



UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

COMPORTAMENTO DE VIGAS DE BETÃO ARMADO COM AÇO INOXIDÁVEL

Ana Sofia Miranda da Silva Louro
(Licenciada em Engenharia Civil)

Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)
para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Estruturas pela Universidade
Técnica de Lisboa no âmbito do protocolo de cooperação entre o IST e o LNEC

Orientador: Doutor Manuel José de Andrade Loureiro Pipa
Co-orientador: Doutor Augusto Martins Gomes

Júri

Presidente: Doutor João Carlos de Oliveira Fernandes de Almeida
Vogais: Doutor Augusto Martins Gomes
Doutor Manuel José de Andrade Loureiro Pipa
Doutor António Manuel Pinho Ramos

Julho de 2008

Aos meus filhos
Leonor e Afonso

À minha Mãe e ao Mário

COMPORTAMENTO DE VIGAS DE BETÃO ARMADO COM AÇO INOXIDÁVEL

RESUMO

Neste trabalho estuda-se o comportamento de vigas de betão armado executadas com armaduras de aço inoxidável.

Numa primeira fase é feita uma análise das características dos diferentes tipos de aços inoxidáveis e da regulamentação existente sobre os principais tipos de armaduras de aço inoxidável para betão armado, que já são amplamente usados em países como os Estados Unidos, o Canadá ou o Reino Unido.

É efectuada a caracterização mecânica e de aderência de quatro tipos de varões nervurados de aço inoxidável, dois dos quais com composições de baixo custo, que foram desenvolvidos no âmbito do Project Europeu HIPER - “Increased infrastructure reliability by developing a low cost and high performance stainless steel rebars”.

Para avaliar a viabilidade da utilização em elementos de betão armado dos diferentes tipos de aços inoxidáveis, foram concebidos 12 modelos de viga com 4,0 m de comprimento, usando varões de aço carbono, os quatro tipos de aços inoxidáveis e ainda betões de resistência normal e alta. Na execução destes elementos considera-se que a maior resistência à corrosão dos aços inoxidáveis pode ser usada para reduzir o recobrimento das vigas com aço inoxidável, admitindo que todos os elementos estão inseridos num mesmo meio ambiente. Considera-se também a maior resistência de alguns tipos de aço inoxidável. Os elementos projectados têm aproximadamente a mesma resistência usando menos quantidade de armadura e ligeiramente menor quantidade de betão.

O comportamento em flexão pura dos 12 modelos de viga executados com os diferentes materiais é analisado e comparado através de ensaios até à rotura.

Em face da elevada deformabilidade de alguns dos tipos de aço inoxidável em estudo, é dada especial atenção ao desempenho dos elementos em condições de serviço, sendo comparadas as flechas e as aberturas de fendas esperadas e obtidas experimentalmente de modo a validar as metodologias de cálculo actualmente usadas e os limites previstos na regulamentação.

PALAVRAS - CHAVE:

- varões de aço inoxidável
- vigas de betão armado
- durabilidade de estruturas
- comportamento em serviço
- prevenção da corrosão
- ductilidade

BEHAVIOUR OF CONCRETE BEAMS REINFORCED WITH STAINLESS STEEL

ABSTRACT

The scope of this work is to study the behaviour of beams reinforced with stainless steel rebars.

Firstly the characteristics of the different types of stainless steel are analysed as is the existing regulation for it's main types, which are already widely used in countries such as the United States, Canada or the United Kingdom.

The characterization is based on mechanical and bonding characteristics of four types of ribbed stainless steel bars, two of which with low cost compositions, that were developed by the European Project HIPER - "Increased infrastructure reliability developing low cost and high performance stainless steel rebars".

To evaluate the viability of the use in elements of the different types of stainless steel rebars, 12 beam models with 4,0 m length were conceived using carbon steel rebars, the four types of stainless steel rebars and concrete of normal and high resistance. In the execution of these elements it was considered that the higher resistance to corrosion of stainless steel can justify reducing the covering layer of the beams, admitting that all the elements are inserted in the same environment. It was also considered the strongest resistance of some types of stainless steel. The designed elements have approximately the same resistance using a smaller amount of reinforcing steel and a slightly smaller amount of concrete.

The bending behaviour of the 12 executed beam models using different materials is analyzed and compared by testing until rupture.

In face of the increased deformability of some of the types of stainless steel in study, it was given special attention to the performance of the elements in conditions of service, comparing the expected deformation and crack opening with the ones verified experimentally, in order to validate the currently used methodologies of calculation and the limits foreseen by the codes.

KEYWORDS:

- stainless steel rebar
- reinforced concrete beams
- structures durability
- behaviour in service
- corrosion prevention
- ductility

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação foi elaborada no Núcleo de Comportamento de Estruturas do Departamento de Estruturas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pelo que agradeço a esta instituição a oportunidade que me foi concedida bem como todos os meios disponibilizados para a realização deste trabalho.

Ao Eng.º Manuel Pipa, orientador científico deste trabalho, desejo prestar o meu profundo agradecimento pelo tema proposto, pela oportunidade de participação num projecto de investigação europeu, por todos os ensinamentos e conselhos que me foi dando ao longo da realização deste trabalho e da minha formação no laboratório e ainda pela amizade demonstrada desde o meu ingresso no LNEC.

Ao Prof. Augusto Gomes, co-orientador científico deste trabalho, agradeço a sua disponibilidade e conselhos bem como a revisão de todo o texto.

Ao Eng.º João Almeida Fernandes, Director do Departamento de Estruturas do LNEC, manifesto também o meu agradecimento, pela sua preocupação com a minha formação e por me ter concedido maior disponibilidade para concluir este trabalho.

Ao Experimentador Manuel Ferreira, tenho a agradecer os muitos ensinamentos e conselhos dados desde que comecei a desenvolver actividade no LNEC, mas também o enorme apoio, entusiasmo e empenho na preparação da instrumentação necessária à realização dos ensaios.

Agradeço também ao Técnico Paulo Marques a forma cuidada, empenhada e paciente como preparou e realizou cada um dos ensaios.

Aproveito ainda a oportunidade para agradecer aos diversos colegas do Departamento de Materiais que comigo colaboraram, nomeadamente do Núcleo de Materiais Metálicos, a Eng.ª Manuela Salta, a Dr.ª Maria João Correia e a Técnica Fátima Forreta e do Núcleo de Betões os Técnicos João Balsinha, João Milharadas, Vítor Campos e João Costa.

Manifesto também o meu agradecimento ao Eng.º José Luís Louro pelo apoio, em especial na recta final da formatação dos resultados apresentados no Anexo A sob a forma de gráficos.

Aos colegas Eng.ª Cláudia Moreira, Eng.º João André e Eng.º João Falcão desejo agradecer todo o apoio e a forma empenhada como me incentivaram a concluir este trabalho.

Deixo também um agradecimento a todos aqueles que directa ou indirectamente contribuíram para a realização deste trabalho, nomeadamente à Sra. D. Júlia da Secção de Expediente do Departamento de Estruturas e aos técnicos do sector de Artes Gráficas do LNEC.

Finalmente agradeço aos meus pais pelos valores que me inculcaram e ainda por estarem sempre do meu lado em todas as opções que tomei, encorajando-me a concretizar os meus objectivos. Ficarei para sempre grata à minha mãe, pelas palavras de ânimo e incentivo e pelo ombro amigo, sempre disponível, para partilha de todas as angústias e incertezas decorrentes da realização deste trabalho.

COMPORTAMENTO DE VIGAS DE BETÃO ARMADO COM AÇO INOXIDÁVEL

ÍNDICE DO TEXTO

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 - Enquadramento..... | 1 |
| 1.1.1 - Análises de custo no ciclo de vida | 3 |
| 1.2 - Objectivos | 6 |
| 1.3 - Organização da Dissertação | 7 |
| CAPÍTULO 2 - CARACTERIZAÇÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS | 9 |
| 2.1 - Características gerais dos aços inoxidáveis..... | 9 |
| 2.1.1 - Armaduras para betão armado de aço inoxidável | 10 |
| 2.2 - Caracterização dos aços inoxidáveis usados na execução das vigas | 13 |
| 2.2.1 - Composição química | 15 |
| 2.2.2 - Caracterização mecânica | 16 |
| 2.2.2.1 - Comportamento à tracção | 16 |
| 2.2.2.2 - Aptidão à dobragem | 18 |
| 2.2.2.3 - Resistência a acções cíclicas..... | 18 |
| 2.2.2.4 - Resistência à fadiga | 21 |
| 2.2.3 - Caracterização de aderência..... | 22 |
| 2.2.3.1 - Geometria das nervuras | 22 |
| 2.2.3.2 - Ensaio de <i>pull-out</i> | 24 |
| CAPÍTULO 3 - DIMENSIONAMENTO E CONCEPÇÃO DOS MODELOS DE VIGAS | 31 |
| 3.1 - Dimensionamento dos modelos | 31 |

| | |
|--|-----------|
| 3.1.1 - Hipóteses de cálculo adoptadas | 31 |
| 3.1.2 - Características dos modelos a ensaiar..... | 33 |
| 3.2 - Construção dos Modelos..... | 37 |
| 3.2.1 - Caracterização dos betões usados nos modelos | 40 |
| 3.2.2 - Caracterização dos varões do tipo A500NR | 45 |
| CAPÍTULO 4 - PREVISÃO ANALÍTICA DO COMPORTAMENTO DOS MODELOS..... | 47 |
| 4.1 - Introdução..... | 47 |
| 4.1.1 - Dados usados para o comportamento do betão..... | 47 |
| 4.1.2 - Dados usados para o comportamento dos aços | 49 |
| 4.2 - Resultados analíticos obtidos | 51 |
| CAPÍTULO 5 - SISTEMA DE ENSAIO | 55 |
| 5.1 - Esquemas de ensaio | 55 |
| 5.2 - Instrumentação dos modelos..... | 56 |
| 5.3 - Descrição do programa de ensaio | 60 |
| CAPÍTULO 6 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS..... | 61 |
| 6.1 - Apresentação geral dos resultados obtidos..... | 61 |
| 6.2 - Análise e discussão dos resultados obtidos | 66 |
| 6.3 - Flecha em condições de serviço..... | 66 |
| 6.3.1 - Resultados estimados através do Método Bilinear | 68 |
| 6.4 - Flechas e deslocamentos do equipamento de ensaio..... | 69 |
| 6.5 - Índice de ductilidade em deslocamento | 73 |
| 6.6 - Espaçamento entre fendas e abertura de fendas | 74 |
| 6.7 - Relação entre o momento resistente e o custo..... | 77 |
| CAPÍTULO 7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS | 81 |
| 7.1 - Relativas às características dos aços em estudo | 81 |
| 7.2 - Relativas ao comportamento dos modelos de vigas..... | 81 |
| 7.3 - Perspectivas futuras | 83 |
| 7.3.1 - Ao nível do enquadramento legal da utilização de armaduras de aço inoxidável | 83 |

| | |
|---|-----------|
| 7.3.2 - Ao nível do enquadramento no Eurocódigo 2 | 84 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 87 |
| ANEXO A - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DOS MODELOS DE VIGA | 93 |

COMPORTAMENTO DE VIGAS DE BETÃO ARMADO COM AÇO INOXIDÁVEL

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2-1 - Ensaios de tracção realizados pelo LPM/LNEC: Diagrama Tensão - Extensão. | 10 |
| Figura 2-2 - Ensaios de tracção realizados no LPM/LNEC: Diagrama Força - Deformação. | 10 |
| Figura 2-3 - Aspecto geral da superfície dos 4 tipos de varão em estudo e pormenor do perfil nervurado dos varões de 12 mm. | 14 |
| Figura 2-4 - Ensaios de tracção realizados no LPM/LNEC: Diagrama Tensão - Extensão. | 17 |
| Figura 2-5 - Pormenor da execução do ensaio de dobragem no LPM/LNEC. | 18 |
| Figura 2-6 - Condições de realização do ensaio cíclico alternado. | 19 |
| Figura 2-7 - Exemplo do diagrama força - deslocamento obtido no ensaio realizado sobre o provete do tipo AISI316 (12 mm). | 19 |
| Figura 2-8 - Exemplo do diagrama força - deslocamento obtido no ensaio realizado sobre o provete do tipo HSS1 (12 mm). | 20 |
| Figura 2-9 - Aspecto geral dos varões de aço inox após os ensaios cíclicos alternados. | 20 |
| Figura 2-10 - Aspecto geral dos varões de aço inox após ensaio de fadiga. | 22 |
| Figura 2-11 - Aspecto geral do sistema de medição de nervuras utilizado. | 22 |
| Figura 2-12 - Esquema de preparação dos provetes para ensaios de <i>pull-out</i> | 24 |
| Figura 2-13 - Vista geral dos provetes, sistemas de ensaio e medição usados nos ensaios de <i>pull-out</i> | 26 |
| Figura 2-14 - Resultados obtidos nos ensaios de <i>pull-out</i> realizados sobre os varões do tipo A500NR de 12 mm de diâmetro. | 26 |
| Figura 2-15 - Resultados obtidos nos ensaios de <i>pull-out</i> realizados sobre os varões do tipo AISI316 de 12 mm de diâmetro. | 27 |

| | |
|--|----|
| Figura 2-16 - Resultados obtidos nos ensaios de <i>pull-out</i> realizados sobre os varões do tipo HSS1 de 12 mm de diâmetro. | 27 |
| Figura 2-17 - Resultados obtidos nos ensaios de <i>pull-out</i> realizados sobre os varões do tipo AISI316 de 16 mm de diâmetro..... | 28 |
| Figura 2-18 - Resultados obtidos nos ensaios de <i>pull-out</i> realizados sobre os varões do tipo HSS3 de 14 mm de diâmetro..... | 28 |
| Figura 2-19 - Relação entre os resultados do <i>Pull-out test</i> e do <i>Beam test</i> [28]..... | 29 |
| Figura 3-1 - Secção longitudinal das vigas de referência da 1. ^a série. | 34 |
| Figura 3-2 - Secção longitudinal das vigas de aço inoxidável da 1. ^a série..... | 34 |
| Figura 3-3 - Detalhe da secção transversal das vigas de referência da 1. ^a série..... | 34 |
| Figura 3-4 - Detalhe da secção transversal das vigas de aço inoxidável da 1. ^a série..... | 35 |
| Figura 3-5 - Secção longitudinal das vigas de referência e das vigas em aço inoxidável AISI316 da 2. ^a série. | 36 |
| Figura 3-6 - Secção longitudinal das vigas de aço inoxidável do tipo HSS3 da 2. ^a série. | 36 |
| Figura 3-7 - Detalhe da secção transversal das vigas de referência da 2. ^a série..... | 36 |
| Figura 3-8 - Detalhe da secção transversal das vigas de aço inoxidável da 2. ^a série..... | 37 |
| Figura 3-9 - Montagem das armaduras. | 38 |
| Figura 3-10 - Aspecto geral da cofragem e da execução do betão. | 38 |
| Figura 3-11 - Colocação e vibração do betão. | 38 |
| Figura 3-12 - Colocação do betão no cone de Abram's..... | 39 |
| Figura 3-13 - Medição do abaixamento do cone de Abram's. | 39 |
| Figura 3-14 - Execução dos cubos..... | 39 |
| Figura 4-1 - Modelo de Kent e Park modificado para a relação tensão-deformação do betão [34]. | 48 |
| Figura 4-2 - Diagrama tensão-extensão dos aços AISI 316 (12 mm) e HSS1 (12 mm). | 50 |
| Figura 4-3 - Diagrama tensão-extensão dos aços AISI 316 (16 mm) e HSS3 (14 mm). | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 4-4 - Diagramas momento - curvatura das vigas com betão de resistência normal e varões de 12 mm. | 53 |
| Figura 4-5 - Diagramas momento - curvatura das vigas com betão de alta resistência e varões de 12 mm. | 53 |
| Figura 4-6 - Diagramas momento - curvatura das vigas com betão de resistência normal e varões de 16 e 14 mm. | 54 |
| Figura 4-7 - Diagramas momento - curvatura das vigas com betão de alta resistência e varões de 16 e 14 mm. | 54 |
| Figura 5-1 - Localização dos pontos de aplicação de carga. | 55 |
| Figura 5-2 - Aspecto geral da máquina Baldwin/Schenck usada para realizar os ensaios. | 55 |
| Figura 5-3 - Localização da instrumentação de cada modelo a ensaiar. | 56 |
| Figura 5-4 - Vista lateral de um medidor colocado na zona inferior de uma das vigas a ensaiar. | 57 |
| Figura 5-5 - Vista geral do sistema de ensaio. | 58 |
| Figura 5-6 - Aspecto geral da instrumentação utilizada. | 58 |
| Figura 5-7 - Interface gráfica do programa Catman, usado para acompanhamento dos ensaios. | 59 |
| Figura 6-1 - Posição inicial de ensaio da viga HSS3_C60_d14. | 62 |
| Figura 6-2 - Posição intermédia de ensaio da viga HSS3_C60_d14. | 63 |
| Figura 6-3 - Posição final de ensaio da viga HSS3_C60_d14. | 63 |
| Figura 6-4 - Vigas com betão de resistência normal e varões de 12 mm. | 64 |
| Figura 6-5 - Vigas com betão de alta resistência e varões de 12 mm. | 64 |
| Figura 6-6 - Vigas com betão de resistência normal e varões de 16 e 14 mm. | 65 |
| Figura 6-7 - Vigas com betão de alta resistência e varões de 16 e 14 mm. | 65 |
| Figura 6-8 - Momentos - curvaturas teóricos e experimentais das vigas de aço inoxidável da 1. ^a série de modelos com betão de resistência normal. | 71 |

| | |
|---|----|
| Figura 6-9 - Momentos - curvaturas teóricos e experimentais das vigas de aço inoxidável da 2. ^a série de modelos com betão de resistência normal. | 72 |
| Figura 6-10 - Detalhe da rotura do betão em compressão na viga A500_C35_d16..... | 72 |
| Figura 6-11 - Pormenor da medição da abertura de fendas, ao nível da armadura, da viga A500_C35_d16. | 74 |
| Figura 6-12 - Viga HSS1_C35_d12: a azul medição da espessura das fendas, para nível de força correspondente ao estado limite de utilização..... | 75 |
| Figura 6-13 - Viga HSS3_C35_d14: medição da espessura das fendas, para nível de força correspondente ao estado limite de utilização..... | 76 |
| Figura 6-14 - Pormenor da fendilhação da viga AISI316_C35_d16. | 76 |
| Figura 6-15 - Pormenor da fendilhação da viga HSS3_C35_d14. | 77 |

