

Comportamento de vigas de betão armado com aço inoxidável



Ana S. Louro¹



Manuel Pipa¹

RESUMO

Na presente comunicação apresentam-se os resultados de um programa experimental de ensaios de vigas armadas com quatro tipos de varões nervurados de aço inoxidável, dois dos quais com composições de baixo custo, que foram desenvolvidos no âmbito de um projecto de investigação europeu em que o LNEC participou designado por: HIPER – “*Increased infrastructure reliability by developing a low cost and high performance stainless steel rebars*”.

Foi ensaiado um conjunto de 12 vigas simplesmente apoiadas, com 4,0m de comprimento e 35cm de altura, executadas com dois tipos de betão (C35/45 e C60/75) e armadas com varões do tipo A500 NR (vigas de referência) e com diferentes tipos de varões de aço inoxidável.

Os resultados obtidos permitiram fundamentalmente avaliar e comparar o comportamento até à rotura das vigas armadas com os diversos tipos de aço e com os betões de resistência normal e alta. Em face da elevada resistência de alguns tipos de aço inoxidável, analisaram-se sobretudo as consequências que a modificação da geometria das vigas (por redução de recobrimento e consequente aumento da altura útil nas vigas com armaduras de aço inoxidável) pode ter, em termos de estados limites de utilização, nomeadamente a análise da fendilhação e da deformação destes elementos.

Dentro das limitações do estudo efectuado, os resultados obtidos confirmaram que os modelos analíticos considerados pelo Eurocódigo 2 para prever as deformações e a abertura de fendas em vigas sujeitas a flexão continuam a poder ser aplicados, quando são usadas armaduras de aço inoxidável.

Nesta comunicação salienta-se que a utilização de armaduras de aço inoxidável se pode traduzir numa solução vantajosa quer em termos de durabilidade das estruturas quer a nível económico, caso se recorra à utilização de aços inoxidáveis de elevada resistência mecânica e boa resistência à corrosão.

PALAVRAS-CHAVE

Varões de aço inoxidável, vigas de betão armado, durabilidade de estruturas, comportamento em serviço, prevenção da corrosão.

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Núcleo de Comportamento de Estruturas, 1700-066 Lisboa, Portugal. analouro@lnec.pt, mpipa@lnec.pt

1. INTRODUÇÃO

A corrosão das armaduras ordinárias é uma das principais causas da deterioração das estruturas de betão armado. Apesar de existirem inúmeras técnicas para garantir a durabilidade de uma estrutura, quando se pretende uma vida útil elevada, têm vindo a ser usados diversos métodos como sejam a protecção das armaduras com filmes à base de resinas epoxídicas ou através de galvanização, a redução da relação água/cimento, o aumento do recobrimento, a adição de produtos inibidores de corrosão ao betão, a protecção catódica e os revestimentos do betão do tipo membrana [1].

Todavia, recorrer a estas soluções implica necessariamente assumir elevados custos de manutenção e de reparação das estruturas, uma vez que estas soluções não resolvem à partida o fenómeno da corrosão. Assim, a procura e a utilização de armaduras de aço inoxidável tem sido crescente, sobretudo porque se verifica que as estruturas executadas com este material podem atingir uma vida útil superior a 100 anos, sem necessidade de manutenções significativas [2].

Contudo, apesar do bom desempenho das estruturas de betão com armaduras de aço inoxidável, como o seu custo inicial limita bastante a sua utilização, a procura de aços inoxidáveis de baixo custo é uma das preocupações da investigação que se desenvolve nesta área [3], [4].

2. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL DESENVOLVIDO

2.1. Dimensionamento e concepção dos modelos de viga

Foram executadas na sala de ensaios do Laboratório de Ensaios de Componentes de Estruturas do LNEC, em duas séries diferentes, 12 vigas com 4,0 metros de comprimento, a primeira série com os aços inoxidáveis endurecidos a frio (AISI 316 e HSS1) e a segunda com os obtidos por laminagem a quente (AISI 316 e HSS3). Cada série é constituída por 2 vigas de referência executadas em aço do tipo A500NR com dois tipos de betões: um betão de resistência normal (C35/45) e um betão de alta resistência (C60/75).

Nas restantes 8 vigas substituiu-se a armadura longitudinal de aço carbono por varões de aço inoxidável e tirou-se partido da maior resistência à corrosão destes aços para reduzir o recobrimento utilizado. Assim, considerou-se que o recobrimento neste caso visava apenas garantir boas condições de aderência entre o aço e o betão e uma adequada transmissão de forças, não tendo a habitual função adicional de garantia da durabilidade.

No caso dos aços inoxidáveis endurecidos a frio, de elevada resistência, reduziu-se também a quantidade de armadura, com o objectivo de se manter aproximadamente a mesma resistência das vigas relativamente às vigas de referência. Pretendia-se agora reduzir o custo associado à utilização do aço inoxidável, mantendo a capacidade resistente.

