 resultados, o valor do coeficiente $k_{5\%,10}$ é igual a 2,5684 (Quadro 3); no caso da determinação de um valor característico correspondente ao quantilho de 90% da distribuição da característica avaliada (2), a partir de 10 resultados, o valor do coeficiente $k_{10\%,10}$ é igual a 2,0657.

No caso de o valor característico ser determinado com base num conjunto de mais resultados, é possível baixar o valor do coeficiente $k_{c\%,n}$ para o mesmo grau de confiança de 90%. No entanto, faz-se notar que, se a dispersão dos resultados for grande, os valores do desvio-padrão (s) dos resultados poderão aumentar e o valor característico poderá não melhorar significativamente.

Por outro lado, um cálculo baseado num conjunto de resultados muito reduzido ($n=5$ ou $n=3$, por exemplo) pode penalizar significativamente o valor característico obtido, sobretudo se o seu desvio-padrão for elevado. Para o mesmo grau de confiança de 90%, estabelecido nas Especificações LNEC, os valores dos coeficientes $k_{c\%,n}$ utilizados no cálculo do valor característico correspondente ao quantilho de 5% subiriam, nestes casos, para $k_{5\%,5} = 3,3998$ e $k_{5\%,3} = 5,3115$, respetivamente (Quadro 3).

Quadro 3 Valores de coeficientes $k_{c\%,n}$ correspondentes a diferentes quantilhos c% e a diferentes dimensões n das amostras

	$k_{5\%,10}$	$k_{5\%,5}$	$k_{5\%,3}$	$k_{10\%,10}$	$k_{10\%,5}$	$k_{10\%,3}$
$\gamma = 90\%$	2,5684	3,3998	5,3115	2,0657	2,7423	4,2582
$\gamma = 50\%$	1,7016	1,7793	1,9384	1,3241	1,3818	1,4985
$\gamma = 20\%$	1,3127	1,2088	1,1260	0,9812	0,8826	0,7991

A EN 10080 [18] e o prEN 10080 [19] estabelecem que, a fim de verificar a declaração de desempenho (DoP), deve ser realizada uma avaliação estatística dos resultados dos ensaios, utilizando métodos normalizados (como, por exemplo, os estabelecidos na Norma Internacional ISO 12491:1997 [23]).

O prEN 10080 também adota um grau de confiança de 90%, mas apenas para a avaliação do nível de qualidade a longo prazo.

No caso particular dos ensaios de acompanhamento (audit testing) providenciados por um organismo acreditado (notified body), o prEN 10080 refere que os valores das características essenciais R_m , R_e , R_m/R_e , $R_{e,act}/R_{e,nom}$ e A_{gt} , obtidos através de ensaios de tração, podem ser considerados conformes com os valores garantidos pelo fabricante na sua declaração de desempenho (DoP) se os respetivos valores característicos, determinados com um grau de confiança $\gamma = 50\%$, forem iguais ou superiores aos limites mínimos declarados

na DoP. Este grau de confiança de 50% é muito inferior a 90% que, como foi atrás referido, é o valor estabelecido nas Especificações LNEC.

Esta condição significa que, de acordo com o prEN 10080, só é assegurada ao consumidor final uma probabilidade $\gamma = 50\%$ de que o valor característico da característica essencial em questão (R_e ou A_{gt} , por exemplo) respeita o valor limite considerado pelo projetista na verificação da segurança da estrutura e dos seus componentes, de acordo com a EN 1992-1-1:2010 (Eurocódigo 2, Parte 1-1), ou seja existe uma probabilidade $\alpha = 50\%$ ($\alpha = 100\% - \gamma$) de aceitar um lote de varões não conforme com os respetivos requisitos.

Se o grau de confiança for de 50%, os coeficientes $k_{c\%,n}$ tomam os seguintes valores: $k_{5\%,10} = 1,7016$ e $k_{10\%,10} = 1,3241$ (Quadro 3). É interessante referir que, no caso de se dispor de dez resultados, o coeficiente $k = 1,7016$ estipulado no prEN 10080 permite assegurar com um grau de confiança de 90% que não existem mais de 16% de varões não conformes na unidade de ensaio controlada nos ensaios de acompanhamento. Sendo assim, o valor característico utilizado na verificação da segurança da estrutura corresponderia, com um grau de confiança de 90%, a um quantilho de 16%, em vez de 5% conforme previsto no Anexo C do Eurocódigo 2.

O mesmo raciocínio é aplicável ao coeficiente $k = 1,3241$. No caso de se dispor de dez resultados, este coeficiente, estipulado no prEN 10080, permite assegurar com um grau de confiança de 90% que não existem mais de 23% de varões não conformes na unidade de ensaio controlada nos ensaios de acompanhamento. Neste caso, o valor característico da característica essencial em questão corresponderia, com um grau de confiança de 90%, a um quantilho de 23%, em vez de 10% conforme previsto no Anexo C do Eurocódigo 2.