COMPORTAMENTO DE VIGAS DE BETÃO ARMADO COM AÇO INOXIDÁVEL

ÍNDICE DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1-1 - Comparação de custos para diferentes soluções de armadura [12]..... | 3 |
| Quadro 1-2 - Comparação de custos iniciais e de custo na vida útil de novas pontes, com vários tipos de armadura no tabuleiro [7]..... | 4 |
| Quadro 2-1 - Resultados dos ensaios de tracção realizados no LPM/LNEC. | 9 |
| Quadro 2-2 - Tipos de aço inoxidável a utilizar em função das condições de exposição definidas pela BS 6744:2001 [17]. | 12 |
| Quadro 2-3 - Características mecânicas definidas pela BS 6744:2001 [17]. | 13 |
| Quadro 2-4 - Resultados obtidos para a média dos 5 ensaios realizados por diâmetro [18]. | 13 |
| Quadro 2-5 - Composição química dos aços inoxidáveis em estudo. | 15 |
| Quadro 2-6 - Custo das matérias-primas [11]..... | 16 |
| Quadro 2-7 - Valores médios (3 provetes) dos resultados dos ensaios de tracção realizados pelo LPM/LNEC..... | 16 |
| Quadro 2-8 - Resultados obtidos nos ensaios para aptidão à dobragem. | 18 |
| Quadro 2-9 - Resultados obtidos nos ensaios cíclicos alternados. | 20 |
| Quadro 2-10 - Resultados obtidos nos ensaios de fadiga..... | 21 |
| Quadro 2-11 - Valores médios obtidos nas medições de nervuras realizadas pelo LPM/LNEC. .. | 23 |
| Quadro 2-12 - Valores de referência da área relativa das nervuras transversais (f_R). | 24 |
| Quadro 2-13 - Identificação dos provetes para ensaios de <i>pull-out</i> | 25 |
| Quadro 2-14 - Dimensão dos cubos e da zona aderente em função do diâmetro da armadura. . | 25 |

| | |
|--|----|
| Quadro 2-15 - Valores médios da tensão de aderência média e da tensão máxima de aderência. | 29 |
| Quadro 2-16 - Extrapolação dos resultados obtidos nos POT para resultados de BT. | 30 |
| Quadro 2-17 - Valores de referência das tensões de aderência. | 30 |
| Quadro 3-1 - Classes dos aços consideradas para o dimensionamento das vigas..... | 32 |
| Quadro 3-2 - Momento resistente de cálculo (M_{Rd}) de cada modelo de viga..... | 33 |
| Quadro 3-3 - Características gerais da 1.ª série de vigas. | 33 |
| Quadro 3-4 - Características gerais da 2.ª série de vigas. | 35 |
| Quadro 3-5 - Composição dos betões (por m^3)..... | 40 |
| Quadro 3-6 - Resultados do abaixamento e identificação dos cubos produzidos por cada viga betonada - 1.ª série..... | 41 |
| Quadro 3-7 - Resultados do abaixamento e identificação dos cubos produzidos por cada viga betonada - 2.ª série..... | 41 |
| Quadro 3-8 - Resistência do betão à compressão aos 7 dias - 1.ª série..... | 42 |
| Quadro 3-9 - Resistência do betão à compressão aos 28 dias - 1.ª série. | 42 |
| Quadro 3-10 - Resistência do betão à compressão aos 7 dias - 2.ª série. | 43 |
| Quadro 3-11 - Resistência do betão à compressão aos 28 dias - 2.ª série..... | 43 |
| Quadro 3-12 - Resistência à tracção por flexão do betão da classe C60 aos 7 e 28 dias..... | 44 |
| Quadro 3-13 - Resistência do betão à compressão na data de ensaio de cada viga. | 44 |
| Quadro 3-14 - Valores médios (3 provetes) dos resultados dos ensaios de tracção realizados no LPM/LNEC..... | 45 |
| Quadro 4-1 - Dados do modelo analítico do betão. | 48 |
| Quadro 4-2 - Dados dos aços inoxidáveis (diagramas por pontos). | 49 |
| Quadro 4-3 - Momentos e curvaturas na cedência e na rotura e tipo de rotura esperado em cada modelo de viga..... | 52 |
| Quadro 5-1 - Tipo de medidor usado em cada posição. | 57 |

| | |
|--|----|
| Quadro 5-2 - Data de ensaio das vigas. | 60 |
| Quadro 6-1 - Flechas em condições de serviço. | 67 |
| Quadro 6-2 - Comparação entre os resultados de flecha experimental e flechas estimadas (instantânea e a longo prazo) usando o Método Bilinear [35], para as vigas executadas com betão de resistência normal. | 68 |
| Quadro 6-3 - Primeira série de vigas: força de cedência teórica, força máxima e força última. | 69 |
| Quadro 6-4 - Primeira série de vigas: flecha e deslocamento do equipamento de ensaio correspondentes à força de cedência teórica, à força máxima e à força última. | 69 |
| Quadro 6-5 - Segunda série de vigas: força de cedência teórica, força máxima e força última. | 70 |
| Quadro 6-6 - Segunda série de vigas: flecha e deslocamento do equipamento de ensaio correspondentes à força de cedência teórica, à força máxima e à força última. | 70 |
| Quadro 6-7 - Comparação entre resultados analíticos e experimentais para as forças máximas e últimas de cada viga e respectivas diferenças relativas. | 71 |
| Quadro 6-8 - Índice de ductilidade em deslocamento. | 73 |
| Quadro 6-9 - Resultados médios do espaçamento e abertura de fendas esperados e obtidos experimentalmente. | 75 |
| Quadro 6-10 - Custo por unidade de momento resistente. | 78 |

SIMBOLOGIA

MAIÚSCULAS LATINAS

| | |
|----------------|--|
| A_5 | Extensão após rotura, medida numa base de $5 \times \phi$ |
| A_{gt} | Extensão total na força máxima |
| A_s | Área de armadura longitudinal inferior |
| $D_{mandril}$ | Diâmetro do mandril |
| E | Módulo de elasticidade do aço |
| E_{cm} | Valor médio do módulo de elasticidade do betão |
| $F_{max, exp}$ | Força máxima experimental |
| $F_{max, teo}$ | Força máxima teórica |
| $F_{p0,2}$ | Força limite convencional de proporcionalidade a 0,2% de extensão na armadura |
| $F_{ult, exp}$ | Força última experimental |
| $F_{ult, teo}$ | Força última teórica |
| $F_{y, teo}$ | Força de cedência teórica |
| L | Vão livre da viga |
| M | Momento flector |
| M_{Rd} | Momento resistente de cálculo |
| $M_{serviço}$ | Momento flector correspondente ao estado limite de utilização |
| $M_{u, teo}$ | Momento último |
| $M_{y, teo}$ | Momento de cedência teórico |
| P | Carga vertical aplicada pelo equipamento de ensaio |
| R_e | Tensão de cedência da armadura |
| R_m | Tensão de rotura à tracção da armadura |
| $R_{p0,2}$ | Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% de extensão na armadura |

MINÚSCULAS LATINAS

| | |
|-----------|---------------------------------------|
| $(1/r)_u$ | Curvatura última |
| $(1/r)_y$ | Curvatura de cedência |
| a | Altura da nervura |
| $a_{1/4}$ | Altura a $1/4$ da nervura |
| $a_{3/4}$ | Altura a $3/4$ da nervura |
| a_m | Altura máxima da nervura |
| b | Largura da viga |
| c | Afastamento das nervuras transversais |
| d | Altura útil da secção |
| d_{eq} | Deslocamento do equipamento de ensaio |

| | |
|---------------|--|
| f | Flecha |
| f_{cd} | Valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão |
| f_{cm} | Valor médio da tensão de rotura do betão à compressão |
| f_R | Área relativa das nervuras |
| f_s | Tensão média na armadura |
| $f_{serviço}$ | Flecha correspondente ao momento de serviço |
| f_{sy} | Valor médio da tensão de cedência da armadura |
| f_{syd} | Valor de cálculo da tensão de cedência do aço |
| f_{syk} | Valor característico da tensão de cedência do aço |
| l_0 | Comprimento livre do provete |

Maiúsculas Gregas

| | |
|--------------|-------------------------------------|
| Σe_i | Perímetro sem nervuras transversais |
|--------------|-------------------------------------|

Minúsculas Gregas

| | |
|-----------------|--|
| ε_s | Extensão na armadura |
| ϕ | Diâmetro da armadura |
| μ | Momento flector reduzido |
| μ_δ | Índice de ductilidade em deslocamento |
| ρ | Percentagem geométrica de armadura |
| $\sigma_{max.}$ | Tensão máxima no ensaio de fadiga |
| $\sigma_{min.}$ | Tensão mínima no ensaio de fadiga |
| $\tau_{0,01}$ | Tensão de aderência para 0,01 mm de deslizamento |
| $\tau_{0,1}$ | Tensão de aderência para 0,1 mm de deslizamento |
| $\tau_{1,0}$ | Tensão de aderência para 1,0 mm de deslizamento |
| $\tau_{máxima}$ | Tensão de aderência máxima |
| $\tau_{média}$ | Tensão de aderência média |
| ω | Percentagem mecânica de armadura |

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Enquadramento

A corrosão das armaduras ordinárias é uma das principais causas da deterioração prematura e, em situações limite, de colapso das estruturas de betão armado.

De uma maneira geral, a corrosão é a interacção físico-química de um metal com o meio envolvente do qual resultam alterações das propriedades do metal e frequentemente degradação funcional do mesmo. É um processo electroquímico, em geral espontâneo, e que aliado ou não a um esforço mecânico, afecta a durabilidade e o desempenho dos materiais.

A oxidação provocada pelo fenómeno da corrosão gera um aumento do volume da armadura inicialmente existente provocando, nas estruturas de betão armado, a delaminação do betão. Este fenómeno é fortemente acelerado se existir a penetração de cloretos. Em alguns locais, os cloretos podem já vir incorporados nos materiais usados para a produção do betão ou podem mais ou menos facilmente penetrar na camada de recobrimento se a superfície do betão estiver muito exposta a saís de degelo ou eventualmente em ambiente marítimo [1].

Actualmente, existem inúmeras técnicas não destrutivas ou pouco intrusivas para as estruturas, que permitem caracterizar as propriedades mecânicas e de durabilidade dos materiais constituintes que se suspeitam degradados devido à corrosão [2]. As técnicas que são mais utilizadas na avaliação da corrosão das armaduras, nomeadamente, "*in-situ*", são as seguintes:

- Detecção e medição do recobrimento de armaduras;
- Medição da profundidade de carbonatação no betão;
- Determinação do teor de cloretos na massa de ligante a várias profundidades (perfis);
- Medição da resistividade eléctrica do betão;
- Medição do potencial eléctrico das armaduras;
- Medição da intensidade de corrosão das armaduras.

Por outro lado, 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 das relações 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 [3].

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.

Segundo os especialistas, a degradação das armaduras devido à corrosão representa uma destruição anual de aproximadamente 15% da produção mundial de aço num ano [4], pelo que o interesse por materiais com boa resistência à corrosão tem vindo a aumentar, especialmente em países como o Reino Unido, o Canadá e os Estados Unidos que pretendem minimizar os impactos associados à monitorização e manutenção das estruturas de betão armado. 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 [5].

O maior exemplo de longevidade de uma estrutura executada com armaduras de aço inoxidável é uma ponte localizada em ambiente marítimo em Progreso, no estado do Yucatan no México, que foi construída entre 1937 e 1941. Segundo as autoridades locais, esta estrutura mantém um bom estado de conservação, não tendo sido objecto de grandes operações de manutenção ou reabilitação durante a sua vida útil. Em comparação, foi construída em 1960 uma ponte próxima usando armaduras de aço carbono que já não se encontra em uso devido ao seu avançado estado de deterioração [6].

Para além deste caso, existem muitas outras estruturas executadas um pouco por todo o mundo [3] [7] com utilização parcial ou mesmo total destas armaduras, uma vez que já existem diversos estudos [8] [9] [10] que validam a hipótese da utilização mista de aço carbono e aço inoxidável sem problemas de corrosão galvânica.

Contudo, apesar do bom desempenho das estruturas de betão com armaduras de aço inoxidável, o seu custo inicial limita bastante a sua utilização pelo que a procura de aços inoxidáveis de baixo custo é uma das preocupações da investigação que se desenvolve nesta área [11].

1.1.1 - Análises de custo no ciclo de vida

Apesar do elevado custo inicial das armaduras de aço inoxidável, a sua utilização pode facilmente ser justificada se forem feitas análises comparativas de custos no ciclo de vida, uma vez que só assim se pode perceber claramente quais os benefícios associados à utilização deste material.

Neste sentido, certos países estão a começar a exigir análises de custo no ciclo de vida (*life cycle cost analysis*) para novas estruturas cujo investimento necessário por parte do país exceda um determinado limite por oposição às tradicionais análises de investimento inicial [3].

Por exemplo, a análise de custo de diversas pontes rodoviárias revelou que a utilização selectiva de aço inoxidável poderia traduzir-se num incremento dos custos iniciais entre 1 e 15%, dependendo da dimensão e da complexidade da estrutura [3].

Mais recentemente foi publicado [12] um estudo comparativo dos custos iniciais associados à utilização total ou parcial de aço inoxidável em pontes rodoviárias típicas, cujos resultados para uma ponte se apresentam no quadro seguinte.

Quadro 1-1 - Comparação de custos para diferentes soluções de armadura [12].

| | | | | | |
|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| % Aço carbono | 100% | 90% | 75% | 50% | 0% |
| % Aço inoxidável | 0% | 10% | 25% | 50% | 100% |
| Custo total em € | 102.980 | 106.130 | 110.750 | 118.520 | 134.060 |
| Diferença | - | 3% | 7,5% | 15% | 30% |

Com este estudo [12] demonstra-se que numa dada estrutura é possível proteger da corrosão apenas os elementos estruturais localizados em ambiente agressivo com um custo adicional de 3%, desde que a substituição do aço carbono por aço inoxidável não exceda 10% da quantidade total de aço a utilizar.

No entanto, as mais valias do aço inoxidável não são só evidentes quando se compara o seu custo com o do aço carbono na vida útil da estrutura, pois existem também estudos [7] que fazem a comparação com outros materiais como por exemplo varões com revestimentos epoxídicos ou galvanizados, varões de FRP entre outros e que revelam que em certas estruturas a escolha do material mais caro não se traduz a longo prazo na solução menos económica.

No quadro seguinte apresentam-se as conclusões de um estudo comparativo de custos iniciais e de custo na vida útil de novas pontes com vários tipos de armadura no tabuleiro [7].

Quadro 1-2 - Comparação de custos iniciais e de custo na vida útil de novas pontes, com vários tipos de armadura no tabuleiro [7].

| Tipo de armadura | ECR ^Y ou varões galvanizados | MMFX 2 ^Y | FRPR ^Y | Varão de aço inoxidável | EnduraMet™ 32 ^Y |
|--|---|---------------------|-------------------|-------------------------|----------------------------|
| Custo do tabuleiro (comparado com o custo total da estrutura base) | 38,00% | 39,14% | 39,90% | 42,18% | 39,90% |
| Custo do aço (comparado com o custo total da estrutura base) | 31,00% | 31,00% | 30,50% | 30,50% | 30,50% |
| Custo das fundações (comparado com o custo total da estrutura base) | 25,00% | 25,00% | 24,00% | 24,00% | 24,00% |
| Custo da movimentação de terras etc. (comparado com o custo total da estrutura base) | 6,00% | 6,00% | 6,00% | 6,00% | 6,00% |
| Custo total inicial da estrutura | 100,00% | 101,14% | 100,40% | 102,68% | 100,40% |
| Vida útil estimada (anos) | 40 | 50 | 65 | 100 | 100 |
| Valor actualizado da substituição do tabuleiro no fim da vida útil da estrutura | 9,89% | 6,88% | 3,93% | 1,05% | 1,00% |
| Custo para vida útil de 100 anos (em percentagem do custo inicial da estrutura base) | 111,48% | 108,02% | 103,88% | 103,74% | 101,40% |

Por outro lado, podem ser adicionados aos custos de manutenção de uma estrutura, os encargos associados à interrupção de uma via de rodagem num eixo viário estratégico de

^Y ECR - Epoxy Coated Rebar; MMFX 2 - Microcomposite Multistructural Formable Steel; FRPR - Fiber Reinforced Plastic Rebar; EnduraMet™ 32 stainless - varão de aço inoxidável com baixo teor de níquel.

um país, que por sua vez se traduzem em encargos indirectos com gastos em combustíveis, com perdas de produtividade, com atrasos nas entregas de bens e na prestação de serviços.