A construção dos modelos a ensaiar teve como principal objectivo avaliar e comparar o comportamento até à rotura de vigas armadas com diferentes tipos de aço inoxidável. Procurava-se ainda paralelamente validar o comportamento em serviço de elementos de betão executados com aço inoxidável tirando partido da maior resistência à corrosão deste tipo de armaduras e também, no caso dos varões endurecidos a frio, da sua maior resistência.

2.1.1. Hipóteses de cálculo adoptadas

Nas vigas de referência adoptou-se um recobrimento de 45mm que é o valor de recobrimento mínimo previsto pelo Eurocódigo 2 [5] para ambientes muito agressivos, a que correspondem as classes de exposição XD1/XD2/XD3 e XS1/XS2/XS3. Nas vigas de aço inoxidável considerou-se uma redução

da espessura de recobrimento, situação prevista no Eurocódigo 2 desde 2001 [6], no caso de se usar armaduras de aço inoxidável.

A redução do recobrimento para 20mm permite aumentar ligeiramente a altura útil das vigas de aço inoxidável, uma vez que todas as vigas foram executadas com 0,35m de altura. A modificação do recobrimento permitiu também reduzir ligeiramente a quantidade de armadura de aço inoxidável a utilizar, sempre que os diâmetros disponíveis o permitiram e também a largura das vigas de aço inoxidável.

Em face dos resultados obtidos na caracterização mecânica dos aços inoxidáveis, cujos resultados se apresentam no Quadro 1, optou-se por atribuir a cada um deles a respectiva classe de resistência de modo a ser possível ter valores de cálculo para o dimensionamento das secções transversais (ver Quadro 2).

Quadro 1. Caracterização mecânica dos aços inoxidáveis : valores médios (3 provetes) dos resultados dos ensaios de tracção.

Tipo de aço	ϕ (mm)	$R_{p0,2}$ (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	$R_m/R_{p0,2}$	A_{gt} (%)	E (GPa)
AISI 316	12	677	779	1,15	5,0	172
HSS1	12	757	976	1,29	10,6	192
AISI 316	16	573	760	1,33	28,3	199
HSS3	14	512	732	1,43	32,6	204

$R_{p0,2}$ - Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% de extensão na armadura

R_m - Tensão de rotura à tracção da armadura

A_{gt} - Extensão total na força máxima

E - Módulo de elasticidade do aço

Quadro 2. Classes dos aços consideradas para o dimensionamento das vigas.

Tipo de aço	ϕ (mm)	Classe adoptada	f_{syk} (MPa)	f_{syd} (MPa)
AISI 316	12	A600	600	522
HSS1	12	A650	650	565
AISI 316	16	A500	500	435
HSS3	14	A500	500	435

Com estes pressupostos e admitindo os valores de cálculo da resistência do betão à compressão do Eurocódigo 2 [5], foi possível executar o dimensionamento e chegar aos momentos resistentes de cálculo indicados no Quadro 3, para se obter as secções transversais da primeira e da segunda série de vigas a executar. Salienta-se que os diâmetros disponibilizados pelo parceiro do projecto responsável pelo fornecimento dos aços inoxidáveis, condicionaram uma maior homogeneidade dos momentos resistentes de cálculo das diferentes vigas, conforme demonstra a última coluna do Quadro 3.

Quadro 3. Momento resistente de cálculo (M_{Rd}) de cada modelo de viga.

VIGAS	f_{cd} (MPa)	f_{syd} (MPa)	b (m)	d (m)	ω	μ	M_{Rd} (kN.m)	$\frac{M_{Rd}}{M_{Rd, A500}}$
A500_C35_d12	23,3	435	0,22	0,291	0,132	0,118	51,2	1,00
AISI316_C35_d12	23,3	522	0,15	0,316	0,160	0,141	49,1	0,96
HSS1_C35_d12	23,3	565	0,15	0,316	0,174	0,151	52,6	1,03
A500_C60_d12	40,0	435	0,22	0,291	0,077	0,072	53,4	1,00
AISI316_C60_d12	40,0	522	0,15	0,316	0,093	0,086	51,5	0,96
HSS1_C60_d12	40,0	565	0,15	0,316	0,101	0,093	55,4	1,04
A500_C35_d16	23,3	435	0,22	0,289	0,177	0,154	65,7	1,00
AISI316_C35_d16	23,3	435	0,15	0,314	0,239	0,199	68,7	1,05
HSS3_C35_d14	23,3	435	0,15	0,315	0,182	0,158	54,7	0,83
A500_C60_d16	40,0	435	0,22	0,289	0,103	0,094	69,3	1,00
AISI316_C60_d16	40,0	435	0,15	0,314	0,139	0,124	73,3	1,06
HSS3_C60_d14	40,0	435	0,15	0,315	0,106	0,097	57,7	0,83

As características gerais da primeira e segunda série de vigas são apresentadas na Figura 1, sendo especificados todos os detalhes das diferentes secções transversais.