Salienta-se ainda que, no caso dos ensaios de controlo interno da produção (Factory production control FPC) realizados pelo fabricante sobre cada unidade de ensaio (test unit), de modo a assegurar que o produto colocado no mercado está em conformidade com o valor declarado na sua DoP (Declaração de Desempenho), o prEN 10080 estipula, para cada característica essencial avaliada através de uma inspeção por variáveis, um grau de confiança de apenas 20%. Isto significa que existe uma probabilidade $\alpha = 80\%$ de ser aceite, e colocado no mercado, um lote de varões não conforme com a referida DoP.

Se o grau de confiança for de 20%, os coeficientes $k_{c\%,n}$ tomam os seguintes valores: $k_{5\%,10} = 1,3127$ e $k_{10\%,10} = 0,9812$ (Quadro 3). No caso de se dispor de dez resultados, o coeficiente $k = 1,3127$ estipulado no prEN 10080 permite assegurar com um grau de confiança de 90% que não existem mais de 24% de varões não conformes na unidade de ensaio controlada pelo fabricante no âmbito do controlo interno da produção. O valor característico utilizado na verificação da segurança da estrutura corresponderia então, com um grau de confiança de 90%, a um quantilho de 24%, em vez de 5% conforme previsto no Anexo C do Eurocódigo 2.

Mais uma vez, o mesmo raciocínio é aplicável ao coeficiente $k = 0,9812$. No caso de se dispor de dez resultados, este coeficiente permite assegurar com um grau de confiança de 90% que não existem mais de 32% de varões não conformes na unidade de ensaio controlada pelo fabricante no âmbito do controlo interno

da produção. Sendo assim, o valor característico da característica essencial em questão corresponderia, com um grau de confiança de 90%, a um quantilho de 32%, em vez de 10% conforme previsto no Anexo C do Eurocódigo 2.

7.2 Inspeção por atributos

7.2.1 Graus de confiança associados a amostras com todos os resultados conformes

No caso de uma inspeção por atributos, utilizada para características como a resistência à dobragem, à fadiga ou a ações cíclicas, o grau de confiança assegurado pela avaliação de uma determinada amostra é em geral menor que no caso de uma avaliação por variáveis, pois a informação fornecida pelo resultado do ensaio resume-se a dois valores possíveis, “conforme” ou “não conforme” com um determinado requisito.

O prEN 10080 estipula a realização de 45 ensaios de fadiga (3 diâmetros \times 3 unidades de ensaio por diâmetro \times 5 ensaios por unidade de ensaio) na fase de “Product Type Testing”.

Se a percentagem de varões defeituosos (não conformes) for igual a 5% da sua produção total e se, no conjunto dos 45 ensaios, todos os resultados forem satisfatórios (se o número de resultados não conformes for $x = 0$), o grau de confiança conferido por este plano de amostragem é igual a 90%, o que significa que existe uma probabilidade máxima $\alpha = 10\%$ de aceitar um lote não conforme.

Contudo, como foi já referido, existem indícios de que os resultados dos ensaios de fadiga variam com o diâmetro do varão ensaiado, pelo que, se no conjunto dos 15 ensaios referentes a um único diâmetro, todos os resultados forem satisfatórios ($x = 0$), o grau de confiança conferido por este plano de amostragem é de 54%, o que significa que existe uma probabilidade máxima $\alpha = 46\%$ de aceitar um lote não conforme.

Se a percentagem de varões não conformes for igual a 10% da sua produção total e se, no conjunto dos 45 ensaios, todos os resultados forem satisfatórios ($x = 0$), o grau de confiança conferido por este plano de amostragem é de 99%. No entanto, se forem considerados apenas os 15 ensaios referentes a um único diâmetro e todos os resultados forem satisfatórios ($x = 0$), o grau de confiança conferido por este plano de amostragem é de 80% (a probabilidade máxima de aceitar um lote de varões não conforme desse diâmetro é $\alpha = 20\%$).

Na fase de acompanhamento (Audit Testing), o prEN 10080 estipula a realização de 5 ensaios de fadiga (ver Quadro 2). Se a percentagem de varões não conformes for $p = 5\%$ da sua produção total e se, no conjunto dos 5 ensaios, todos os resultados forem satisfatórios ($x = 0$), o grau de confiança conferido por este plano de amostragem é de 23%, o que significa que existe uma probabilidade $\alpha = 77\%$ de aceitar um lote não conforme. Se p for igual a 10% e $x = 0$, a probabilidade de aceitar um lote não conforme é $\alpha = 59\%$ (grau de confiança $\gamma = 41\%$).

A dimensão das amostras a submeter a ensaios de fadiga, estipulada no PCVA [9], é bastante inferior à especificada no prEN 10080. No caso dos ensaios de concessão, o Procedimento PE.PSG.06 [9] determina a realização de 3 ensaios de fadiga e, na fase de

acompanhamento semestral, a realização de um único ensaio de fadiga (ver Quadro 2). Supondo que $p = 5\%$, se todos os resultados forem satisfatórios ($x = 0$) o grau de confiança conferido por este plano de amostragem é $\gamma = 14\%$, no caso dos ensaios de concessão, e $\gamma = 5\%$ no caso dos ensaios de acompanhamento. Neste último caso, a probabilidade máxima de aceitar um lote não conforme é, portanto, $\alpha = 95\%$.