A contabilização de todos estes custos indirectos permite justificar, para casos específicos de estruturas em que se pretende uma vida útil elevada, que a utilização de armaduras de aço inoxidável se traduz numa solução economicamente mais vantajosa, mesmo quando comparada com outros materiais mais resistentes à corrosão que o aço carbono [7].

Finalmente, a utilização de materiais que apresentam bom desempenho para estruturas com elevada vida útil pode também ser uma boa medida de preservação do meio ambiente, dada a necessidade crescente de redução dos consumos de energia e de diversas matérias-primas.

1.2 - Objectivos

A presente dissertação tem como principal objectivo avaliar a viabilidade da utilização mais generalizada de 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” [11].

Para tal, considerou-se imprescindível:

- identificar e avaliar as características gerais dos aços inoxidáveis bem como conhecer os requisitos previstos na regulamentação aplicável às armaduras de aço inoxidável;
- caracterizar adequadamente os 4 tipos de armaduras de aço inoxidável, pelo que se procedeu à sua caracterização química, mecânica e de aderência com o objectivo de serem conhecidas todas as características necessárias à utilização destes aços como armaduras ordinárias em estruturas de betão armado;
- validar o desempenho destes materiais, em especial das novas composições, em estruturas de betão armado verificando se as metodologias de cálculo habitualmente usadas permanecem válidas;
- estudar e avaliar o desempenho de elementos de betão armado em condições de serviço, em face da elevada deformabilidade de alguns dos tipos de aço inoxidável em estudo.

1.3 - Organização da Dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em sete capítulos de texto, um com a bibliografia referenciada e consultada para a realização deste trabalho e um anexo com a globalidade dos resultados dos ensaios realizados nos modelos de viga.

Numa primeira fase é feita a abordagem ao tema que adiante se desenvolve, fazendo o seu enquadramento e justificando o estudo que foi elaborado.

Seguidamente faz-se um levantamento exaustivo da regulamentação existente sobre os diferentes tipos de aços inoxidáveis e também sobre as armaduras deste material já usadas noutros países, sendo sistematizados todos os requisitos actualmente aplicáveis.

No Capítulo 3, são apresentados os pressupostos tidos em consideração para a concepção dos modelos usados para avaliar o desempenho das novas composições, sendo feito o seu dimensionamento e apresentada a pormenorização dos 12 modelos de viga a ensaiar.

A metodologia considerada para a previsão analítica do comportamento dos modelos é apresentada no Capítulo 4, bem como os resultados expectáveis para cada modelo.

Posteriormente, é feita a apresentação e a descrição do sistema de ensaio previsto e da instrumentação utilizada nos ensaios dos modelos, no Capítulo 5.

O Capítulo 6 inclui os resultados obtidos, a análise dos mesmos e ainda algumas considerações relativas à eficiência da utilização das novas composições de aços inoxidáveis.

A apreciação global do trabalho desenvolvido, em conjunto com a apresentação das principais conclusões que podem ser retiradas do mesmo é apresentada no Capítulo 7.

Finalmente, no Anexo A são apresentados, para cada viga ensaiada, todos os resultados obtidos no programa experimental desenvolvido.

CAPÍTULO 2 - CARACTERIZAÇÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

2.1 - Características gerais dos aços inoxidáveis

De acordo com a norma EN 10088-1:1995 "Stainless steels: - Part 1: List of stainless steels" [13], são considerados aços inoxidáveis os que contêm teores de Crómio de pelo menos 10,5% e teores de Carbono máximos de 1,2%. Os aços inoxidáveis podem agrupar-se em quatro categorias principais, consoante a sua microestrutura: martensítica, ferrítica, austenítica e austenítica-ferrítica (em geral designados por Duplex).

Cada um destes tipos apresenta características mecânicas e de resistência à corrosão específicas, sendo os dois últimos tipos os que apresentam características mais adequadas à sua utilização como armaduras de betão armado.

Os aços de estrutura austenítica são ligados com Crómio e Níquel, conjugando uma elevada resistência à corrosão com uma alta resistência mecânica associada a uma elevada ductilidade.

Foram realizados no Laboratório de Ensaios de Produtos Metálicos (LPM) do LNEC, ensaios de tracção de acordo com a norma EN 10002-1:2001 - "Metallic materials. Tensile testing. Part 1: Method of test at ambient temperature" [14] sobre varões lisos de aço inoxidável de microestrutura austenítica dos tipos AISI 304 e AISI 316 (ver ponto 2.1.1).

Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 2-1 e merece destaque a elevada ductilidade que estes varões apresentam relativamente ao varão de aço A500NR, também ensaiado.

Quadro 2-1 - Resultados dos ensaios de tracção realizados no LPM/LNEC.

| Tipo de varão | ϕ (mm) | $R_{p0,2}$ (MPa) | R_m (MPa) | A_{gt} (%) |
|---------------|----------------|---------------------|----------------|-----------------|
| A500NR | 12 | 551 | 659 | 13,2 |
| AISI 304 | 12 | 235 | 589 | 55,9 |
| AISI 316 | 12 | 226 | 552 | 58,9 |

Por outro lado, como os provetes de aço inoxidável ainda não foram endurecidos a frio, através de um processo de laminagem que os tornará nervurados, a força limite convencional de proporcionalidade a 0,2% ($F_{p0,2}$) é muito inferior à obtida no caso do varão de aço corrente. Após o endurecimento a frio os aços inoxidáveis apresentarão valores de

$F_{p0,2}$ significativamente superiores ao A500NR, mantendo ainda elevados valores de ductilidade.

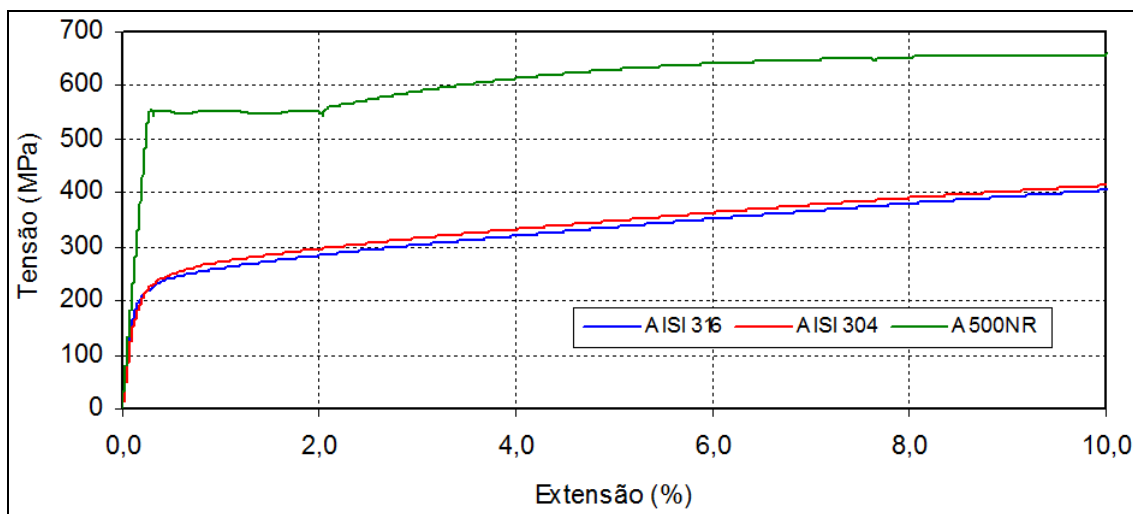


Figura 2-1 - Ensaio de tracção realizados pelo LPM/LNEC: Diagrama Tensão - Extensão.

A figura seguinte apresenta a relação entre a deformação sofrida pelos provetes e a respectiva força aplicada, que permite avaliar a elevada deformabilidade deste material. Na Figura 2-2 indica-se também o ponto em que é atingida a extensão de 10%, que corresponde à extensão máxima indicada na Figura 2-1.

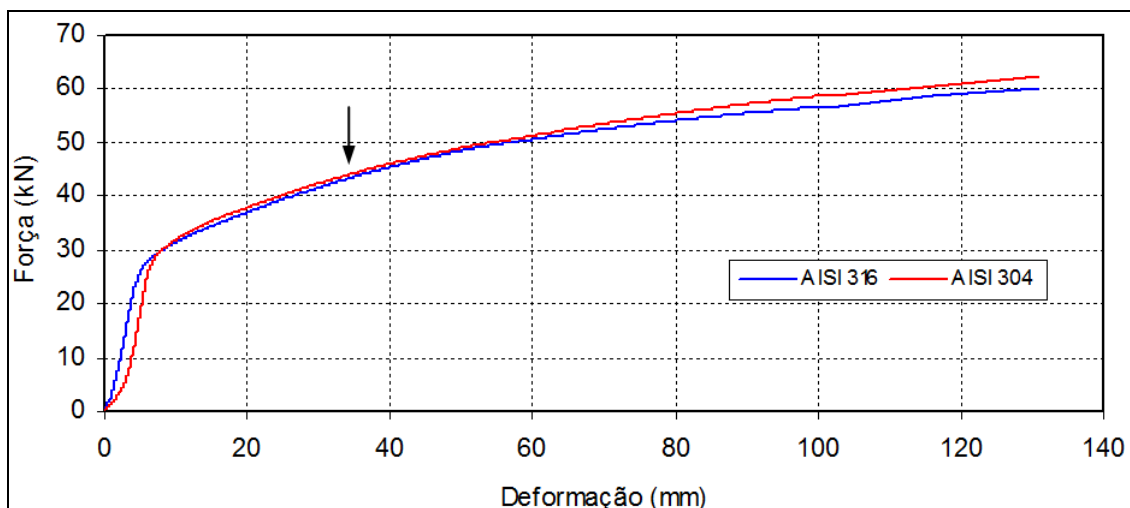


Figura 2-2 - Ensaio de tracção realizados no LPM/LNEC: Diagrama Força - Deformação.

2.1.1 - Armaduras para betão armado de aço inoxidável

A nível internacional existe desde 1986 uma norma que prevê a utilização destes aços em estruturas de betão armado, a BS 6744-1986: "Austenitic stainless steel bars for the reinforcement of concrete" [15], definindo as dimensões nominais da secção transversal e as respectivas tolerâncias de fabrico e ainda os aspectos mais relevantes em termos de

composição química e características mecânicas. Esta norma classifica os aços inoxidáveis do tipo austenítico, em termos de composição química (304S31 e 316S33) e em função da tensão de rotura (Classes 250 e 460).

No entanto, com a publicação em 1995 da EN 10088-1: "Stainless steels: - Part 1: List of stainless steels" [13], esta classificação deixou de ser adoptada, passando os aços inoxidáveis a ser designados por um número. Por exemplo, o aço 304S31 passou a ter a designação 1.4301 enquanto que o 316S33 passou a 1.4436.

Em 1996 surgiu a norma ASTM A955M-96: "Deformed and plain stainless steel bars for concrete" [16], revista em 2001 e que para além de referir uma gama mais variada de composições, prevê também a classificação em termos da tensão de rotura, mas em três classes diferentes (Classes 300, 420 e 520).

Na sequência da publicação da EN 10088-1:1995 [13] foi revista a BS 6744-1986 [15], que passou a ter a designação BS 6744-2001: "Stainless steel bars for the reinforcement of and use in concrete" [17], que se refere aos aços inoxidáveis do tipo austenítico e duplex, visto que são estes os tipos de aço que apresentam maior resistência à corrosão, sendo portanto os mais adequados à utilização em betão armado.

De acordo com esta última versão da norma BS 6744 [17], um varão de aço inoxidável apenas estará devidamente especificado se for feita referência aos seguintes aspectos:

- Designação do aço definida a partir da composição química;
- Classe de resistência;
- Diâmetro nominal;
- Forma do produto (varão liso ou nervurado).

A selecção da composição química é nos aços inoxidáveis de extrema importância pois a esta encontra-se associada uma maior ou menor resistência à corrosão e também um maior ou menor custo. Por isso, a selecção do aço inoxidável a utilizar não deve ser efectuada apenas em função das suas características resistentes, devendo ter-se também em consideração as condições de exposição da estrutura.

Com o objectivo de sistematizar as zonas de aplicação dos diferentes tipos de aço inoxidável, a BS 6744:2001 [17] efectua a divisão dos diferentes tipos de aços inoxidáveis em função das condições de exposição a que o elemento estrutural vai estar sujeito, conforme se apresenta no Quadro 2-2.

Relativamente às características mecânicas dos varões de aço inoxidável, aquilo que é previsto pela BS 6744-2001 [17] é em tudo equivalente ao habitualmente usado para caracterizar os varões de aço corrente:

- tensão de rotura, R_m ;
- tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%, $R_{p0,2}$;
- relação entre os valores da tensão de rotura e da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% obtida em cada ensaio, $R_m/R_{p0,2}$;
- extensão após rotura, A_5 ;
- extensão total na força máxima, A_{gt} .

Quadro 2-2 - Tipos de aço inoxidável a utilizar em função das condições de exposição definidas pela BS 6744:2001 [17].

| Condição de Exposição | Designação do aço de acordo com a EN 10088 [13] (conforme identificação da BS 6744:2001 [17]) | Designação prevista pela BS 6744:1986 [15] |
|--|---|--|
| Armaduras de aço inoxidável em betão sujeito a uma exposição normal a cloretos, em paramentos inferiores de tabuleiros, vigas de bordadura, paredes resistentes, ligações e subestruturas. | 1.4301 | 304S31 |
| Como acima mas onde são reduzidas algumas exigências para garantir a durabilidade, como por exemplo o recobrimento. | 1.4301 | 304S31 |
| Como acima mas onde foram reduzidas as exigências para garantir a durabilidade, por razões específicas da estrutura ou do elemento, por exemplo por não ser possível garantir a estanquidade do betão. | 1.4436 | 316S33 |
| Exposição directa a cloretos e águas com cloretos, por exemplo chumbadores, parafusos expostos e outros elementos salientes do betão. | 1.4429 1.4436 | Sem equivalência 316S33 |
| Exigências estruturais especiais para a utilização de armaduras de alta resistência e apropriados para todas as condições de exposição. | 1.4462 1.4429 | 318S13 Sem equivalência |

Quadro 2-3 - Características mecânicas definidas pela BS 6744:2001 [17].

| Classe de Resistência | $R_{p0,2}$ (N/mm ²) | $R_m/R_{p0,2}$ | A_5 (%) | A_{gt} (%) |
|-----------------------|------------------------------------|----------------|--------------|-----------------|
| 200 ^Y | 200 | 1,10 | 22 | 5 |
| 500 | 500 | 1,10 | 14 | 5 |
| 650 | 650 | 1,10 | 14 | 5 |

Em 1993 foi elaborado por Paolucci, Mario Gian et al. [18] um estudo que visava avaliar a ductilidade dos aços inoxidáveis. Para tal, foram realizados vários ensaios de tracção sobre varões nervurados do tipo AISI 316L de diâmetros 6, 8, 10, 12, 16, 20 e 25 mm, tendo sido os quatro primeiros diâmetros obtidos por endurecimento a frio enquanto que os restantes foram obtidos por laminagem a quente. Os valores médios obtidos por estes autores relativos aos 5 ensaios realizados por cada diâmetro ensaiado, apresentam-se no Quadro 2-4, sendo de salientar as elevadas resistências e ductilidades obtidas.

Quadro 2-4 - Resultados obtidos para a média dos 5 ensaios realizados por diâmetro [18].

| ϕ (mm) | $R_{p0,2}$ (N/mm ²) | R_m (N/mm ²) | $R_m/R_{p0,2}$ | A_5 (%) | A_{gt} (%) |
|----------------|------------------------------------|-------------------------------|----------------|--------------|-----------------|
| 25 | 558 | 721 | 1,292 | 29,3 | 22,7 |
| 20 | 616 | 746 | 1,211 | 31,3 | 19,2 |
| 16 | 645 | 779 | 1,207 | 27,8 | 16,6 |
| 12 | 684 | 830 | 1,213 | 20,4 | 5,7 |
| 10 | 684 | 814 | 1,190 | 21,2 | 5,9 |
| 8 | 733 | 880 | 1,200 | 18,9 | 2,6 |
| 6 | 726 | 868 | 1,195 | 20,7 | 6,0 |

2.2 - Caracterização dos aços inoxidáveis usados na execução das vigas

Actualmente os aços inoxidáveis usados na forma de varões para estruturas de betão cuja utilização se encontra mais divulgada são os aços dos tipos 304S31 e 316S33, que passaram a ser designados respectivamente por 1.4301 e 1.4436, de acordo com a EN 10088-1: 1995 [13], sendo no entanto vulgarmente designados por AISI304 e AISI316. Todavia, o AISI316 é utilizado sobretudo quando se prevê que os elementos estruturais vão estar inseridos em

^Y apenas em varões lisos

ambientes muito ricos em cloretos, visto que o seu teor de Molibdénio garante uma elevada resistência à corrosão por picadas.