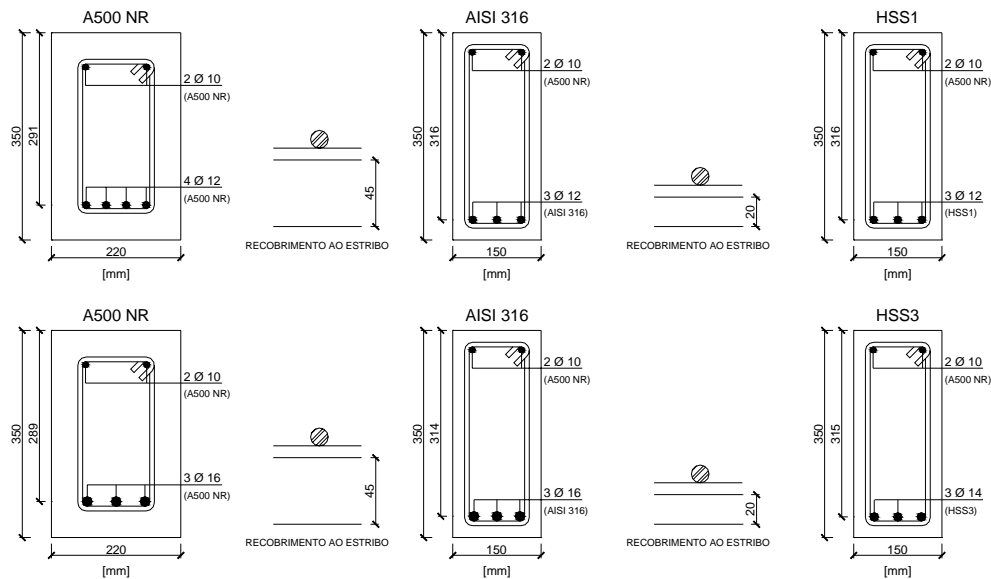


Figura 1. Detalhe da secção transversal da 1.^a e 2.^a séries de vigas.

3. SISTEMA DE ENSAIO E INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

Para avaliar o comportamento em flexão pura dos modelos de viga, foi prevista a aplicação de duas forças verticais afastadas de 1,20m de cada ponto de apoio que dão origem a um diagrama de momento flector constante num troço com 1,30m de comprimento.

A instrumentação utilizada teve como principais objectivos medir os deslocamentos verticais de cada modelo a ensaiar bem como estimar as extensões médias que se desenvolvem nas faces superior e inferior das vigas, no troço de momento flector constante, ao longo dos ensaios. A medição dos deslocamentos verticais foi efectuada através da colocação de transdutores de deslocamento debaixo dos dois pontos de aplicação de carga e a meio vão de cada modelo (transdutores 1, 2 e 3 da Figura 2), assentes num suporte que permitiu um registo independente das flechas nos 3 pontos. A avaliação das extensões nas faces superior e inferior dos modelos foi conseguida indirectamente através da fixação de um sistema auxiliar de suporte de 3 transdutores de deslocamento em cada face (transdutores 4 a 9 da Figura 2). O sistema de fixação permitiu avaliar a deformação média dos modelos em 3 troços de 20cm, por cada face.

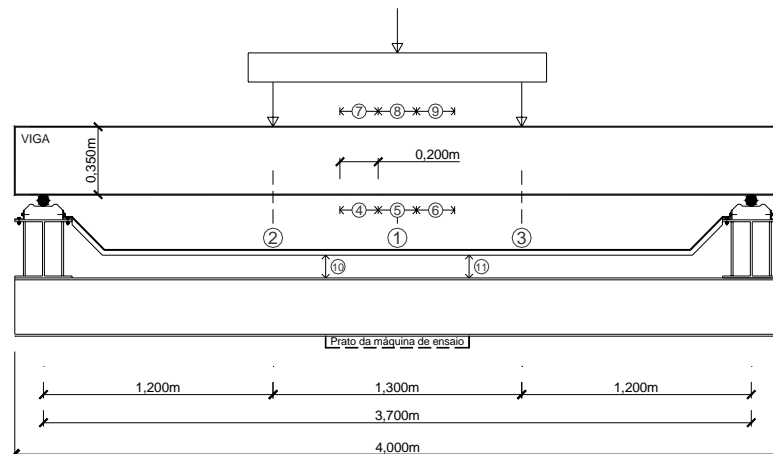


Figura 2. Localização da instrumentação de cada modelo ensaiado.