7.2.2 Graus de confiança associados a amostras com resultados não conformes

Os graus de confiança associados aos casos anteriores poderão diminuir consideravelmente se ocorrerem um ou mais resultados não conformes ($x = 1$ ou $x = 2$, por exemplo). O Quadro 4 apresenta os graus de confiança associados aos diferentes planos de amostragem referidos no Quadro 2, para os cenários de $x = 0$, $x = 1$, $x = 2$ e $x = 3$ resultados não conformes, considerando que a percentagem (p) de varões não conformes na população estatística referente à característica em análise é de 5% ou de 10%.

Estes graus de confiança γ podem ser obtidos através da expressão $\gamma = 1 - P$, em que P representa a probabilidade máxima de aceitação de um lote não conforme ($P = \alpha$), com p ou mais varões não conformes, se forem obtidos x resultados não conformes nos ensaios de uma amostra de n varões.

O Quadro 4 mostra, por exemplo, que, no caso de ocorrerem 2 resultados não conformes, o grau de confiança γ conferido por um plano de amostragem com $n = 15$ baixa de 54% para apenas 4% quando $p = 5\%$, e de 80% para 18% quando $p = 10\%$; neste último caso, a probabilidade de rejeição de um lote não conforme, com 10% ou mais varões não conformes, baixa, portanto, de 80% para 18%.

Quadro 4 Graus de confiança γ associados a amostras com x resultados não conformes

Dimensão da amostra	$p = 5\%$				$p = 10\%$			
	$x = 0$	$x = 1$	$x = 2$	$x = 3$	$x = 0$	$x = 1$	$x = 2$	$x = 3$
$n = 45$	90%	67%	39%	19%	99%	95%	84%	67%
$n = 15$	54%	17%	4%	1%	80%	45%	18%	6%
$n = 9$	37%	7%	0,8%	0,06%	61%	23%	5%	1%
$n = 5$	23%	2%	0,1%	0,00%	41%	8%	1%	0,05%
$n = 3$	14%	0,7%	0,00%	0%	27%	3%	0,00%	0%
$n = 2$	10%	0,2%	0%	–	19%	1%	0%	–
$n = 1$	5%	0%	–	–	10%	0%	–	–

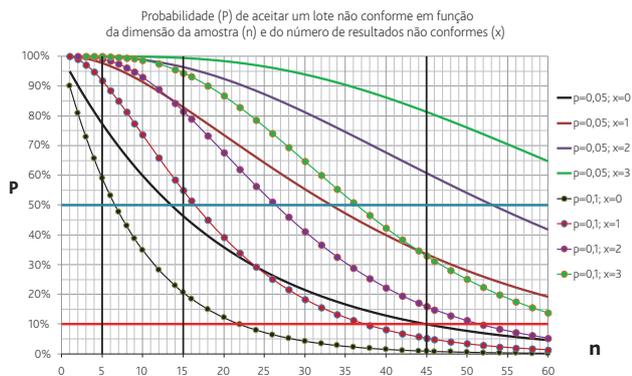


Figura 1 Probabilidade (P) de aceitar um lote com 5% ($p = 0,05$) ou 10% ($p = 0,1$) de varões não conformes, para x resultados não conformes, em função da dimensão da amostra (n)

Faz-se notar que, quando a dimensão da amostra ensaiada é muito reduzida, o grau de confiança associado a planos de amostragem envolvendo inspeção por atributos é muito sensível à ocorrência de resultados não conformes dos ensaios realizados para a avaliação da característica em questão.

A Figura 1 apresenta oito curvas correspondentes a planos de amostragem de lotes com 5% ($p = 0,05$) ou 10% ($p = 0,10$) de varões não conformes. Os valores de P correspondentes aos planos de amostragem previstos na EN 10080 ou nos PCVA (ver Quadro 2) podem ser obtidos através da interseção das linhas verticais ($n = 5$, $n = 15$ ou $n = 45$, por exemplo) com as curvas correspondentes a diferentes combinações de p e de x. Por outro lado, a dimensão das amostras (n) necessária para assegurar uma determinada probabilidade de aceitação (P) ou de rejeição ($\gamma = 1 - P$) de um lote pode ser obtida através da interseção de linhas horizontais ($P = 10\%$ ou $P = 50\%$, por exemplo) com as referidas curvas.

A título de exemplo, é possível constatar que, se todos os resultados dos ensaios realizados forem conformes ($x = 0$), serão necessários 22 ensaios para assegurar uma probabilidade $P = 10\%$ de aceitação de um lote com 10% de varões não conformes ($p = 0,10$), ou seja um grau de confiança de 90% ($\gamma = 1 - P = 90\%$) na sua rejeição; no entanto, serão necessários 45 ensaios para assegurar a mesma probabilidade ($P = 10\%$) de aceitação de um lote com 5% de varões não conformes ($p = 0,05$). Com os anteriores 22 ensaios, a probabilidade de aceitar um lote com 5% de varões não conformes ($p = 0,05$) subiria para $P = 32\%$ e o grau de confiança na sua rejeição baixaria para $\gamma = 68\%$. Quanto menor for a percentagem aceitável de varões não conformes (p), maior terá de ser o número de resultados disponível para evitar que a probabilidade de aceitar um lote não conforme possa aumentar.