No entanto, como já foi referido, o seu elevado custo é a sua principal desvantagem e portanto, a utilização dos aços inoxidáveis em estruturas de betão armado requer uma aplicação muito criteriosa.

Com vista a minimizar o impacto associado ao elevado custo dos aços inoxidáveis foram desenvolvidas 3 novas composições designadas por: HSS1, HSS2 e HSS3, no âmbito do Projecto Europeu HIPER - “Increased infrastructure reliability by developing a low and high performance stainless steel rebars” [11]. Contudo a composição HSS2 acabou por ser abandonada, uma vez que não cumpria os objectivos a que se propunha: baixo custo e facilidade de fabrico.

As composições HSS1 e HSS3 foram produzidas em dois diâmetros diferentes (12 e 14 mm) e também segundo dois processos diferentes: endurecimento a frio e laminagem a quente.

Os varões dos tipos HSS1 e AISI 316 (12 mm) foram obtidos por endurecimento a frio a partir de fios lisos, apresentando um perfil de 4 séries de nervuras transversais. Por outro lado, os varões dos tipos HSS3 e AISI 316 (16 mm) foram obtidos por laminagem a quente e apresentam um perfil com 2 séries de nervuras transversais.

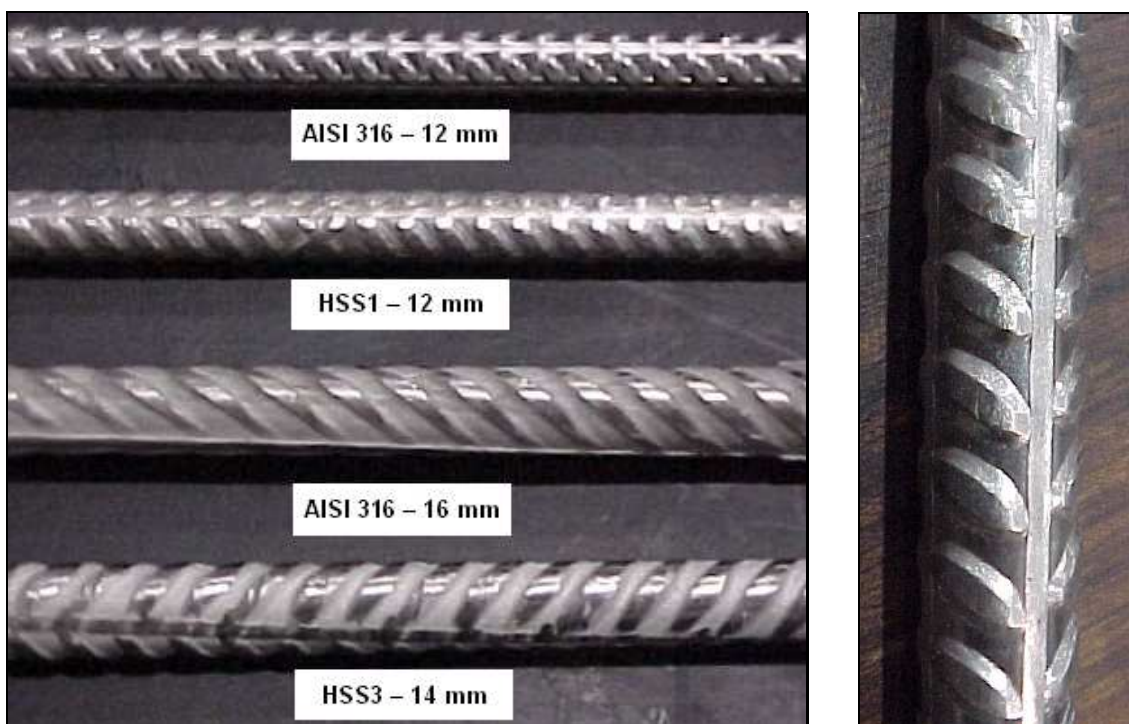


Figura 2-3 - Aspecto geral da superfície dos 4 tipos de varão em estudo e pormenor do perfil nervurado dos varões de 12 mm.

2.2.1 - Composição química

Para além dos estudos de composição química elaborados no âmbito do projecto de investigação HIPER [11], a composição química dos diferentes tipos de aços inoxidáveis em análise foi também determinada no Laboratório de Ensaios de Materiais e Revestimentos Inorgânicos (LEMRI) do LNEC.

Os ensaios foram realizados através de espectrometria de emissão óptica por fonte de faísca de acordo com a norma ASTM E1086-94 (2005) - “Standard Test Method for Optical Emission Vacuum Spectrometric Analysis of Stainless Steel by the Point-to-Plane Excitation Technique” [18].

Os resultados obtidos pelo LEMRI, para a composição química dos aços em estudo, apresentam-se no Quadro 2-5.

Quadro 2-5 - Composição química dos aços inoxidáveis em estudo.

| Tipo de aço | AISI 316 | HSS1 | AISI 316 | HSS3 |
|-----------------|----------|--------|----------|--------|
| Diâmetro (mm) | 12 | 12 | 16 | 14 |
| Carbono (C) | 0,021 | 0,070 | 0,053 | 0,041 |
| Enxofre (S) | 0,023 | <0,001 | 0,003 | <0,001 |
| Silício (Si) | 0,36 | 0,19 | 0,41 | 0,39 |
| Fósforo (P) | 0,03 | 0,02 | 0,03 | 0,02 |
| Manganês (Mn) | 1,86 | 8,14 | 1,85 | 11,30 |
| Crómio (Cr) | 17,38 | 16,52 | 17,49 | 16,85 |
| Níquel (Ni) | 12,85 | 0,22 | 10,48 | 2,17 |
| Cobre (Cu) | 0,34 | 1,94 | 0,35 | 2,50 |
| Molibdénio (Mo) | 2,699 | <0,005 | 1,956 | 0,073 |
| Vanádio (V) | 0,098 | 0,069 | 0,090 | 0,067 |
| Azoto (N) | 0,061 | 0,158 | 0,159 | 0,364 |

Como seria de esperar, tendo em consideração os pressupostos do projecto de investigação, os resultados obtidos revelam a diferença substancial que existe entre os teores de Molibdénio dos aços AISI 316 e as novas composições (HSS1 e HSS3) bem como a diferença acentuada existente entre os teores de Níquel e de Manganês dos aços AISI 316 e as novas composições, dado que se tentou aumentar a quantidade dos elementos de menor custo (Mn) e reduzir a quantidade dos elementos de maior impacto no custo final dos aços inoxidáveis (Ni e Mo), de acordo com o Quadro 2-6.

Quadro 2-6 - Custo das matérias-primas [11].

| Elemento | Custo (€/kg) |
|-----------------|--------------|
| Crómio (Cr) | 3,4 |
| Níquel (Ni) | 7,9 |
| Manganês (Mn) | 1,0 |
| Molibdénio (Mo) | 7,9 |
| Cobre (Cu) | 1,7 |

2.2.2 - Caracterização mecânica

2.2.2.1 - Comportamento à tracção

A caracterização do comportamento à tracção, visando a sua aplicação como armaduras para betão armado, exige a determinação dos seguintes parâmetros:

- Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%, $R_{p0,2}$;
- Tensão de rotura, R_m ;
- Relação entre os valores da tensão de rotura e da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% obtida em cada ensaio, $R_m/R_{p0,2}$;
- Extensão total na força máxima, A_{gt} ;
- Módulo de elasticidade, E .

Os ensaios de tracção realizados foram executados de acordo com a norma EN 10002-1:2001 [14], tendo sido obtidos os valores médios constantes do quadro seguinte.

Quadro 2-7 - Valores médios (3 provetes) dos resultados dos ensaios de tracção realizados pelo LPM/LNEC.

| 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 |

Os resultados obtidos evidenciam os elevados níveis de resistência dos varões endurecidos a frio em especial no tipo HSS1, em comparação com os varões laminados a quente, nos quais se destaca a elevada ductilidade, sendo neste caso de salientar o nível de ductilidade dos varões do tipo HSS3. Relativamente aos varões do tipo AISI316 de 12 mm salienta-se o baixo módulo de elasticidade deste material quando comparado com os restantes aços inox em análise.

Na figura seguinte apresenta-se o comportamento típico em tracção dos 4 tipos de varões usados na execução dos modelos de viga deste trabalho.

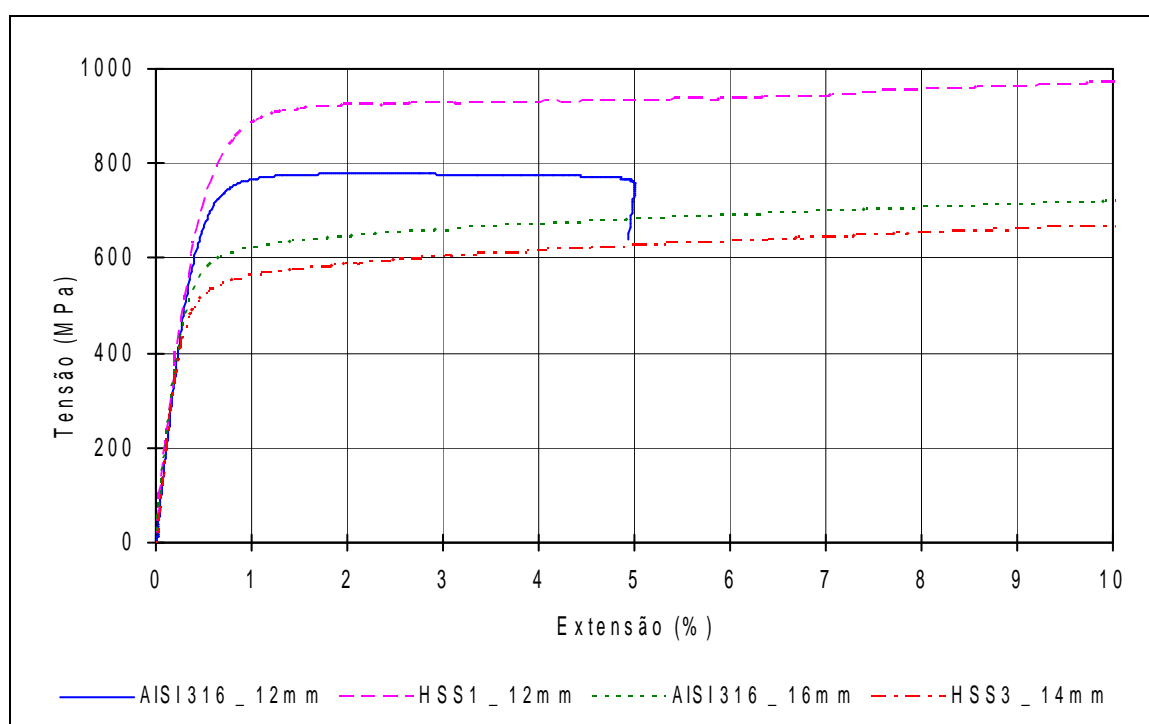


Figura 2-4 - Ensaio de tracção realizados no LPM/LNEC: Diagrama Tensão - Extensão.

Assim pode concluir-se que em termos de comportamento à tracção, as novas composições (HSS1 e HSS3) se enquadram perfeitamente no comportamento exigível em Portugal para os varões de ductilidade normal do tipo A500NR [20].

Finalmente, salienta-se que durante a realização dos ensaios foi possível constatar que os varões do tipo HSS1 apresentam uma rotura brusca e sem estricção ao contrário dos varões do tipo HSS3. Este fenómeno foi também detectado por outros parceiros do projecto [21] tendo-se chegado à conclusão de que este comportamento pode estar relacionado com as fendas detectadas na análise microscópica da superfície de rotura dos provetes ensaiados à tracção.

2.2.2.2 - Aptidão à dobragem

A avaliação da aptidão à dobragem dos varões foi feita através de ensaios de dobragem simples ou de ensaios de dobragem-desdobragem, consoante o diâmetro nominal dos provetes. Os ensaios foram realizados nas condições previstas pela norma EN ISO 15630-1:2002 [22].

Os resultados obtidos nos ensaios realizados apresentam-se no Quadro 2-8 e permitem concluir que todos os tipos de aço inoxidável são aptos à dobragem.

Quadro 2-8 - Resultados obtidos nos ensaios para aptidão à dobragem.

| Tipo de aço | ϕ (mm) | Tipo de ensaio | D_{mandril} (mm) | Resultado |
|-------------|-------------|------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| AISI 316 | 12 | Dobragem simples | 36 | Sem fendas visíveis a olho nu |
| HSS1 | 12 | Dobragem simples | 36 | Sem fendas visíveis a olho nu |
| AISI 316 | 16 | Dobragem - desdobragem | 96 | Sem fendas visíveis a olho nu |
| HSS3 | 14 | Dobragem - desdobragem | 50 | Sem fendas visíveis a olho nu |



Figura 2-5 - Pormenor da execução do ensaio de dobragem no LPM/LNEC.

2.2.2.3 - Resistência a acções cíclicas

A resistência a acções cíclicas foi efectuada a partir da realização do ensaio previsto pela especificação LNEC E 460:2002 [23], que consiste em submeter um provete a ciclos completos de histerese tracção - compressão, simétricos, nas seguintes condições:

- Deformação máxima: $\pm 2,5\%$;

- Frequência: < 3 Hz;
- Comprimento livre do provete (l_0): $10 \times \phi$.

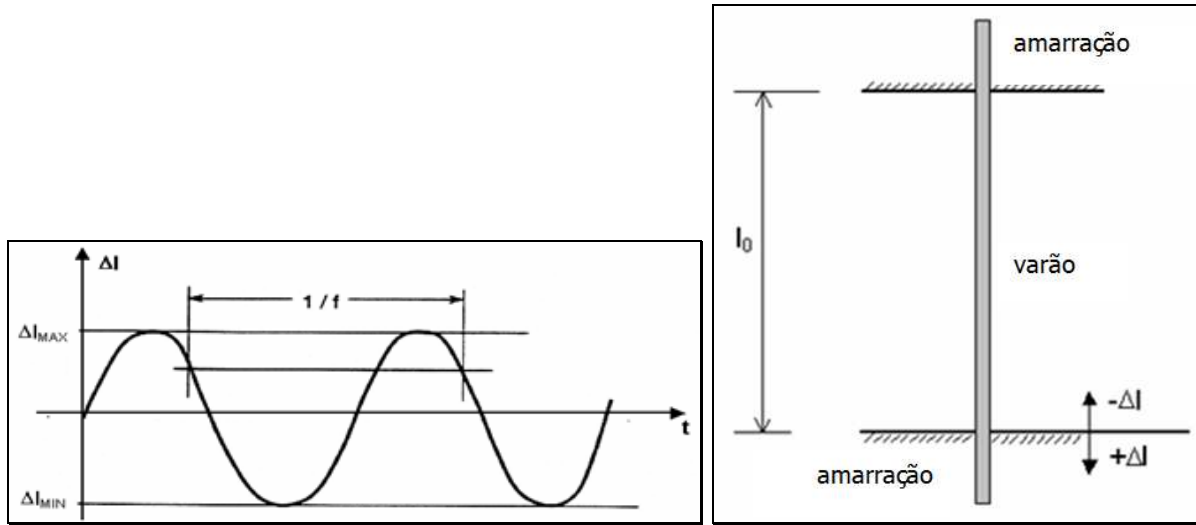


Figura 2-6 - Condições de realização do ensaio cíclico alternado.

Nas figuras seguintes apresentam-se os diagramas força - deslocamento obtidos nos ensaios realizados sobre os provetes do tipo AISI 316 e HSS1.

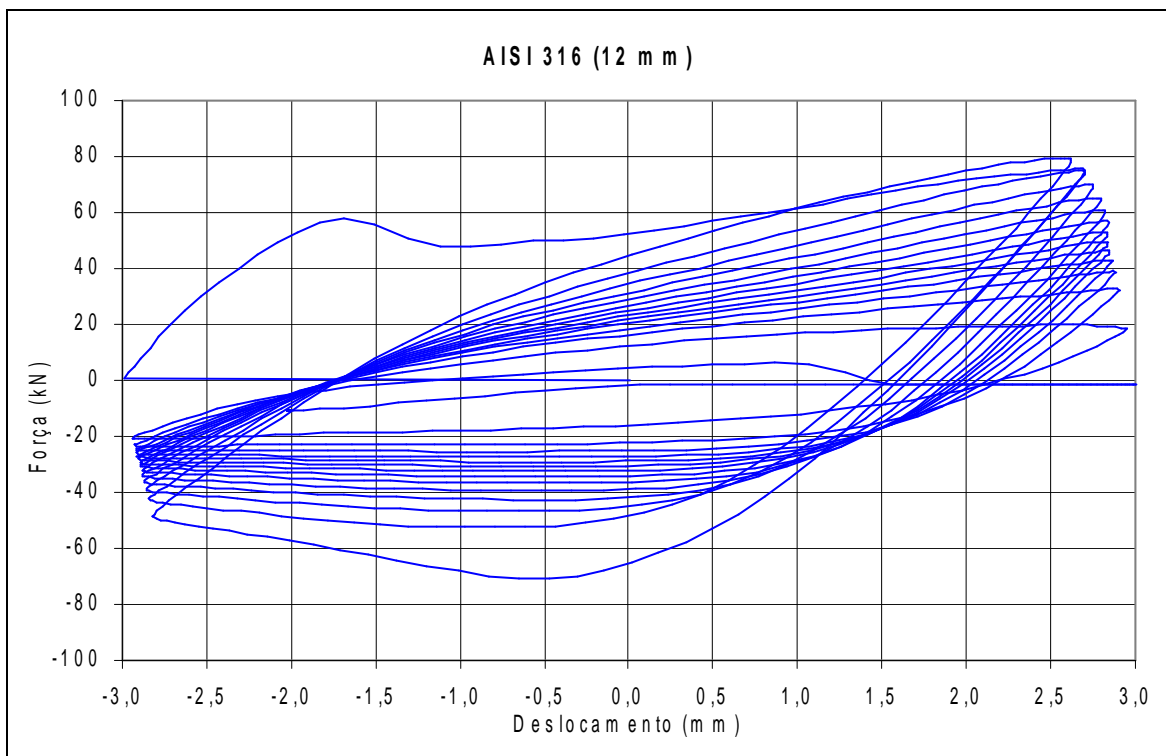


Figura 2-7 - Exemplo do diagrama força - deslocamento obtido no ensaio realizado sobre o provete do tipo AISI316 (12 mm).