Ao longo dos ensaios registaram-se continuamente as forças aplicadas e os deslocamentos medidos através de dois módulos do sistema de aquisição automática de dados Spider 8 da HBM, comandado pelo programa Catman, também da HBM.

Tendo em consideração que a resposta de um elemento estrutural submetido a determinado carregamento depende da velocidade com que se aplica esse carregamento e de forma a garantir que este efeito não prejudicasse a qualidade dos resultados que se pretendia obter, optou-se por realizar o ensaio com aplicação lenta de carga, sob controlo de deslocamentos, tendo sido usada uma velocidade média de 5×10^{-3} mm/s. Este valor é suficientemente baixo, para permitir a marcação da fendilhação e para garantir o adequado registo dos dados. Após ter sido atingido o valor de força correspondente à cedência teórica, a velocidade de ensaio foi incrementada aproximadamente em 10 vezes.

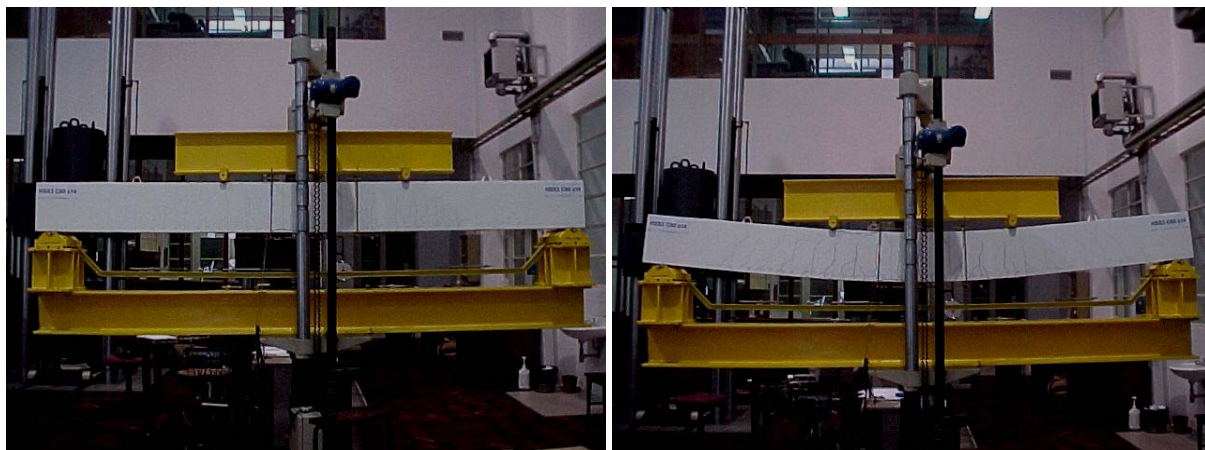


Figura 3. Posição inicial e final de ensaio da viga HSS3_C60_d14.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

No decorrer da 1.^a série de ensaios após ter sido atingida uma força correspondente à cedência das armaduras, o ensaio foi suspenso para retirada de todos os transdutores de deslocamento, enquanto que na 2.^a série de ensaios se optou por manter todos os transdutores até ao fim do ensaio. Assim, nas seis primeiras vigas ensaiadas apenas se dispõe do registo da força e do deslocamento da máquina até à rotura dos modelos.

Com a experiência adquirida, na segunda série de ensaios optou-se por deixar todos os transdutores de deslocamento até à rotura do modelo, não tendo por isso havido qualquer paragem durante o ensaio.

Relativamente às vigas de referência executadas com varões de 12 e 16mm de diâmetro, os resultados obtidos permitiram logo à partida constatar a existência de uma diferença média de aproximadamente 8% entre as forças de cedência obtidas experimentalmente e os valores previstos. Tal facto pode estar associado à origem dos varões A500 NR, pois apesar da montagem ter sido controlada e de haver a garantia de que os varões fornecidos para caracterização mecânica eram do mesmo fabricante que os usados nas armaduras longitudinais, não houve a evidência de que pertenciam ao mesmo vazamento.

A análise dos resultados experimentais obtidos consistiu na sua avaliação para os seguintes parâmetros:

- Flechas em condições de serviço;
- Índice de ductilidade em deslocamento;
- Espaçamento médio entre fendas e abertura máxima de fendas;
- Relação entre o momento resistente obtido, as quantidades de material e o custo de cada elemento.

Tendo em conta as diferenças obtidas, no caso das vigas de referência, entre as forças de cedência teórica e experimental decidiu-se, de modo a obter valores mais realistas do comportamento dos modelos, considerar como dados base os valores obtidos experimentalmente, uma vez que, como já foi referido, não há garantias de que a caracterização mecânica feita aos varões do tipo A500 NR é efectivamente representativa do aço das armaduras utilizadas na execução destas vigas.

Na Figura 4 e na Figura 5 apresenta-se uma sistematização dos resultados obtidos em termos da relação entre a força e o deslocamento do equipamento de ensaio, por tipo de betão usado e por tipos de vigas (maiores e menores diâmetros).