Por outro lado, se um dos resultados dos ensaios for não conforme ($x = 1$), já serão necessários 38 ensaios para assegurar uma probabilidade $P = 10\%$ de aceitação de um lote com 10% de varões não conformes ($p = 0,10$); se ocorrerem dois resultados não conformes ($x = 2$), o número de ensaios necessários para assegurar a mesma probabilidade ($P = 10\%$) de aceitação de um lote com 10% de varões não conformes ($p = 0,10$) sobe para 52.

A Figura 1 mostra também que, dispondo-se de 45 resultados de ensaios (ver Quadro 2, ensaios de fadiga, EN 10080, "Initial type testing") o grau de confiança na rejeição de um lote com 5% de varões não conformes ($p = 0,05$) pode baixar de 90% ($\gamma = 1 - P = 1 - 10\%$) para 67% ($100\% - 33\%$) ou para 39% ($100\% - 61\%$), respetivamente no caso de 1 ou 2 desses 45 resultados serem não conformes (ver Quadro 4).

No caso de se dispor apenas de 5 resultados de ensaios (ver Quadro 2, ensaios de fadiga, prEN 10080, "Audit testing") o grau de confiança na rejeição de um lote com 5% de varões não conformes ($p = 0,05$) pode baixar de 23% para apenas 2% ou 0,1%, respetivamente no caso de 1 ou 2 desses 5 resultados serem não conformes (ver Quadro 4 e Figura 1).

A Figura 2 apresenta doze curvas OC (Operating Characteristic curves) do Tipo B, que representam a probabilidade de aceitação (P) de doze planos de amostragem diferentes, em função da percentagem de varões não conformes (p). Estes planos de amostragem correspondem às amostras previstas no prEN 10080 para a realização de ensaios de fadiga e cíclicos alternados, no âmbito do "Product Type Testing" e "Audit Testing" (ver Quadro 2), para os cenários de $x = 0$, $x = 1$ e $x = 2$ resultados não conformes. Os valores de P associados a estes planos de amostragem, para valores de $p = 5\%$ e $p = 10\%$ (linhas verticais na Figura 2), estão indicados no Quadro 4.

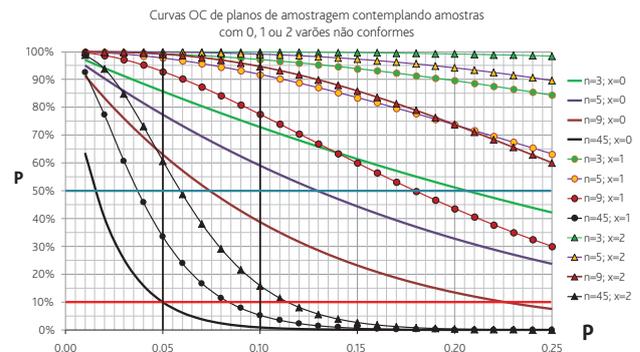


Figura 2 Curvas OC de planos de amostragem para a realização de ensaios de fadiga e cíclicos alternados previstos no prEN 10080, contemplando amostras com 0, 1 ou 2 varões não conformes

7.2.3 Graus de confiança associados a planos de amostragem dupla

Os planos de amostragem representados na Figura 2 mostram que o grau de confiança ($\gamma = 1 - P$) baixa consideravelmente quando ocorrem resultados de ensaios não conformes.

Note-se, por exemplo, que, quando ocorrerem 2 resultados não conformes no conjunto dos 5 ensaios de fadiga previstos no prEN 10080 para uma ação de acompanhamento (Audit Testing), o grau de confiança baixa de 23% para 0,1%, ou seja existe uma probabilidade máxima $P = 99,9\%$ de aceitação de um lote não conforme.

Sendo assim, o prEN 10080 prevê a realização de uma amostragem dupla, consistindo na realização de 5 ensaios de fadiga adicionais (“Re-testing”), no caso de ocorrerem $x = 1$ ou $x = 2$ resultados não conformes durante as fases de “Product Type Testing” ou de “Audit Testing”. Estes 5 ensaios adicionais devem ser realizados sobre varões com o mesmo diâmetro daqueles em que foram obtidos resultados não conformes.

De acordo com o prEN 10080, o lote será considerado conforme se os resultados de todos os 5 ensaios adicionais forem conformes. Ainda assim, faz-se notar que, no caso de se considerar um valor de $p = 0,05$, o grau de confiança de 23%, associado ao plano inicial de amostragem ($n = 5; x = 0$) cai para 8,6% ($n = 5 + 5 = 10; x = 1 + 0 = 1$) ou 1,2% ($n = 5 + 5 = 10; x = 2 + 0 = 2$) com o plano de amostragem dupla. Embora estes graus de confiança sejam superiores ao valor de 0,1% atrás referido, para ($n = 5; x = 2$), subsiste ainda uma probabilidade máxima de 81,4% ou 98,8% de aceitar um lote não conforme.