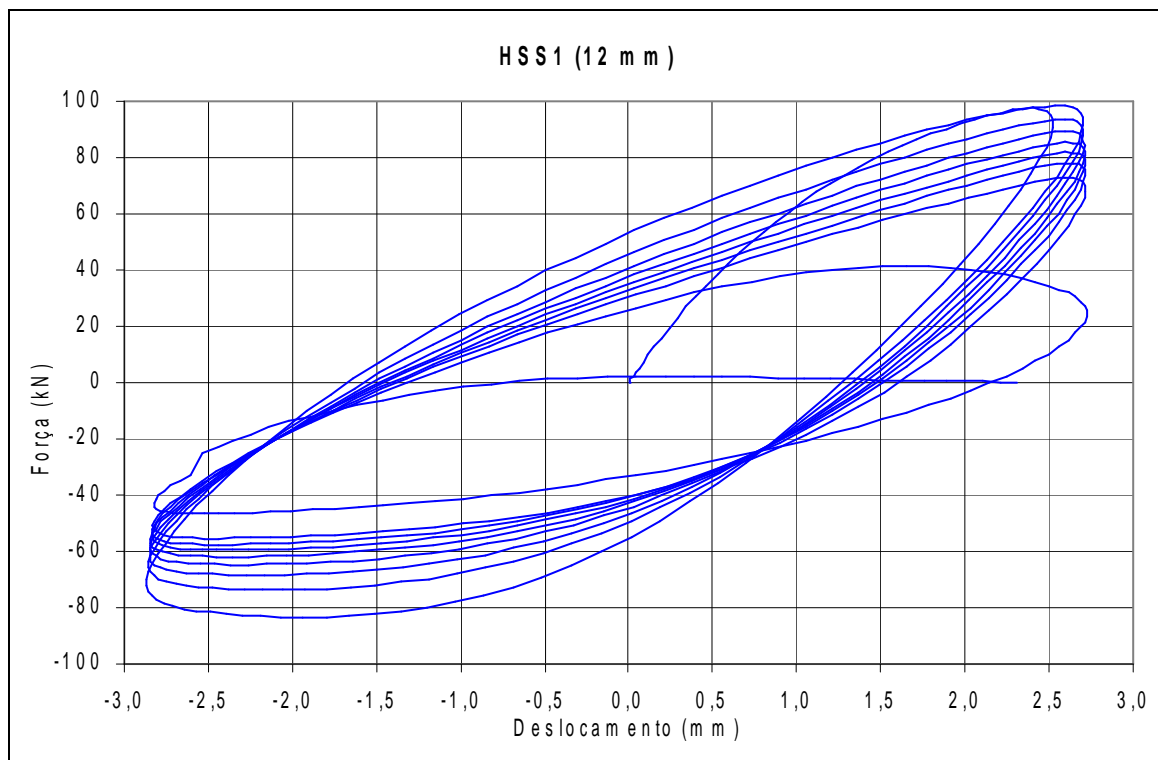


Figura 2-8 - Exemplo do diagrama força - deslocamento obtido no ensaio realizado sobre o provete do tipo HSS1 (12 mm).

No quadro seguinte resumem-se os resultados obtidos para cada um dos tipos de aço ensaiados, salientando-se que para o tipo HSS3 não foi possível determinar o número exacto de ciclos suportados sem rotura, sabendo-se apenas que os provetes ensaiados ultrapassaram a barreira dos 10 ciclos, que corresponde ao número mínimo de ciclos que deve suportar um varão para que possa ser considerado de ductilidade especial, de acordo com as exigências da Especificação LNEC E 460:2002 [23].



Figura 2-9 - Aspecto geral dos varões de aço inox após os ensaios cíclicos alternados.

Quadro 2-9 - Resultados obtidos nos ensaios cíclicos alternados.

| Tipo de aço | ϕ (mm) | N.º de ciclos |
|-------------|-------------|---------------|
| AISI 316 | 12 | 14 |
| HSS1 | 12 | 9 |
| AISI 316 | 16 | 32 |
| HSS3 | 14 | >10 |

2.2.2.4 - Resistência à fadiga

A avaliação da resistência à fadiga dos varões foi feita através da realização de ensaios de fadiga, nas condições previstas pela Especificação LNEC E 460:2002 [23]:

- Tensão máxima: $\sigma_{\max} = 300$ MPa;
- Tensão mínima: $\sigma_{\min} = 150$ MPa;
- Frequência: ≤ 200 Hz;
- Comprimento livre mínimo do provete: máximo {140 mm; $14 \times \phi$ }.

Os resultados obtidos resumem-se no quadro seguinte e demonstram a adequada resistência à fadiga do tipo AISI 316 ao contrário dos varões dos tipos HSS1 e HSS3, embora o ensaio realizado sobre o varão do tipo HSS1 não possa ser considerado válido, uma vez que a rotura ocorreu junto a uma amarração. Todavia, suspeita-se que os resultados obtidos nos ensaios de fadiga possam de alguma forma estar relacionados com as heterogeneidades detectadas na estrutura microscópica destes materiais [21].

Quadro 2-10 - Resultados obtidos nos ensaios de fadiga.

| Tipo de aço | ϕ (mm) | N.º de ciclos ($\times 10^3$) | Observações |
|-------------|-------------|---------------------------------|--------------------------------|
| AISI 316 | 12 | 2000 | Sem rotura |
| HSS1 | 12 | 636 | Rotura na zona de amarração |
| AISI 316 | 16 | 2000 | Sem rotura |
| HSS3 | 14 | 1656 | Rotura na zona útil do provete |



Figura 2-10 - Aspecto geral dos varões de aço inox após ensaio de fadiga.

2.2.3 - Caracterização de aderência

2.2.3.1 - Geometria das nervuras

Com vista à determinação da área relativa das nervuras transversais de acordo com a norma EN ISO 15630-1:2002 [22] a avaliação da geometria das nervuras envolve a medição dos seguintes parâmetros:

- Altura das nervuras (a) em três posições (medição a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$ de cada nervura);
- Afastamento das nervuras transversais (c);
- Perímetro sem nervuras transversais ($\sum e_i$).

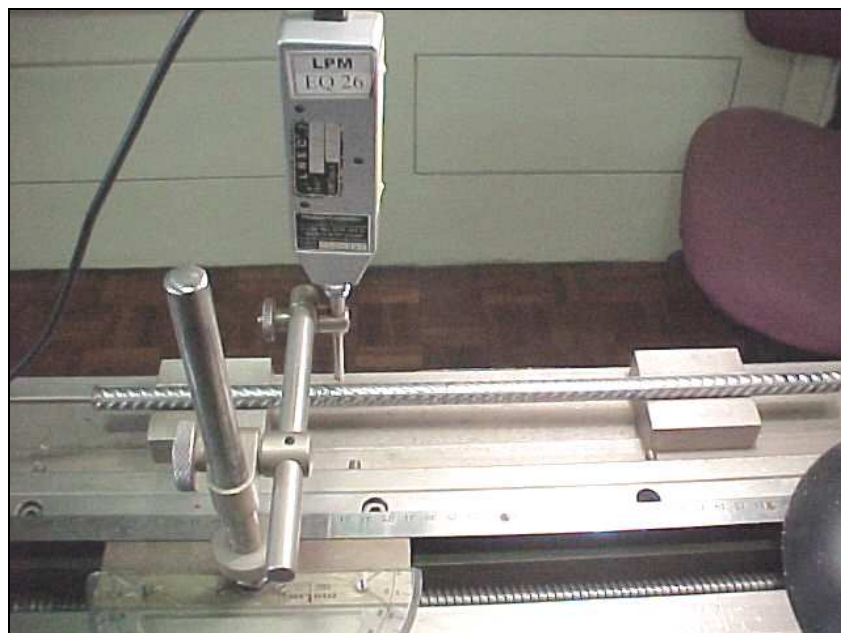


Figura 2-11 - Aspecto geral do sistema de medição de nervuras utilizado.

De acordo com a norma EN ISO 15630-1:2002 [22], a avaliação da área relativa das nervuras transversais (f_R) pode ser feita por recurso a três fórmulas distintas:

- Fórmula do Trapézio (a): $f_R = \left(a_{\frac{1}{4}} + a_m + a_{\frac{3}{4}} \right) \times \left(\pi \times \phi - \sum e_i \right) \times \frac{1}{4 \times \pi \times \phi \times c}$;
- Regra de Simpson (b): $f_R = \left(2 \times a_{\frac{1}{4}} + a_m + 2 \times a_{\frac{3}{4}} \right) \times \left(\pi \times \phi - \sum e_i \right) \times \frac{1}{6 \times \pi \times \phi \times c}$;
- Fórmula da Parábola (c): $f_R = \frac{2 \times a_m}{3 \times \pi \times \phi \times c} \times \left(\pi \times \phi - \sum e_i \right)$.

A determinação da área relativa das nervuras segundo estes três critérios permite concluir que a utilização da Fórmula do Trapézio conduz à obtenção de valores inferiores aos obtidos pela Regra de Simpson, que se considera como sendo a expressão que melhor se adequa à geometria das nervuras conduzindo portanto aos valores mais exactos da área relativa das nervuras transversais. Por outro lado, os resultados obtidos pela utilização da Fórmula da Parábola constituem a melhor forma de se obter uma boa aproximação da área exacta das nervuras, efectuando apenas a determinação da altura máxima das nervuras.

Quadro 2-11 - Valores médios obtidos nas medições de nervuras realizadas pelo LPM/LNEC.

| Tipo de aço | ϕ (mm) | $a_{\frac{1}{4}}$ (mm) | a_m (mm) | $a_{\frac{3}{4}}$ (mm) | c (mm) | $\sum e_i$ (mm) | f_R a) | f_R b) | f_R c) |
|-------------|----------------|---------------------------|---------------|---------------------------|-----------|--------------------|-------------|-------------|-------------|
| AISI 316 | 12 | 0,47 | 0,62 | 0,49 | 6,77 | 7,25 | 0,047 | 0,051 | 0,049 |
| HSS1 | 12 | 0,50 | 0,67 | 0,60 | 6,76 | 9,06 | 0,050 | 0,054 | 0,050 |
| AISI 316 | 16 | 0,80 | 1,06 | 0,93 | 10,18 | 4,89 | 0,062 | 0,066 | 0,063 |
| HSS3 | 14 | 0,65 | 0,90 | 0,68 | 8,71 | 5,86 | 0,055 | 0,059 | 0,060 |

A comparação dos valores médios obtidos com os valores de referência permite concluir que apenas os varões dos tipos AISI316 (16 mm) e HSS3 (14mm) apresentam uma área relativa média superior ao limite previsto pelas Especificações LNEC E 450:1998 [20] e E460: 2002 [23], que complementam as exigências do REBAP [24]. No entanto, todos os varões cumprem os limites impostos pela EN 10080:2005 [25] e pelo Eurocódigo 2 (EN 1992 - 1-1: 2004 [26]).

Quadro 2-12 - Valores de referência da área relativa das nervuras transversais (f_R).

| ϕ (mm) | Especificações LNEC [20] e [23] | Eurocódigo 2 [26] |
|----------------|------------------------------------|-------------------|
| 12 | 0,056 | 0,040 |
| 14 | - | 0,056 |
| 16 | 0,056 | 0,056 |

2.2.3.2 - Ensaio de *pull-out*

Os provetes para a realização dos ensaios de *pull-out* foram elaborados de acordo com o Anexo D da EN 10080:2005 [25] que por sua vez segue as recomendações da RILEM [27].

Assim, foram preparados 18 provetes de acordo com o esquema da Figura 2-12, que foram identificados conforme definido no quadro seguinte.

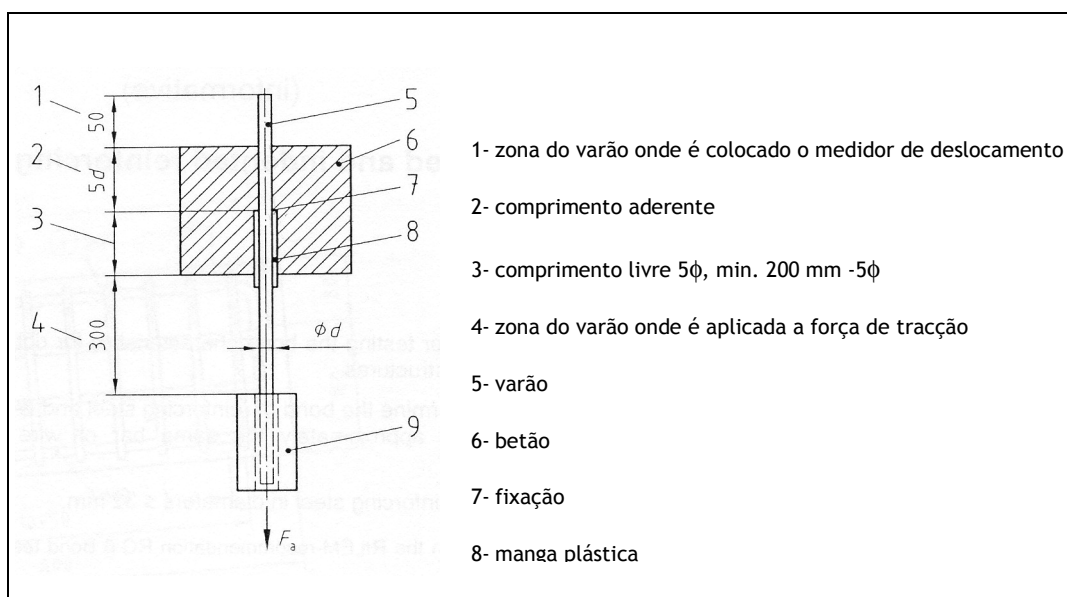


Figura 2-12 - Esquema de preparação dos provetes para ensaios de *pull-out*.

Quadro 2-13 - Identificação dos provetes para ensaios de *pull-out*.

| Tipo de aço | ϕ (mm) | Identificação dos provetes |
|-------------|----------------|--|
| A500NR | 12 | A500_12_1 A500_12_2 A500_12_3 |
| AISI316 | 12 | AISI316_12_1 AISI316_12_2 AISI316_12_3 |
| HSS1 | 12 | HSS1_12_1 HSS1_12_2 HSS1_12_3 |
| AISI316 | 16 | AISI316_16_1 AISI316_16_2 AISI316_16_3 |
| HSS3 | 14 | HSS3_14_1 HSS3_14_2 HSS3_14_3 |

De acordo com o previsto na norma de referência para estes ensaios, os provetes possuíam o comprimento aderente definido no Quadro 2-14.

Quadro 2-14 - Dimensão dos cubos e da zona aderente em função do diâmetro da armadura.

| Tipo de aço | ϕ (mm) | Dimensão do cubo (mm) | Comprimento aderente (mm) | Comprimento livre (mm) |
|-------------|----------------|--------------------------|------------------------------|---------------------------|
| A500NR | 12 | 200 | 60,0 | 140,0 |
| AISI316 | 12 | 200 | 60,0 | 140,0 |
| HSS1 | 12 | 200 | 60,0 | 140,0 |
| AISI316 | 16 | 200 | 80,0 | 120,0 |
| HSS3 | 14 | 200 | 70,0 | 130,0 |

O betão utilizado na preparação dos provetes possuía à data dos ensaios uma resistência à compressão média de 61 MPa, em cubos com 15 cm de lado. Desta forma, todos os valores das tensões de aderência que se apresentam foram corrigidos na razão de 30/61, para que seja possível comparar os resultados obtidos com os valores de referência, que têm por base um betão com 30 MPa de resistência à compressão.



Figura 2-13 - Vista geral dos provetes, sistemas de ensaio e medição usados nos ensaios de *pull-out*.

Como referência foram também preparados e ensaiados 3 provetes com varões de aço do tipo aço A500NR com 12 mm de diâmetro. Os resultados obtidos apresentam-se na Figura 2-14, devendo salientar-se que o primeiro ensaio foi realizado em controlo de deslocamento e não em controlo de força, como todos os restantes que são apresentados, não sendo portanto representativo.