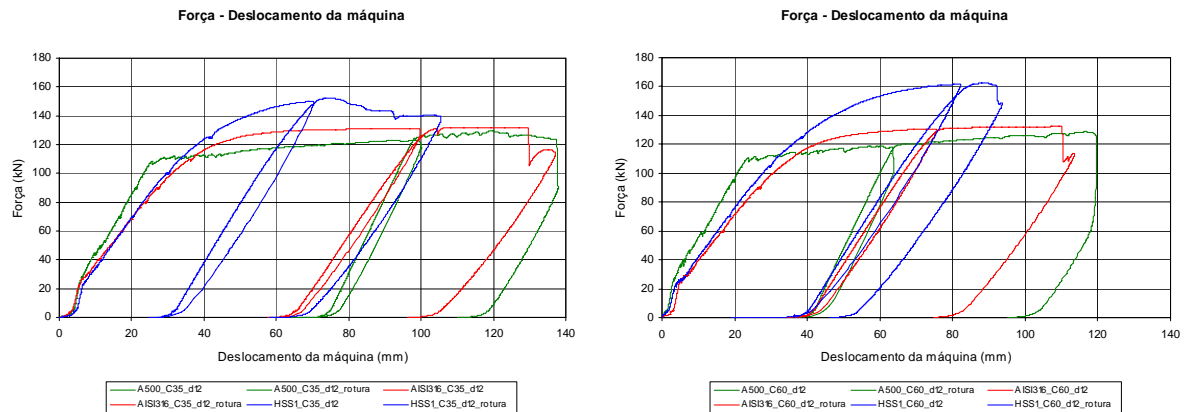


Figura 4. Vigas de betão C35/45 e C60/75 com varões de 12mm.

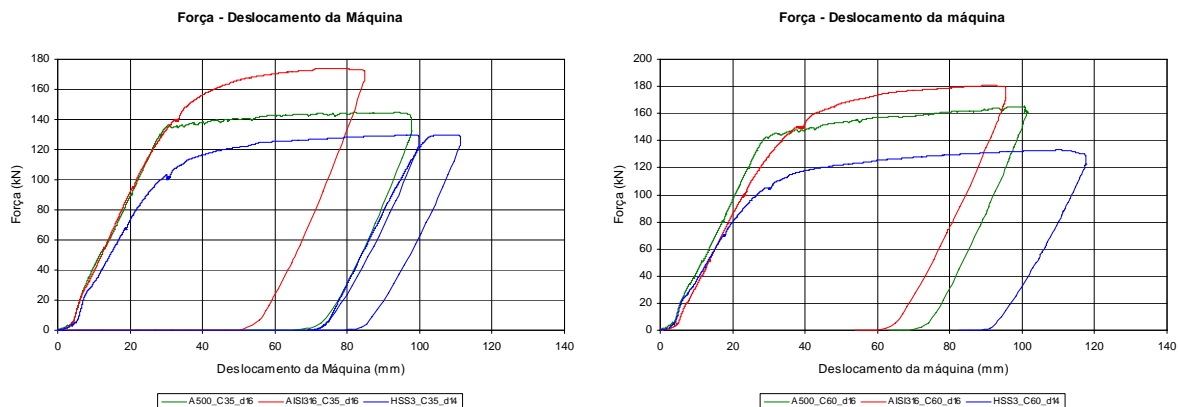


Figura 5. Vigas de betão C35/45 e C60/75 com varões de 16 e 14mm.

4.1. Flechas em condições de serviço

Para a avaliação da flecha a meio vão em condições de serviço, considerou-se que os varões usados pertenciam às classes citadas no Quadro 2.

Considerando que o momento resistente de cálculo pode ser obtido a partir do valor do momento de cedência teórico ($M_{y, \text{teo}}$)[‡] de cada um dos modelos, através da relação entre a tensão de cedência de cálculo da armadura (f_{syd}) e o respectivo valor médio (f_{sy}) e que o momento em condições de serviço ($M_{\text{serviço}}$) é aproximadamente 60% do momento resistente de cálculo de cada modelo (M_{Rd}) foi possível avaliar o valor correspondente de flecha obtida experimentalmente ($f_{\text{serviço}}$) que se apresenta no quadro que se segue.

[‡] Momento de cedência experimental para as vigas de referência.

Quadro 4. Flechas em condições de serviço.