Além disso, recorda-se que o prEN 10080 [19] não requer a realização de ensaios de fadiga no âmbito do controlo interno da produção, pelo fabricante, pelo que estes ensaios, no âmbito do “Audit Testing”, são os únicos que permitem controlar a Declaração de Conformidade (DoP) do fabricante, relativamente à resistência à fadiga dos varões.

No caso dos ensaios cíclicos alternados, a situação é semelhante. Se algum dos 3 resultados referentes a um mesmo diâmetro for não conforme, procede-se ao ensaio de 3 ensaios adicionais sobre varões com o mesmo diâmetro daqueles em que foram obtidos resultados não conformes.

Ainda assim, no caso de se considerar um valor de $p = 0,05$, o grau de confiança de 14%, associado ao plano inicial de amostragem ($n = 3; x = 0$) cai para 3,3% ($n = 3 + 3 = 6; x = 1 + 0 = 1$) ou 0,2% ($n = 3 + 3 = 6; x = 2 + 0 = 2$) com o plano de amostragem dupla. Embora este grau de confiança seja superior ao valor de 0,01% correspondente à amostragem simples inicial, para ($n = 3; x = 2$), subsiste ainda uma probabilidade máxima de 99,8% de aceitar um lote não conforme.

De igual modo, o prEN 10080 [19] não requer a realização de ensaios cíclicos alternados no âmbito do controlo interno da produção, pelo fabricante, pelo que os ensaios no âmbito do “Audit Testing” são os únicos que permitem controlar a Declaração de Conformidade (DoP) do fabricante, relativamente à resistência a ações cíclicas dos varões. Salienta-se o facto de esta característica assumir uma especial relevância quando os varões são utilizados em estruturas de betão armado sujeitas a ações sísmicas, como acontece em várias zonas do território português.

8 Normalização internacional

A Norma Internacional ISO 6935-2:2019 [21] estabelece que a apreciação de varões de aço para armaduras de betão armado pode ser realizada de acordo com uma certificação, seguindo um determinado procedimento de avaliação da conformidade, ou através de ensaios de receção de um fornecimento específico.

As regras para a elaboração de um esquema de certificação da

produção contínua de varões de aço para armaduras de betão armado são especificadas na Norma Internacional ISO 10144:2018 [22].

A fim de se proceder a ensaios de receção, o fornecimento deve ser dividido em unidades de ensaio (lotes) com uma massa máxima de 50 toneladas, ou igual a uma fração deste valor. Cada unidade de ensaio deve ser constituída por varões do mesmo tipo, com o mesmo diâmetro nominal e provenientes do mesmo vazamento.

De cada unidade de ensaio deve ser colhida uma amostra, de onde devem ser retirados, pelo menos, 15 provetes de diferentes varões, a fim de determinar as suas características, identificadas na ISO 6935-2:2019 [21].

Os ensaios devem ser organizados e executados mediante acordo entre o comprador e o fabricante, respeitando a regulamentação em vigor no país onde os varões serão utilizados.

No caso de uma avaliação destas características por variáveis, deve-se proceder à estimativa do(s) respetivo(s) valor(es) característico(s) $X_{5\%}$ e, eventualmente, $X_{95\%}$, de acordo com a equação (1) ou (2), o(s) qual(is) deve(m) ser posteriormente comparado(s) com o(s) respetivo(s) limite(s). O coeficiente $k_{5\%,15}$ a utilizar nesta avaliação é $k_{5\%,15} = 2,3290$; este valor do coeficiente $k_{5\%,15}$ garante uma probabilidade máxima $\alpha = 10\%$ de aceitar um lote não conforme (sendo o grau de confiança $\gamma = 90\%$).

Se o valor característico obtido ($X_{5\%,15}$, por exemplo) não respeitar o respetivo limite, deve-se proceder ao cálculo do coeficiente k' de acordo com a seguinte equação:

$$k' = \frac{\bar{X}_{15} - X_{5\%,15}}{s_{15}} \quad (4)$$

Se o valor deste coeficiente for $k' \geq 2$, é possível proceder a ensaios adicionais (sistema de amostragem dupla) sem rejeitar de imediato o lote em avaliação. Se se considerasse $k' = k_{5\%,15} = 2,0000$, este valor do coeficiente $k_{5\%,15}$ garantiria uma probabilidade máxima $\alpha = 24,4\%$ de aceitar um lote não conforme (sendo o grau de confiança $\gamma = 75,6\%$).

No caso de $2,0000 \leq k_{5\%,15} \leq 2,3290$, deverão ser ensaiados mais 45 provetes, retirados de diferentes varões da mesma unidade de ensaio; os resultados destes 45 ensaios devem ser analisados em conjunto com os resultados dos 15 ensaios iniciais.