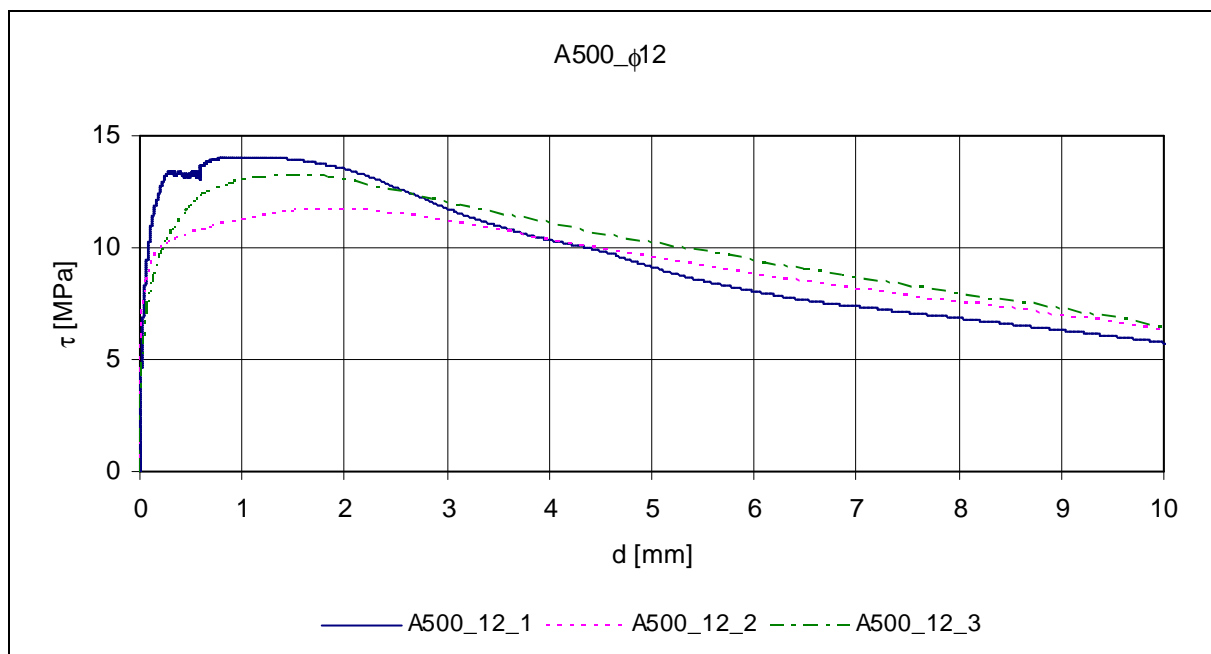


Figura 2-14 - Resultados obtidos nos ensaios de *pull-out* realizados sobre os varões do tipo A500NR de 12 mm de diâmetro.

Para cada tipo de aço inoxidável em estudo foram preparados e ensaiados 3 provetes, tendo sido obtidos os resultados que se apresentam nas figuras seguintes.

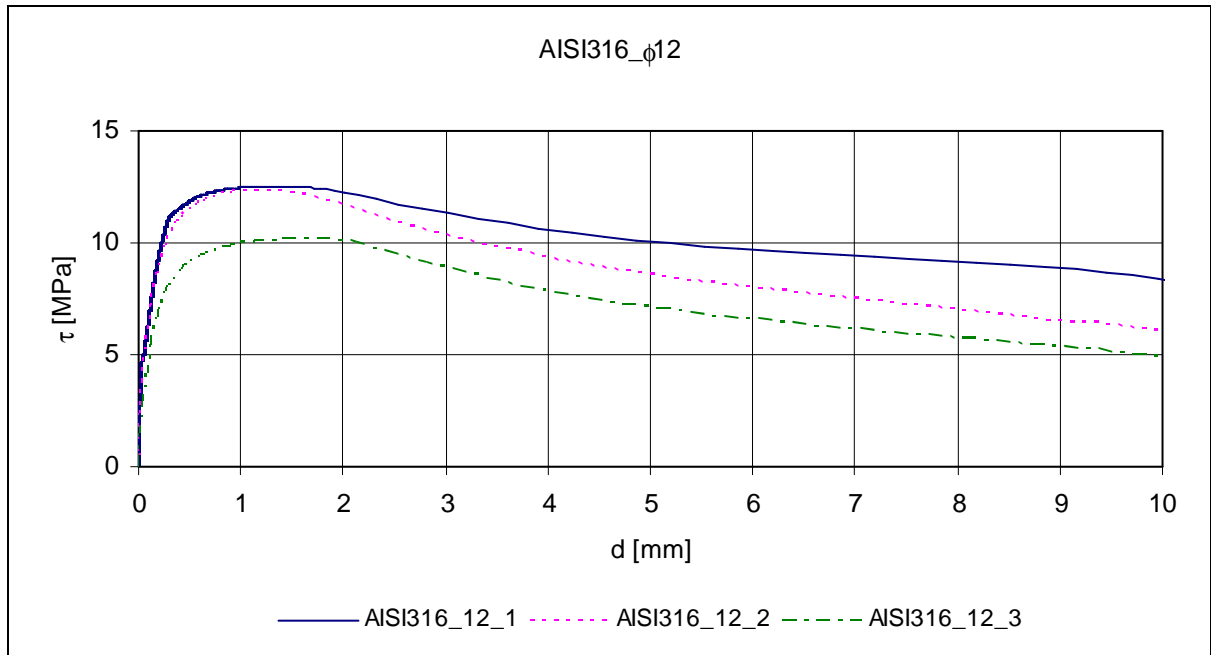


Figura 2-15 - Resultados obtidos nos ensaios de *pull-out* realizados sobre os varões do tipo AISI316 de 12 mm de diâmetro.

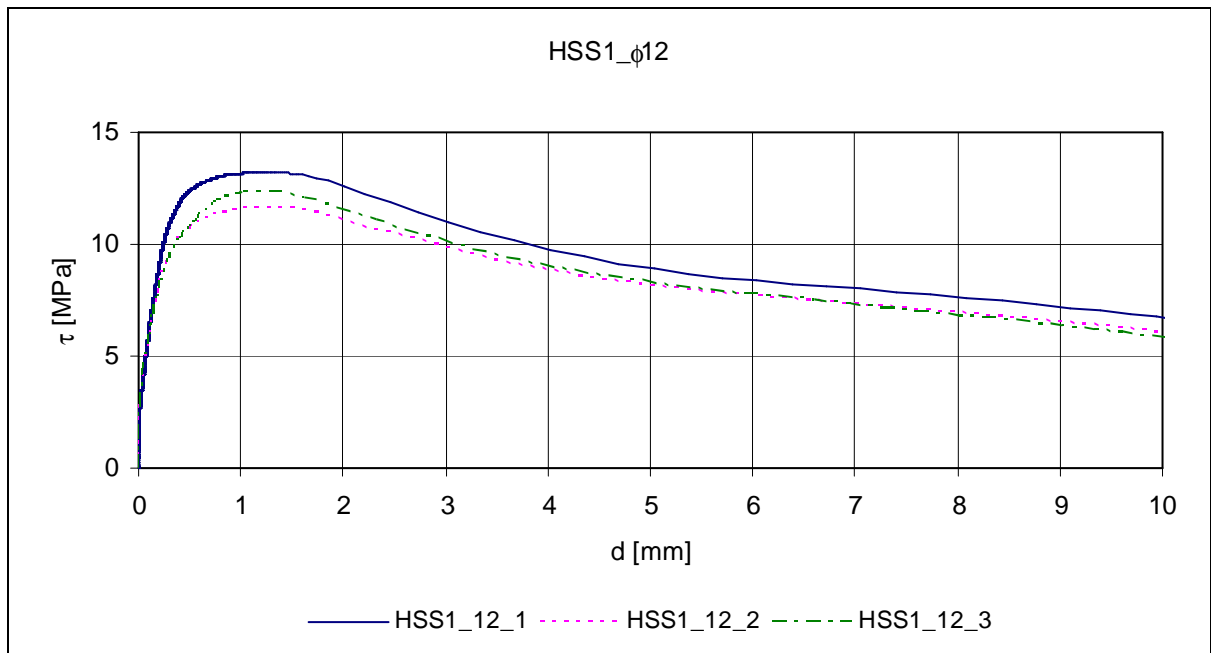


Figura 2-16 - Resultados obtidos nos ensaios de *pull-out* realizados sobre os varões do tipo HSS1 de 12 mm de diâmetro.

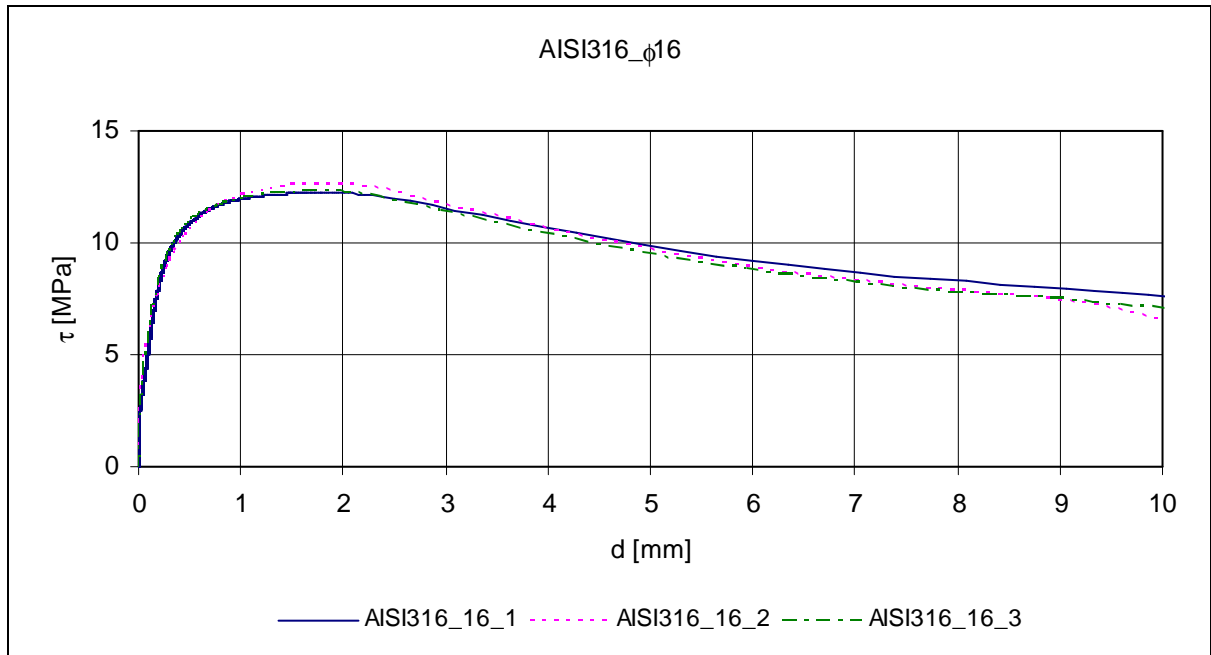


Figura 2-17 - Resultados obtidos nos ensaios de *pull-out* realizados sobre os varões do tipo AISI316 de 16 mm de diâmetro.

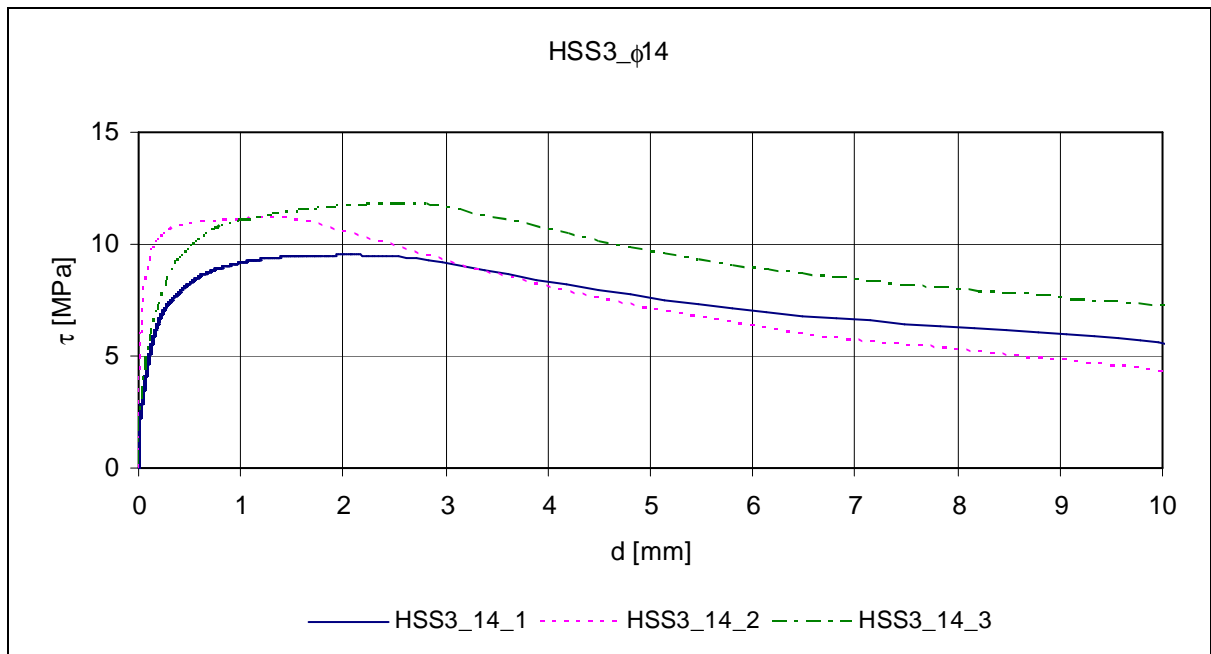


Figura 2-18 - Resultados obtidos nos ensaios de *pull-out* realizados sobre os varões do tipo HSS3 de 14 mm de diâmetro.

De acordo com o Anexo D da EN 10080:2005 [25], a partir dos ensaios efectuados aos provetes com armaduras de aço inoxidável é possível definir a tensão média de aderência

como sendo a média das tensões de aderência registadas para deslizamentos de 0,01 mm, 0,1 mm e 1,0 mm, ou seja: $\tau_{\text{média}} = \frac{\tau_{0,01} + \tau_{0,1} + \tau_{1,0}}{3}$.

A sistematização dos resultados obtidos para a tensão média de aderência e para a tensão máxima de aderência encontra-se no quadro seguinte.

Quadro 2-15 - Valores médios da tensão de aderência média e da tensão máxima de aderência.

| Tipo de aço | ϕ (mm) | $\tau_{0,01 \text{ mm}}$ (MPa) | $\tau_{0,1 \text{ mm}}$ (MPa) | $\tau_{1,0 \text{ mm}}$ (MPa) | $\tau_{\text{média}}$ (MPa) | $\tau_{\text{máxima}}$ (MPa) |
|-------------|----------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| AISI 316 | 12 | 2,3 | 5,9 | 11,6 | 6,6 | 11,7 |
| HSS1 | 12 | 2,8 | 5,9 | 12,3 | 7,0 | 12,4 |
| AISI 316 | 16 | 2,7 | 5,8 | 12,0 | 6,8 | 12,4 |
| HSS3 | 14 | 2,9 | 6,4 | 10,4 | 6,6 | 10,8 |

Tendo em consideração que o Eurocódigo 2 [26] prevê a avaliação da aderência por recurso ao *Beam test* (BT), tornou-se necessário proceder à extrapolação dos resultados obtidos para o *Pull-out test* (POT) para resultados do *Beam test*. Para o efeito, recorreu-se aos resultados de dois estudos desenvolvidos por Stefan Soretz et al cujas conclusões se encontram publicadas no Bulletin d' Information N.º 118 do CEB [28].

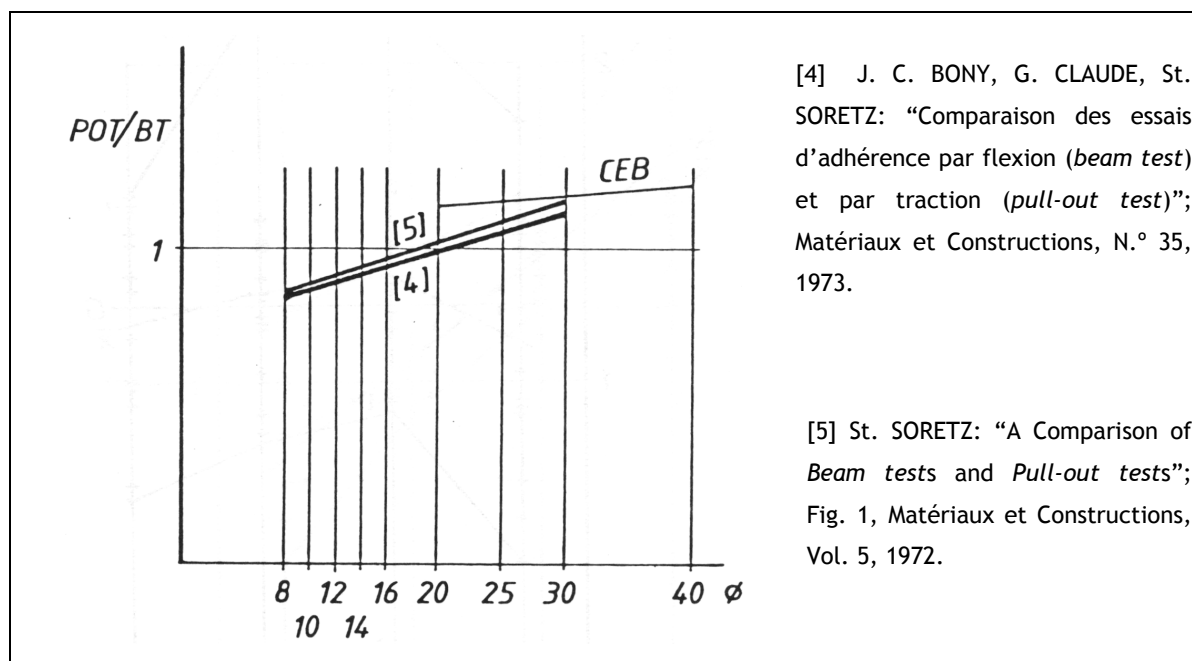


Figura 2-19 - Relação entre os resultados do *Pull-out test* e do *Beam test* [28].