VIGAS	$M_{y,teo}$ (kN.m)	f_{syd} (MPa)	f_{sy} (MPa)	M_{Rd} (kN.m)	$M_{serviço}$ (kN.m)	$f_{serviço}$ (mm)
A500_C35_d12	64,3	435	580	48,1	28,9	7,2
AISI316_C35_d12	71,7	522	705	53,1	31,8	13,4
HSS1_C35_d12	78,2	565	753	58,7	35,2	13,5
A500_C60_d12	65,6	435	580	49,1	29,5	8,3
AISI316_C60_d12	72,1	522	705	53,3	32,0	12,2
HSS1_C60_d12	78,0	565	753	58,5	35,1	14,7
A500_C35_d16	80,7	435	547	64,2	38,5	10,9
AISI316_C35_d16	100,2	435	566	77,0	46,2	12,7
HSS3_C35_d14	70,9	435	513	60,1	36,0	10,9
A500_C60_d16	85,7	435	547	68,2	40,9	11,0
AISI316_C60_d16	101,5	435	566	78,0	46,8	13,9
HSS3_C60_d14	70,9	435	513	60,1	36,1	11,6

Os valores do Quadro 4 permitem concluir que as flechas a meio vão são ligeiramente superiores nas vigas de aço inoxidável, contudo todos os resultados obtidos se encontram de acordo com o limite de deformação previsto pelo Eurocódigo 2 [5] em situações correntes, para: $\frac{L}{250} = \frac{3700}{250} = 14,8 \text{ mm}$.

Todavia, importa salientar que a maior deformação das vigas de aço inoxidável está em parte associada à diferença de rigidez que existe entre estes elementos e as vigas de referência, uma vez que a redução de recobrimento imposta reduziu significativamente a largura das secções das vigas de aço inoxidável.

4.1.1. Resultados estimados através do Método Bilinear

Considerando a condição de flexão pura no troço central dos modelos ensaiados, optou-se por estimar os valores de flecha usando o Método Bilinear previsto pelo CEB Design Manual on Cracking and Deformations [7]. Os resultados obtidos para as flechas instantâneas e a longo prazo referem-se apenas ao efeito do carregamento aplicado a cada modelo considerado como carga permanente, não tendo por isso sido considerado o efeito da retracção.

No Quadro 5 comparam-se os resultados obtidos experimentalmente, para as vigas de betão de resistência normal, com os resultados das flechas estimadas para os níveis de força correspondentes ao momento em condições de serviço ($M_{serviço}$) de cada modelo.

Quadro 5. Comparação entre os resultados de flecha experimental e estimada (instantânea e a longo prazo) usando o Método Bilinear, para as vigas executadas com betão de resistência normal.

VIGAS	$M_{serviço} \approx 0,60M_{Rd}$ (kN.m)	Flecha Experimental (mm)	Flecha instantânea (mm)	Flecha a longo prazo (mm)
A500_C35_d12	28,9	7,2	8,5	19,7
AISI316_C35_d12	31,8	13,4	14,3	26,4
HSS1_C35_d12	35,2	13,5	16,3	29,5
A500_C35_d16	38,5	10,9	11,8	24,2
AISI316_C35_d16	46,2	12,7	14,9	27,3
HSS3_C35_d14	36,0	10,9	13,1	24,1

A aplicação do Método Bilinear permite concluir que não existem diferenças muito acentuadas entre os resultados obtidos experimentalmente e os resultados estimados para a flecha instantânea, pelo que parece manter-se válida a utilização desta metodologia para avaliação das flechas em elementos executados com armaduras de aço inoxidável.

Salienta-se ainda que apesar das flechas instantâneas obtidas cumprirem o disposto pelo Eurocódigo 2 em termos de deformação, os valores estimados para as flechas a tempo infinito são elevados, devendo por isso ser tomadas medidas que evitem a existência de deformações excessivas dos elementos,

nomeadamente através da aplicação de contraflechas durante as operações de betonagem ou eventualmente pela limitação das tensões nas armaduras.

4.2. Índice de ductilidade em deslocamento

Para comparar o desempenho dos diferentes modelos em termos de ductilidade calculou-se o coeficiente de ductilidade em deslocamento.

Tendo em consideração que para a primeira série de vigas apenas se dispõe, após a cedência, dos registos de força e deslocamento sofrido pela máquina de ensaio, foi decidido determinar o coeficiente de ductilidade em deslocamento com estes dados. Assim, no Quadro 6 encontra-se quantificada a percentagem geométrica de armadura ($\rho = \frac{A_s}{b * d}$), a percentagem mecânica de armadura

$$\left(\omega = \frac{A_s}{b * d} * \frac{f_{sy}}{f_{cm}} \right) \text{ e o índice de ductilidade em deslocamento: } \mu_\delta = \frac{d_{eq}(F_{ult})}{d_{eq}(F_{y,teo})}.$$

Quadro 6. Índice de ductilidade em deslocamento.