Sendo assim, dispõe-se de um conjunto de 60 resultados para os quais se deve proceder à estimativa do(s) respetivo(s) valor(es) característico(s) $X_{5\%}$ e, eventualmente, $X_{95\%}$, de acordo com a equação (1) ou (2), utilizando neste caso o coeficiente $k_{5\%,60} = 1,9333$; este valor do coeficiente $k_{5\%,60}$ garante uma probabilidade máxima $\alpha = 10\%$ de aceitar um lote não conforme (sendo o grau de confiança $\gamma = 90\%$). O lote em avaliação será considerado conforme com a ISO 6935-2 [21] se a condição (5) – e/ou a condição (6), dependendo da característica em avaliação – for(em) satisfeita(s) para todas as características dos varões do lote em análise:

$$\bar{X}_{60} - k_{5\%,60} s_{60} \geq X_{5\%,\min} \quad (5)$$

$$\bar{X}_{60} + k_{5\%,60} s_{60} \leq X_{95\%,\max} \quad (6)$$

No caso de uma avaliação por atributos, o lote em avaliação será considerado conforme com a ISO 6935-2 [21] se todos os 15 valores individuais de cada uma das características em análise dos varões em questão respeitarem os respetivos requisitos. Este critério de avaliação permite assegurar um grau de confiança $\gamma = 53,7\%$, ou seja uma probabilidade máxima $P = \alpha = 46,3\%$ de aceitação de um lote com 5% de varões não conformes, (ver Figura 1).

No caso de ocorrerem, no máximo, 2 resultados individuais não conformes, é possível proceder a ensaios adicionais (sistema de amostragem dupla) sem rejeitar de imediato o lote em avaliação. Este cenário corresponde a uma probabilidade $\gamma = 17,1\%$ ou $\gamma = 3,6\%$ de rejeição de um lote com 5% de varões não conformes (ver Figura 1), no caso de existirem 1 ou 2 resultados individuais não conformes, respetivamente.

Nesse caso, deverão ser ensaiados mais 45 provetes, retirados de diferentes varões da mesma unidade de ensaio; os resultados destes 45 ensaios devem ser analisados em conjunto com os resultados dos 15 ensaios iniciais. O lote em avaliação será considerado conforme com a ISO 6935-2 [21] se, no máximo, apenas 2 dos 60 resultados obtidos forem não conformes; este cenário corresponde a uma probabilidade de rejeição de um lote com 5% de varões não conformes igual a $\gamma = 81,8\%$ ou $\gamma = 58,3\%$ (ver Figura 1), no caso de existirem 1 ou 2 resultados individuais não conformes, respetivamente.

9 Ensaios de receção em obra de acordo com a NP EN 13670

A Norma Europeia EN 13670 fornece requisitos comuns para a execução de estruturas de betão, de forma que estas atinjam o nível pretendido de segurança e de utilização durante a sua vida útil, como estabelecido nas normas de cálculo estrutural, EN 1990 [28], EN 1992 [3] e EN 1994 [29], com os Parâmetros Determinados a nível Nacional (NDP) aplicáveis no local da utilização.

O Anexo Nacional NA da NP EN 13670 [27] (versão portuguesa da EN 13670) estabelece que, nas Classes de Execução 2 e 3 e, se requerido na especificação de execução, na Classe de Execução 1, a inspeção deve integrar ensaios de receção das armaduras, a realizar em laboratório para tal acreditado.

Os ensaios de receção devem incidir sobre 1 amostra por cada 50 toneladas, a recolher em obra, de varão em atado ou armadura fabricada. Os ensaios de receção consistem em 2 ensaios de tração e 1 ensaio de medição de nervuras por amostra.

Quando a especificação de execução requerer ensaios de receção de outras propriedades (como ensaios cíclicos alternados ou de fadiga, por exemplo [17]), deve ser estabelecido nessa especificação o método de ensaio, o plano de amostragem e os critérios de aceitação.

Os resultados obtidos em cada ensaio devem satisfazer os valores especificados na Especificação LNEC aplicável a cada tipo de varão de aço. Para efeito destes ensaios de receção, os valores especificados devem ser entendidos como valores-limite [27]. Se se obtiver um valor não conforme, a amostragem deve ser repetida com o dobro das amostras. Caso se repita algum resultado não conforme, o lote deve ser rejeitado.

Sendo a análise de conformidade de cada uma das características dos varões realizada por atributos, de acordo com a NP EN 13670 [27], o grau de confiança γ associado a esta análise depende fortemente do número de ensaios realizados para a avaliação de cada uma dessas características, no conjunto das amostras recolhidas em obra.

Este grau de confiança ($\gamma = 1 - P$) pode ser calculado através das curvas ($p = 0,05; x = 0$) e ($p = 0,10; x = 0$) apresentadas na Figura 1 ou através do Quadro 5. Estes graus de confiança correspondem a amostras sem resultados não conformes. No caso de se proceder a uma amostragem dupla (repetição da amostragem com o dobro das amostras), o grau de confiança associado a este critério de avaliação pode ser determinado com base na Figura 1, tendo em conta o número x de resultados não conformes e considerando n igual ao triplo da dimensão da amostra inicial.

Uma vez que os graus de confiança indicados no Quadro 5 são relativamente baixos quando a dimensão da amostra é pequena, recomenda-se, em alternativa, o recurso a uma inspeção por variáveis da característica essencial em questão, sempre que tal seja viável.