Para a gama de diâmetros em estudo, é possível verificar que a relação entre o POT/BT apresenta valores entre 0,91 e 0,96, aproximadamente. Assim, apresenta-se no quadro seguinte a extrapolação dos resultados obtidos para resultados de BT.

Quadro 2-16 - Extrapolação dos resultados obtidos nos POT para resultados de BT.

| Tipo de aço | ϕ (mm) | POT/BT [28] | Pull-out tests | | Extrapolação para <i>Beam tests</i> | |
|-------------|-------------|-------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| | | | $\tau_{m\acute{e}dia}$ (MPa) | $\tau_{m\acute{a}xima}$ (MPa) | $\tau_{m\acute{e}dia}$ (MPa) | $\tau_{m\acute{a}xima}$ (MPa) |
| AISI 316 | 12 | 0,91 | 6,6 | 11,7 | 6,0 | 10,6 |
| HSS1 | 12 | 0,91 | 7,0 | 12,4 | 6,4 | 11,3 |
| AISI 316 | 16 | 0,96 | 6,8 | 12,4 | 6,6 | 11,9 |
| HSS3 | 14 | 0,93 | 6,6 | 10,8 | 6,1 | 10,1 |

Segundo o Eurocódigo 2 [26], as tensões média e máxima de aderência obtidas a partir da realização de BT devem satisfazer os limites impostos pelas expressões $\tau_{m\acute{e}dia} \geq 0,098(80 - 1,2\phi)$ e $\tau_{m\acute{a}xima} \geq 0,098(130 - 1,9\phi)$, que dão origem aos valores de referência do Quadro 2-17.

Quadro 2-17 - Valores de referência das tensões de aderência.

| ϕ (mm) | $\tau_{m\acute{e}dia}$ (MPa) | $\tau_{m\acute{a}xima}$ (MPa) |
|-------------|------------------------------|-------------------------------|
| 12 | 6,4 | 10,5 |
| 14 | 6,2 | 10,1 |
| 16 | 6,0 | 9,8 |

A comparação dos valores de referência com os resultados extrapolados permite concluir que de uma forma geral os 4 tipos de aço inoxidável se enquadram nas exigências actualmente definidas pelo Eurocódigo 2 [26] em termos de tensões máximas de aderência.

CAPÍTULO 3 - DIMENSIONAMENTO E CONCEPÇÃO DOS MODELOS DE VIGAS

3.1 - Dimensionamento dos modelos

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.

Para tal, foram executadas, em duas séries diferentes 12 vigas, com 4,0 metros de comprimento, a primeira série com os aços inoxidáveis endurecidos a frio e a segunda com os obtidos por laminagem a quente. 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 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. Esta possibilidade encontra-se prevista na versão de 2001 do Eurocódigo 2 [29], não sendo contudo especificada qual a redução que pode ser efectuada.

Assim, considera-se que o recobrimento neste caso visa apenas garantir boas condições de aderência entre o aço e o betão e uma adequada transmissão de forças, não tendo a função de garantia da durabilidade que, em Portugal, lhe tem vindo a ser atribuída desde a publicação do Regulamento de Betão Armado de 1918 [30].

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.

3.1.1 - Hipóteses de cálculo adoptadas

Nas vigas de referência adoptou-se um recobrimento de 45 mm que é o valor de recobrimento mínimo previsto pelo Eurocódigo [26] para ambientes muito agressivos, a que correspondem as classes de exposição XD1/XD2/XD3 e XS1/XS2/XS3. Nas vigas de aço inoxidável optou-se por considerar uma redução da espessura de recobrimento, situação

prevista no Eurocódigo [26], no caso de se usar armaduras de aço inoxidável. Contudo, foi preciso decidir qual a espessura a adoptar, visto que o Eurocódigo [26] ainda não define, à data de realização deste trabalho, a espessura do recobrimento para estas circunstâncias.

Assim, adoptou-se um recobrimento de 20 mm em todos os modelos executados com armaduras de aço inoxidável, uma vez que esta espessura é a suficiente para garantir a transmissão de forças entre a armadura e o betão por aderência [24]. A redução do recobrimento permite aumentar ligeiramente a altura útil das vigas de aço inoxidável, uma vez que todas as vigas foram executadas com 0,35 m 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 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.

Quadro 3-1 - 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 [26], foi possível executar o dimensionamento e chegar aos momentos resistentes de cálculo indicados no Quadro 3-2 para se obter as secções transversais da primeira e da segunda série de vigas a executar.

Mais uma vez, 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 3-2.

Quadro 3-2 - 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 |

3.1.2 - Características dos modelos a ensaiar

As características gerais da primeira e segunda série de vigas são apresentadas nos quadros e figuras seguintes, sendo especificados todos os detalhes relativos às dimensões dos modelos, tipos de betão, constituição da armadura longitudinal inferior, superior, armadura transversal e recobrimentos a adoptar em cada modelo.

Quadro 3-3 - Características gerais da 1.ª série de vigas.

| Viga | A500_C35_d12 | AISI316_C35_d12 | HSS1_C35_d12 | A500_C60_d12 | AISI316_C60_d12 | HSS1_C60_d12 |
|--------------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|
| Classe do betão | C 35 | C 35 | C 35 | C 60 | C 60 | C 60 |
| Secção | 0,35m x 0,22m | 0,35m x 0,15m | 0,35m x 0,15m | 0,35m x 0,22m | 0,35m x 0,15m | 0,35m x 0,15m |
| Armadura longitudinal inferior | A500NR 4 ϕ 12 | AISI 316 3 ϕ 12 | HSS1 3 ϕ 12 | A500NR 4 ϕ 12 | AISI 316 3 ϕ 12 | HSS1 3 ϕ 12 |
| Armadura longitudinal superior | 2 ϕ 10 | 2 ϕ 10 | 2 ϕ 10 | 2 ϕ 10 | 2 ϕ 10 | 2 ϕ 10 |
| Armadura transversal | ϕ 8 // 0,15 m | ϕ 8 // 0,15 m | ϕ 8 // 0,15 m | ϕ 8 // 0,15 m | ϕ 8 // 0,15 m | ϕ 8 // 0,15 m |
| Recobrimento ao estribo | 45 mm | 20 mm | 20 mm | 45 mm | 20 mm | 20 mm |

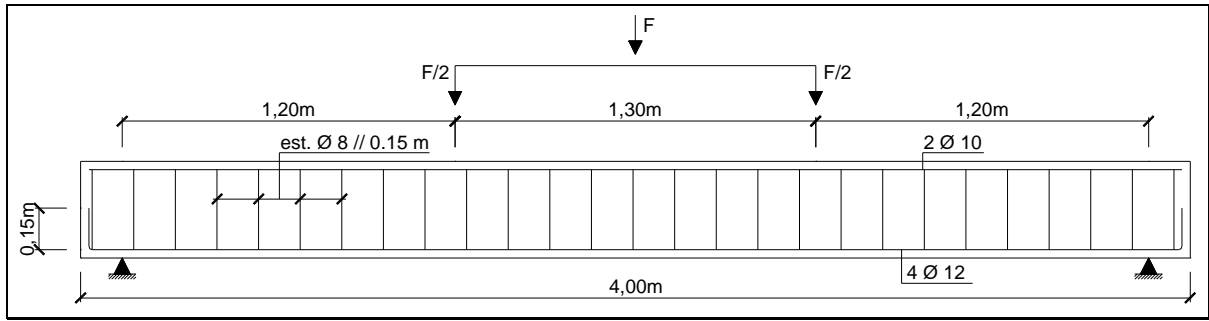


Figura 3-1 - Secção longitudinal das vigas de referência da 1.ª série.

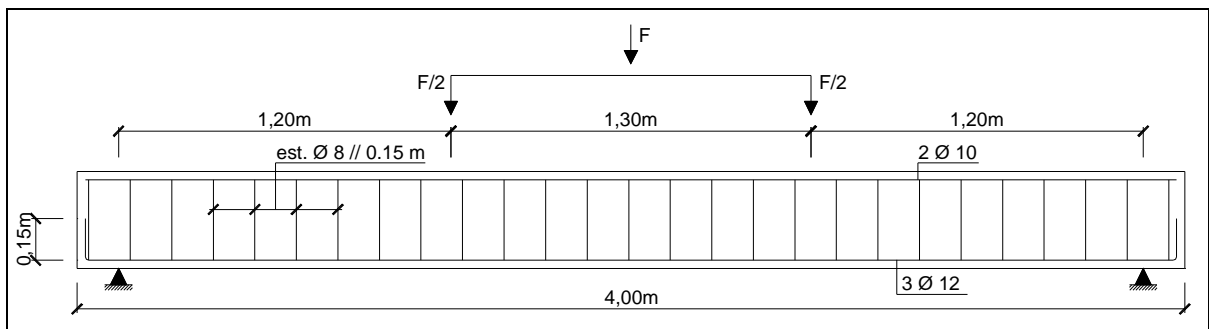


Figura 3-2 - Secção longitudinal das vigas de aço inoxidável da 1.ª série.

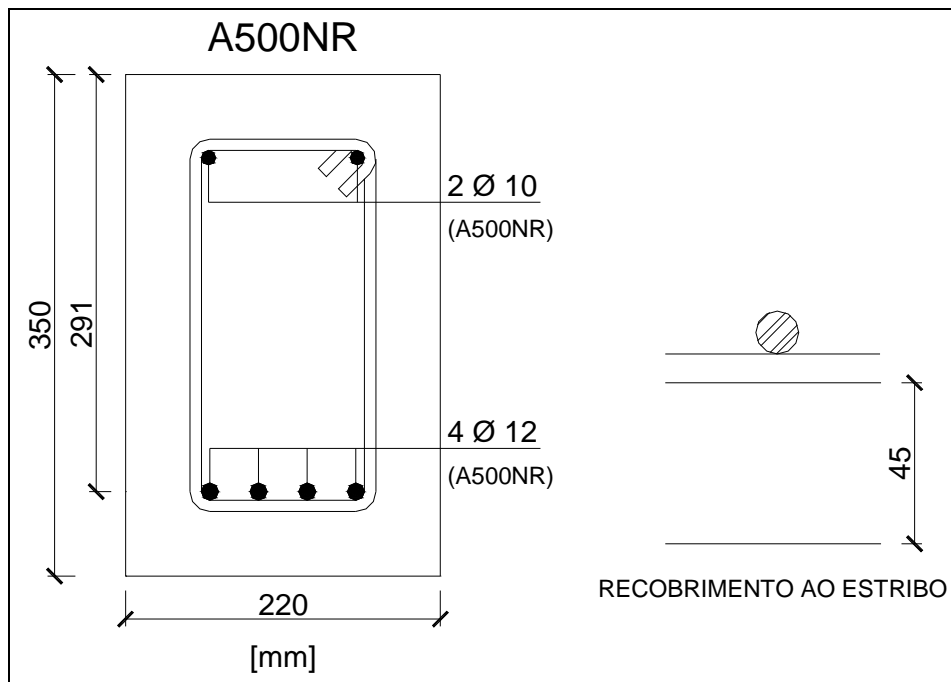


Figura 3-3 - Detalhe da secção transversal das vigas de referência da 1.ª série.

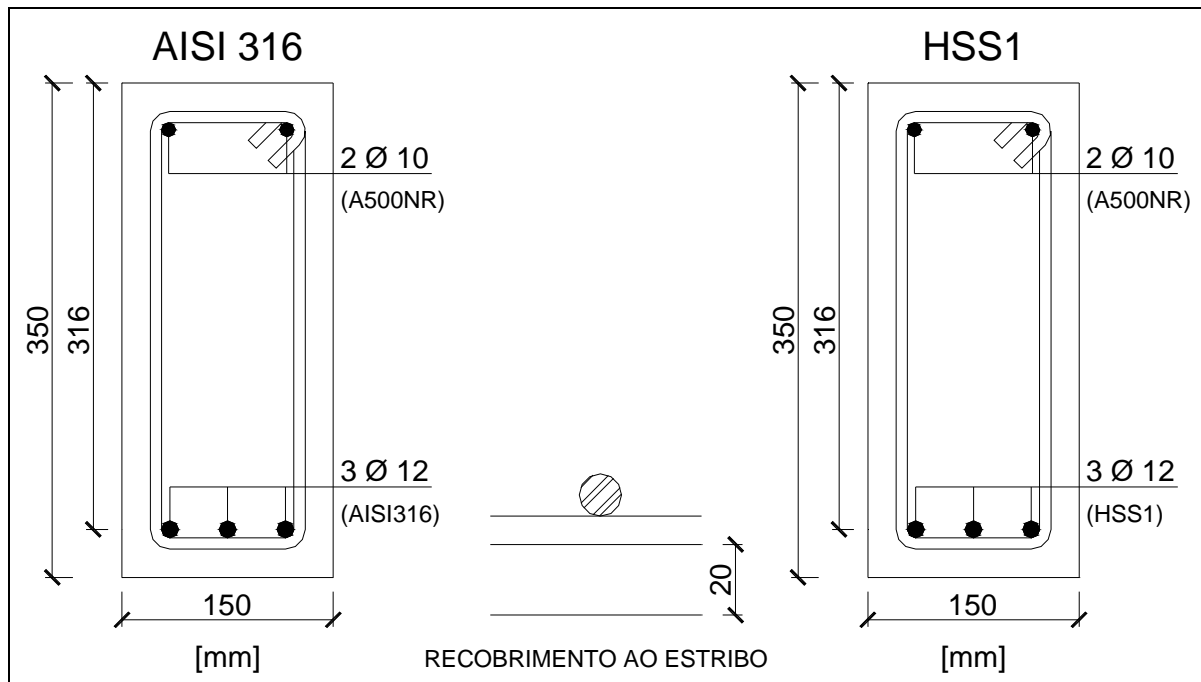


Figura 3-4 - Detalhe da secção transversal das vigas de aço inoxidável da 1.ª série.

Quadro 3-4 - Características gerais da 2.ª série de vigas.

| Viga | A500_C35_d16 | AISI316_C35_d16 | HSS3_C35_d14 | A500_C60_d16 | AISI316_C60_d16 | HSS3_C60_d14 |
|--------------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|
| Classe do betão | C 35 | C 35 | C 35 | C 60 | C 60 | C 60 |
| Secção | 0,35m x 0,22m | 0,35m x 0,15m | 0,35m x 0,15m | 0,35m x 0,22m | 0,35m x 0,15m | 0,35m x 0,15m |
| Armadura longitudinal inferior | A500NR 3 ϕ 16 | AISI 316 3 ϕ 16 | HSS3 3 ϕ 14 | A500NR 3 ϕ 16 | AISI 316 3 ϕ 16 | HSS3 3 ϕ 14 |
| Armadura longitudinal superior | 2 ϕ 10 | 2 ϕ 10 | 2 ϕ 10 | 2 ϕ 10 | 2 ϕ 10 | 2 ϕ 10 |
| Armadura transversal | ϕ 8 // 0,15 m | ϕ 8 // 0,15 m | ϕ 8 // 0,15 m | ϕ 8 // 0,15 m | ϕ 8 // 0,15 m | ϕ 8 // 0,15 m |
| Recobrimento ao estribo | 45 mm | 20 mm | 20 mm | 45 mm | 20 mm | 20 mm |

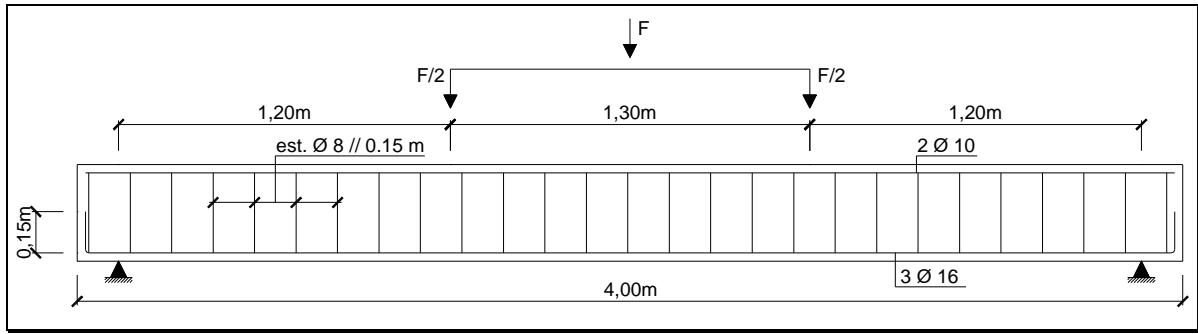


Figura 3-5 - Secção longitudinal das vigas de referência e das vigas em aço inoxidável AISI316 da 2.ª série.