Viga	ρ	ω	μ_δ
A500_C35_d12	0,0071	0,068	5,24
AISI316_C35_d12	0,0072	0,085	3,03
HSS1_C35_d12	0,0072	0,091	2,39
A500_C60_d12	0,0071	0,055	5,18
AISI316_C60_d12	0,0072	0,057	2,60
HSS1_C60_d12	0,0072	0,064	2,26
A500_C35_d16	0,0095	0,085	3,29
AISI316_C35_d16	0,0128	0,120	1,65
HSS3_C35_d14	0,0098	0,082	2,61
A500_C60_d16	0,0095	0,063	3,34
AISI316_C60_d16	0,0128	0,086	1,81
HSS3_C60_d14	0,0098	0,057	2,89

A análise dos resultados obtidos para o índice de ductilidade em deslocamento, de cada um dos 4 conjuntos de 3 vigas, permite concluir que existe uma inversão da relação entre a percentagem mecânica de armadura e o coeficiente de ductilidade visto que o coeficiente de ductilidade diminui com a percentagem mecânica de armadura, para os modelos da 1.^a série, enquanto que para os restantes 6 modelos (2.^a série) já não existe linearidade nos resultados pois a percentagem mecânica de armadura entre os dois tipos de vigas com aço inoxidável é substancialmente diferente.

Na primeira série de modelos a alteração do tipo de betão traduziu-se numa redução do coeficiente de ductilidade que varia entre 1,2 e 14,3% enquanto que nos modelos da segunda série, a passagem de um betão de resistência normal para um betão de alta resistência incrementou o coeficiente de ductilidade entre 1,6 e 10,7%.

4.3. Espaçamento entre fendas e abertura de fendas

Para avaliar o comportamento em serviço dos modelos foi também avaliado o espaçamento médio entre fendas na zona de momento constante, para o nível de força correspondente ao momento em condições de serviço ($M_{serviço}$) bem como a abertura máxima de fendas medida ao nível da armadura, durante a realização dos ensaios.

Os valores experimentais obtidos são comparados com os valores teóricos esperados, determinados de acordo com o previsto pelo Eurocódigo 2 [5] que segue as recomendações do CEB Design Manual on Cracking and Deformations [7].

Quadro 7. Resultados médios do espaçamento e abertura de fendas esperados e obtidos experimentalmente.

VIGAS	Resultados esperados		Resultados experimentais	
	Espaçamento	Abertura média de	Espaçamento	Abertura máxima
	médio entre fendas (cm)	fendas (mm)	médio entre fendas (cm)	de fendas (mm)
A500_C35_d12	15,9	0,16	15,1	0,15
AISI316_C35_d12	9,7	0,15	12,5	0,15
HSS1_C35_d12	9,7	0,17	11,3	0,30
A500_C60_d12	16,0	0,17	17,4	0,25
AISI316_C60_d12	9,8	0,15	10,1	0,15
HSS1_C60_d12	9,8	0,16	13,9	0,30
A500_C35_d16	17,0	0,19	11,6	0,15
AISI316_C35_d16	8,9	0,12	10,4	0,05
HSS3_C35_d14	9,3	0,12	8,1	0,05
A500_C60_d16	17,0	0,20	15,1	0,10
AISI316_C60_d16	9,0	0,12	8,1	0,15
HSS3_C60_d14	9,4	0,12	8,9	0,05

A análise dos resultados obtidos permite constatar que de um modo geral existe uma boa correlação entre o espaçamento médio entre fendas esperado e obtido experimentalmente, havendo contudo uma maior tendência para o aparecimento de fendas ramificadas nas vigas de aço inoxidável. Com as limitações dos resultados obtidos neste trabalho parece poder concluir-se que os modelos actualmente usados para avaliação do espaçamento e da abertura de fendas continuam a poder ser aplicados.

4.4. Relação entre o momento resistente e o custo

Com o objectivo de avaliar a eficiência da utilização das armaduras de aço inoxidável, dada a sua maior resistência à corrosão e nalguns casos também a sua maior resistência mecânica, determinou-se a relação entre o custo e o momento resistente de cálculo para cada um dos elementos concebidos.

No Quadro 8 encontra-se quantificado o custo por unidade de momento resistente de cálculo para cada um dos modelos de vigas, tendo sido considerados os preços correntes dos materiais em questão no mercado nacional, à data de realização deste trabalho [4] e admitidas as seguintes hipóteses:

- Custo do betão: C35/45 = 75 €/m³ e C60/75 = 85 €/m³
- Custo aço carbono montado = 1,20€/kg, sendo 0,45€/kg o custo do material e 0,75€/kg a montagem e custo aço inoxidável $\cong 5 \times$ custo aço carbono \Rightarrow custo aço inoxidável montado = 3,00 €/kg, sendo 2,25€/kg o custo do material e 0,75€/kg a montagem;
- Desprezou-se a parcela de custo associada à cofragem e admitiu-se que o custo de montagem das armaduras de aço inoxidável é equivalente ao das armaduras de aço carbono.