Quadro 5 Graus de confiança γ associados a amostras com n resultados conformes ($x = 0$)

Porcentagem de varões não conformes	Dimensão da amostra											
	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$	$n=8$	$n=10$	$n=12$	$n=16$	$n=20$	
$p = 5\%$	5%	10%	14%	19%	23%	26%	34%	40%	46%	56%	64%	
$p = 10\%$	10%	19%	27%	34%	41%	47%	57%	65%	72%	81%	88%	

No caso de se pretender conhecer, com um grau de confiança $\gamma = 90\%$, a percentagem (quantilho p) de varões com valores não conformes, inferiores ao valor característico (mínimo) assumido nos cálculos de verificação da segurança da estrutura, em função da dimensão n da amostra (sendo todos os resultados conformes, $x = 0$), poder-se-á recorrer ao Quadro 6. Tal como foi anteriormente referido, seriam necessários 45 resultados conformes ($n = 45, x = 0$) para garantir, com um grau de confiança de 90%, que apenas 5% dos varões apresentariam valores não conformes ($p = 5\%$).

Quadro 6 Quantilhos (p) garantidos com um grau de confiança de 90% ou de 50% por amostras com n resultados conformes ($x = 0$)

Grau de confiança	Dimensão da amostra											
	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$	$n=8$	$n=10$	$n=12$	$n=16$	$n=20$	
$\gamma = 90\%$	90%	69%	54%	44%	37%	32%	25%	21%	17%	13%	11%	
$\gamma = 50\%$	50%	29%	21%	16%	13%	11%	8,3%	6,7%	5,6%	4,2%	3,4%	

O Quadro 6 apresenta também os quantilhos p correspondentes à percentagem de varões com valores não conformes assegurados, com um grau de confiança $\gamma = 50\%$, em função da dimensão n da amostra (sendo todos os resultados conformes, $x = 0$). A título de exemplo, faz-se notar que com 14 resultados conformes

($n = 14$, $x = 0$) seria possível garantir um valor característico de 5% (percentagem de varões não conformes) com um grau de confiança de 50% (ou seja, com uma probabilidade de 50% de rejeitar um lote de varões com mais de 5% de varões não conformes).

10 Conclusões

A aplicação de produtos de aço em construções de betão armado em Portugal depende da sua prévia Classificação pelo LNEC e da sua Certificação por um organismo acreditado no âmbito do Sistema Português da Qualidade. O LNEC assegura o apoio técnico à certificação destes produtos por esse organismo, na sequência das ações de controlo do seu fabrico.

O presente artigo indica a legislação a que está sujeita a aplicação destes produtos de aço no território português, bem como os documentos normativos aplicáveis aos varões de aço para betão armado. São também fornecidas informações sobre a normalização europeia e internacional aplicável a estes varões de aço.

Após a descrição das características essenciais dos varões de aço para betão armado, consideradas nos documentos normativos, e dos diferentes métodos prescritos para a sua avaliação, é apresentada uma síntese dos planos de amostragem adotados para a avaliação do seu desempenho, para cada tipo de ensaio e em cada ação de controlo da produção.

Os planos de amostragem utilizados na avaliação das várias características essenciais dos varões de aço para betão armado estão definidos no procedimento nacional de certificação (PCVA), produzido pela Comissão Técnica de Certificação de Produtos Siderúrgicos (CTC 5), aplicável ao tipo de varão em questão [8], [9], [10], dependendo da ação de controlo em causa: concessão, controlo interno ou controlo externo.

A normalização europeia e a normalização internacional estabelecem, nalguns casos, para cada ação de controlo, planos de amostragem diferentes dos indicados nos procedimentos nacionais de certificação dos varões de aço (PCVA), bem como tipos de inspeção e critérios de aceitação distintos dos estipulados nas Especificações LNEC.

O grau de confiança (probabilidade de rejeitar o produto controlado se esse produto for não conforme) conferido por cada plano de amostragem depende do tipo de inspeção utilizado, por variáveis ou por atributos, da dimensão da amostra analisada e do critério de aceitação aplicado à característica avaliada.

Salienta-se a necessidade de estabelecer níveis de confiança mínimos para a verificação da conformidade do valor declarado pelo fabricante dos varões com o valor limite assumido no projeto da estrutura de betão armado para cada característica essencial dos varões, de modo a que os valores declarados por diferentes fabricantes para uma mesma característica, de um mesmo tipo de produto, sejam comparáveis (estejam associados a graus de confiança aceitáveis e semelhantes entre si).

Os graus de confiança associados à inspeção por variáveis de acordo com as Especificações LNEC e os PCVA são, no caso particular dos ensaios de acompanhamento, mais elevados que os conferidos pelos critérios previstos para a futura normalização europeia [19].

No caso da inspeção por atributos, os graus de confiança associados à inspeção do desvio da massa e das características de aderência e de dobragem (ou dobragem/desdobragem) dos varões, de acordo com os PCVA, também são mais elevados que os conferidos pela normalização europeia.

Porém, no caso dos ensaios de fadiga e dos ensaios cíclicos alternados, o número de ensaios previstos no PCVA é muito reduzido e inferior ao previsto para a futura normalização europeia, pelo que os respetivos graus de confiança são muito baixos. Salienta-se, além disso, o facto de o prEN 10080 [19] não requerer a realização de ensaios de fadiga nem de ensaios cíclicos alternados no âmbito do controlo interno da produção, pelo fabricante; no entanto, estes últimos podem assumir uma especial relevância quando os varões são utilizados em estruturas de betão armado sujeitas a ações sísmicas, como acontece em várias zonas do território português.

O procedimento de avaliação da conformidade, através de ensaios de receção dos varões, estipulado na Norma Internacional ISO 6935-2 confere graus de confiança, no âmbito da avaliação das características por variáveis, iguais aos preconizados nas Especificações LNEC.

No âmbito da avaliação das características por atributos, a ISO 6935-2 confere graus de confiança superiores aos dos procedimentos nacionais de certificação dos varões de aço e aos do plano de amostragem e dos critérios de aceitação dos resultados dos ensaios de receção dos varões, estipulados no Anexo Nacional da versão portuguesa da Norma Europeia EN 13670 [27] sobre a execução de estruturas de betão.

Uma vez que os graus de confiança associados a uma inspeção por atributos são relativamente baixos quando a dimensão da amostra ensaiada é pequena, recomenda-se, em alternativa, o recurso a uma inspeção por variáveis da característica essencial em questão, sempre que tal seja viável.

Referências

- [1] Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado (REBAP) – Decreto-Lei n.º 349-C/83, de 30 de julho.
- [2] Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA) – Decreto-Lei n.º 235/83, de 31 de maio.
- [3] NP EN 1992-1-1:2010 – “Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios”, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2010, 259 p.
- [4] Decreto-Lei nº 95/2019, de 18 de julho.
- [5] Despacho Normativo n.º 21/2019, de 17 de setembro.
- [6] Decreto-Lei nº 128/99, de 21 de abril.
- [7] Decreto-Lei nº 390/2007, de 10 de dezembro.
- [8] PE.PSG.01 – “Concessão e acompanhamento da certificação. Varão de aço para armaduras de betão armado”, Edição 8, junho 2017.
- [9] PE.PSG.06 – “Concessão e acompanhamento da certificação. Varão de aço de ductilidade especial para armaduras de betão armado”, Edição 10, maio 2017.
- [10] PE.PSG.10 – “Concessão e acompanhamento da certificação. Varão de aço para armaduras de betão armado A500 ER”, Edição 7, janeiro 2022.

- [11] PE.PSG.11 – “Concessão e acompanhamento da certificação. Redes eletrossoldadas para armaduras de betão armado”, Edição 9, fevereiro 2022.
- [12] Especificação LNEC E 449:2017 – “Varões de aço A400 NR para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, abril 2017.
- [13] Especificação LNEC E 450:2017 – “Varões de aço A500 NR para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, maio 2017.
- [14] Especificação LNEC E 455:2017 – “Varões de aço A400 NR de ductilidade especial para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, março 2017.
- [15] Especificação LNEC E 456:2021 – “Varões de aço A500 ER para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, outubro 2021.
- [16] Especificação LNEC E 458:2020 – “Redes eletrossoldadas para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, janeiro 2020.
- [17] 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.
- [18] EN 10080:2005 – “Steel for the reinforcement of concrete. Weldable reinforcing steel. General”, European Committee for Standardization (CEN), 2005, 69 p.
- [19] prEN 10080:2022 – “Steel for the reinforcement of concrete. Weldable reinforcing steel. General”, CEN/TC 459/SC 4, 2022-02, 87 p.
- [20] BS 4449:2005+A3:2016 – “Steel for the reinforcement of concrete. Weldable reinforcing steel. Bar, coil and decoiled product. Specification”, British Standard (BSI), 2016, 34 p.
- [21] ISO 6935-2:2019 – “Steel for the reinforcement of concrete – Part 2: Ribbed bars”, International Organization for Standardization (ISO), 2019, 25 p.
- [22] ISO 10144:2018 – “Steels for the reinforcement and prestressing of concrete. Certification scheme for steel bars and wires”, International Organization for Standardization (ISO), 2018, 9 p.
- [23] ISO 12491:1997 – “Statistical methods for quality control of building materials and components”, International Organization for Standardization (ISO), 1997, 30 p.
- [24] Regulamento dos Produtos de Construção (RPC) – Regulamento (UE) n.º 305/2011 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 9 de março de 2011 (plena entrada em vigor em 1 de julho de 2013).
- [25] Diretiva dos Produtos de Construção (DPC) – Diretiva n.º 89/106/CEE do Conselho, de 21 de dezembro de 1988.
- [26] Baptista, A. M.; Filipe, J. (2016) – “Avaliação de resultados de ensaios de fadiga sobre varões de aço para betão armado”, II Encontro Luso-Brasileiro de Degradação das Estruturas de betão, setembro 2016, 12 p.
- [27] NP EN 13670:2011 – “Execução de estruturas de betão”, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2011, 83 p.
- [28] NP EN 1990:2009 – “Eurocódigo – Bases para o projecto de estruturas”, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2009, 88 p.
- [29] NP EN 1994-1-1:2011 – “Eurocódigo 4 – Projecto de estruturas mistas aço-betão. Parte 1 1: Regras gerais e regras para edifícios”, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2011.