Numa primeira análise os resultados obtidos permitem concluir que a composição HSS1 acabaria por ser a mais eficiente, caso o desempenho em termos de resistência à corrosão fosse satisfatório. No caso da composição HSS3, apenas se tira partido da maior resistência à corrosão, o que faz com que esta composição seja ligeiramente menos eficiente que a composição AISI316 (16mm).

Finalmente, importa salientar que ainda não foi considerada a diferença existente entre o custo das composições AISI316 e das novas composições HSS1 e HSS3, que se espera melhora substancialmente a eficiência desta última composição. Da análise deste caso, constata-se também que a utilização de betões de alta resistência não permitiu melhorar significativamente a eficiência das soluções em causa, uma vez que os ganhos obtidos, em termos de resistência mecânica das secções, são praticamente nulos.

Quadro 8. Custo por unidade de momento resistente.

VIGA	M_{Rd} (kN.m)	Volume Betão (m ³)	Custo Betão (€)	Peso Aço (kg)	Custo Aço (€)	CustoTotal (€)	Custo/ M_{Rd} (€/kN.m)
A500_C35_d12	48,1	0,308	23,10 €	14,21	17,05 €	40,15 €	0,83 €
AISI316_C35_d12	53,1	0,210	15,75 €	10,65	31,96 €	47,71 €	0,90 €
HSS1_C35_d12	58,7	0,210	15,75 €	10,65	31,96 €	47,71 €	0,81 €
A500_C60_d12	49,1	0,308	26,18 €	14,21	17,05 €	43,23 €	0,88 €
AISI316_C60_d12	53,3	0,210	17,85 €	10,65	31,96 €	49,81 €	0,93 €
HSS1_C60_d12	58,5	0,210	17,85 €	10,65	31,96 €	49,81 €	0,85 €
A500_C35_d16	64,2	0,308	23,10 €	18,94	22,73 €	45,83 €	0,71 €
AISI316_C35_d16	77,0	0,210	15,75 €	18,94	56,82 €	72,57 €	0,94 €
HSS3_C35_d14	60,1	0,210	15,75 €	14,50	43,50 €	59,25 €	0,99 €
A500_C60_d16	68,2	0,308	26,18 €	18,94	22,73 €	48,91 €	0,72 €
AISI316_C60_d16	78,0	0,210	17,85 €	18,94	56,82 €	74,67 €	0,96 €
HSS3_C60_d14	60,1	0,210	17,85 €	14,50	43,50 €	61,35 €	1,02 €

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentro das limitações do estudo efectuado, os resultados obtidos confirmam que os modelos analíticos considerados pelo Eurocódigo 2 [5] para prever as deformações e a abertura de fendas em vigas sujeitas a esforços de flexão continuam a poder ser aplicados quando são usadas armaduras de aço inoxidável. De acordo com o que foi observado durante a realização dos ensaios, a fendilhação que se desenvolve nas vigas com armaduras de aço inoxidável, mesmo no caso de redução da quantidade de armadura, é adequada.

No que diz respeito à deformação dos elementos concebidos, a combinação da redução da largura da secção transversal com a redução da quantidade de armadura, no caso do aço inoxidável de alta resistência (HSS1), conduz a um aumento significativo das flechas, em parte porque há uma redução da rigidez da secção transversal. A utilização de um aço inoxidável (HSS3) de resistência semelhante aos aços carbono do tipo A500 NR resulta melhor, pois são obtidos valores de flecha da mesma ordem de grandeza. Todavia, importa salientar que em ambos os casos os resultados obtidos apenas satisfazem os limites previstos pelo Eurocódigo 2 [5] para as flechas instantâneas.

Com a realização deste trabalho foi possível demonstrar que a utilização de armaduras de aço inoxidável se pode traduzir numa solução vantajosa quer em termos de durabilidade das estruturas quer a nível económico, especialmente se forem usados aços inoxidáveis de elevada resistência mecânica e boa resistência à corrosão.

REFERÊNCIAS

- [1] <http://www.stainless-rebar.org>
- [2] M. J. Correia; Salta M. M.; Pipa, M.; “Implicações da utilização do aço inoxidável nos requisitos de durabilidade do betão armado para estruturas com vida útil superior a 100 anos”; JPEE 2006 - 4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas; APEE; 2006.
- [3] HIPER – Increased infrastructure reliability by developing a low cost and high performance stainless steel rebars, project n.º GDR1-2000-25601.
- [4] Louro, Ana S.; “Comportamento de vigas de betão armado com aço inoxidável”; Tese de Mestrado, Julho 2008.
- [5] EN 1992 - 1-1: 2004 – Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings”.
- [6] Draft prEN 1992-1-1 – Eurocode 2: “Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings”; October 2001.

- [7] CEB Design Manual on Cracking and Deformations; École Polytechnique Fédérale de Lausanne; 1985.