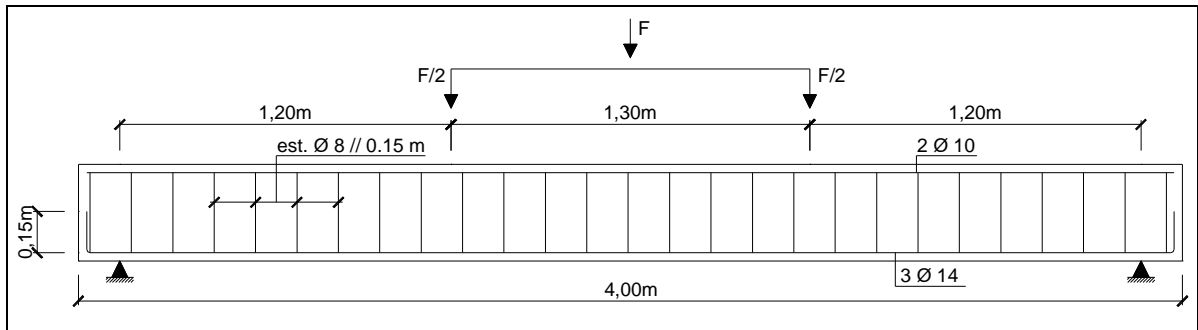


Figura 3-6 - Secção longitudinal das vigas de aço inoxidável do tipo HSS3 da 2.ª série.

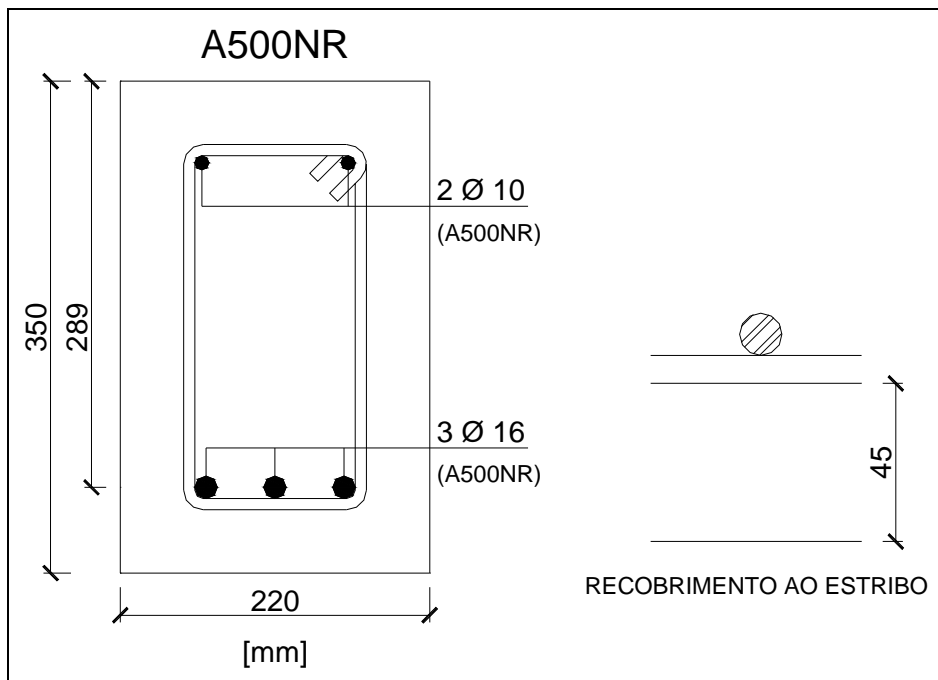


Figura 3-7 - Detalhe da secção transversal das vigas de referência da 2.ª série.

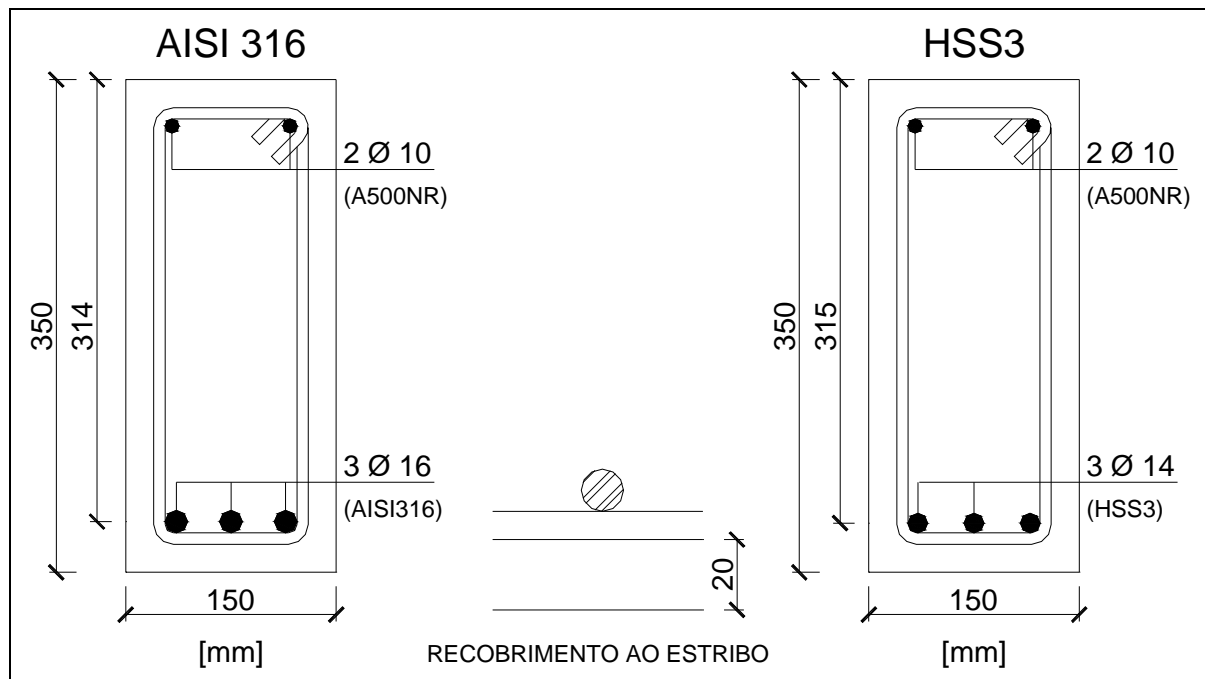


Figura 3-8 - Detalhe da secção transversal das vigas de aço inoxidável da 2.^a série.

3.2 - Construção dos Modelos

A construção do primeiro conjunto de 6 vigas iniciou-se com a montagem das armaduras e da cofragem, na sala de ensaios do Laboratório de Ensaios de Componentes de Estruturas do Núcleo de Comportamento de Estruturas do LNEC.

Relativamente à segunda série, o processo de construção dos modelos iniciou-se seis meses depois, uma vez que esteve dependente do fornecimento das armaduras de aço inoxidável por parte de um dos parceiros do projecto.

A montagem das armaduras e a execução da cofragem foram realizadas por uma empresa contratada para o efeito.

No que diz respeito à produção do betão, a sua preparação e colocação esteve a cargo dos técnicos do Núcleo de Betões do Departamento de Materiais do LNEC.

As diferentes etapas da execução dos elementos concebidos, nomeadamente a montagem das armaduras, da cofragem usada e a execução do betão, encontram-se registadas nas figuras seguintes.



Figura 3-9 - Montagem das armaduras.



Figura 3-10 - Aspecto geral da cofragem e da execução do betão.



Figura 3-11 - Colocação e vibração do betão.

Durante a execução de cada viga, foram feitos cubos com 15cm de lado para avaliação da resistência à compressão e foi medido o abaixamento de cada lote de betão produzido, como se encontra documentado nas figuras seguintes.



Figura 3-12 - Colocação do betão no cone de Abram's.



Figura 3-13 - Medição do abaixamento do cone de Abram's.



Figura 3-14 - Execução dos cubos.

3.2.1 - Caracterização dos betões usados nos modelos

Na concepção dos modelos de vigas foram usados dois tipos de betão: betão de resistência normal (C35/45) e um betão de alta resistência (C60/75). A composição dos referidos betões foi estudada por um dos parceiros do projecto de investigação [11] e apresenta-se no quadro seguinte. Todos os materiais utilizados foram fornecidos pelo parceiro do projecto que desenvolveu a composição dos betões, para garantir a melhor homogeneidade possível entre os lotes de betão produzidos pelos diferentes intervenientes.

Salienta-se desde já que todos os resultados dos ensaios de resistência do betão à compressão apresentados neste ponto se referem a provetes cúbicos, sendo portanto necessário proceder à correcção para que os resultados se refiram a provetes cilíndricos.

Quadro 3-5 - Composição dos betões (por m³).

| Materiais | C35/45 | C60/75 |
|--------------------|----------|----------|
| Cimento I 52,5 R | - | 400 kg |
| Cimento III A 42,5 | 320 kg | - |
| Areia britada 0/4 | 921 kg | 840 kg |
| Brita 6/12 | 952 kg | 967 kg |
| Cimfluid 2010 AXIM | - | 3,6 lt |
| Cimfluid 2002 AXIM | 4,4 lt | - |
| Água | 187,0 lt | 186,6 lt |

Tendo em consideração que não se recorreu à utilização dos serviços de uma central de betão pronto foi necessário realizar várias amassaduras para cada viga betonada, pelo que os resultados obtidos para a resistência à compressão em provetes cúbicos moldados durante a betonagem de cada modelo são apresentados por viga.

Em cada amassadura procedeu-se também à medição do abaixamento do cone de Abram's com vista a detectar eventuais problemas de segregação no betão. A identificação dos cubos produzidos e os resultados do abaixamento do cone de Abram's de cada lote de betão produzido encontram-se sistematizados nos quadros que se seguem.

Para a contabilização do tempo decorrido entre cada uma das actividades desenvolvidas considerou-se como referência base a data de betonagem da primeira viga (dia 0).

Quadro 3-6 - Resultados do abaixamento e identificação dos cubos produzidos por cada viga betonada - 1.^a série.

| Viga | Tempo (dias) | Abaixamento (cm) | Identificação dos cubos produzidos |
|-----------------|--------------|------------------|------------------------------------|
| A500_C35_d12 | 0 | 15,5 | 1 |
| | | 17,5 | 2 |
| | | 14,5 | 3 |
| | | 17,5 | |
| AISI316_C35_d12 | 1 | 17,7 | 4 |
| | | 17,0 | 5 |
| | | | 6 |
| HSS1_C35_d12 | 1 | 17,5 | 6 |
| | | 19,0 | 7 |
| A500_C60_d12 | 3 | 21,5 | 14 |
| | | 22,0 | 15 |
| | | 21,3 | 16 |
| AISI316_C60_d12 | 2 | 19,2 | 8 |
| | | 17,5 | 9 |
| | | 21,5 | 10 |
| HSS1_C60_d12 | 2 | 21,7 | 11 |
| | | 18,0 | 12 |
| | | | 13 |

Quadro 3-7 - Resultados do abaixamento e identificação dos cubos produzidos por cada viga betonada - 2.^a série.

| Viga | Tempo (dias) | Abaixamento (cm) | Identificação dos cubos produzidos |
|-----------------|--------------|------------------|------------------------------------|
| A500_C35_d16 | 133 | 20,0 | 12 |
| | | 21,0 | 13 |
| | | 21,5 | 14 |
| AISI316_C35_d16 | 132 | 21,0 | 10 |
| | | 20,5 | 11 |
| HSS3_C35_d14 | 132 | 20,0 | 8 |
| | | 19,5 | 9 |
| A500_C60_d16 | 130 | 20,5 | 1 |
| | | 21,0 | 2 |
| | | 21,0 | 3 |
| AISI316_C60_d16 | 131 | 21,0 | 6 |
| | | 20,5 | 7 |
| HSS3_C60_d14 | 131 | 20,5 | 4 |
| | | 20,5 | 5 |

Após a execução da primeira série de vigas foram ensaiados cubos de betão aos 7 e aos 28 dias, tendo sido obtidos os resultados que constam do Quadro 3-8 e do Quadro 3-9. Os ensaios de determinação da resistência à compressão foram efectuados no Laboratório de Ensaios de Betões e Cimentos - Área de Ensaios Físicos do Departamento de Materiais do LNEC.

Os provetes cúbicos utilizados para a determinação da resistência à compressão aos 7 e 28 dias foram conservados em câmara saturada nas condições previstas pela NP 1383: 1976 [31], enquanto que os restantes permaneceram junto dos respectivos modelos de vigas na sala de ensaios do Laboratório de Ensaios de Componentes de Estruturas do LNEC.

Os ensaios para determinação da resistência do betão à compressão foram executados nas condições previstas pela especificação técnica LNEC E 226: 1968 [32].

Quadro 3-8 - Resistência do betão à compressão aos 7 dias - 1.ª série.

| Classe de resistência | Identificação dos cubos | Massa (kg) | Resistência à compressão (MPa) |
|-----------------------|-------------------------|------------|--------------------------------|
| C35 | 1 | 8,324 | 42,0 |
| | 5 | 8,296 | 42,2 |
| C60 | 8 | 8,384 | 73,3 |
| | 11 | 8,353 | 67,3 |
| | 14 | 8,348 | 71,1 |

Quadro 3-9 - Resistência do betão à compressão aos 28 dias - 1.ª série.

| Classe de resistência | Identificação dos cubos | Massa (kg) | Resistência à compressão (MPa) |
|-----------------------|-------------------------|------------|--------------------------------|
| C35 | 2 | 8,311 | 53,5 |
| | 6 | 8,340 | 55,8 |
| C60 | 10 | 8,426 | 80,1 |
| | 12 | 8,415 | 75,4 |
| | 16 | 8,250 | 83,1 |

Na sequência da execução das vigas da 2.ª série foram realizados também ensaios para determinação da resistência do betão aos 7 e aos 28 dias, cujos resultados são apresentados nos quadros que se seguem.

Quadro 3-10 - Resistência do betão à compressão aos 7 dias - 2.^a série.

| Classe de resistência | Identificação dos cubos | Massa (kg) | Resistência à compressão (MPa) |
|-----------------------|-------------------------|------------|--------------------------------|
| C35 | 9 | 8,348 | 38,0 |
| | 12 | 8,239 | 30,7 |
| C60 | 1 | 8,360 | 74,5 |
| | 5 | 8,280 | 75,4 |

Quadro 3-11 - Resistência do betão à compressão aos 28 dias - 2.^a série.

| Classe de resistência | Identificação dos cubos | Massa (kg) | Resistência à compressão (MPa) |
|-----------------------|-------------------------|------------|--------------------------------|
| C35 | 11 | 8,329 | 56,5 |
| | 13 | 8,289 | 50,5 |
| C60 | 2 | 8,296 | 82,8 |
| | 7 | 8,317 | 82,2 |

Após a realização dos ensaios ao primeiro conjunto de modelos de vigas e em face dos resultados obtidos para o momento de fendilhação das vigas com betão da classe C60/75 foi decidido produzir 6 prismas com 150x150x550mm, identificados de 1 a 6, para determinação da resistência do betão à tracção por flexão aos 7 e 28 dias.

Estes provetes foram sujeitas ao mesmo tipo de cura que os cubos. Os ensaios em questão foram também realizados no Laboratório de Ensaio de Betões e Cimentos - Área de Ensaio Físicos do Departamento de Materiais do LNEC, de acordo com a Especificação Técnica LNEC E 227: 1968 [33].

Os resultados obtidos encontram-se no Quadro 3-12 e, como era de esperar, revelam uma elevada resistência à tracção, visto que os valores médios previstos pelo Eurocódigo 2 [26] rondam os 4,4 MPa.

Quadro 3-12 - Resistência à tracção por flexão do betão da classe C60 aos 7 e 28 dias.

| Prisma | Idade (dias) | Massa (kg) | Resistência à tracção (MPa) |
|--------|--------------|------------|-----------------------------|
| 1 | 8 | 30,676 | 8,4 |
| 3 | 7 | 30,442 | 6,9 |
| 3 | 7 | 30,253 | 8,4 |
| 4 | 28 | 30,412 | 9,3 |
| 5 | 28 | 30,473 | 8,9 |
| 6 | 28 | 30,426 | 8,8 |

Finalmente, foram executados ensaios de avaliação da resistência à compressão em todos os cubos que permaneceram com os respectivos modelos, na data de ensaio de cada uma das vigas.

Quadro 3-13 - Resistência do betão à compressão na data de ensaio de cada viga.

| Viga | Tempo (dias) | Identificação dos cubos | Idade (dias) | Massa (kg) | Resistência à compressão (MPa) |
|-----------------|--------------|-------------------------|--------------|------------|--------------------------------|
| A500_C35_d12 | 76 | 3 | 76 | 8,156 | 60,3 |
| AISI316_C35_d12 | 102 | 4 | 102 | 8,220 | 59,1 |
| HSS1_C35_d12 | 105 | 7 | 104 | 8,125 | 59,4 |
| A500_C60_d12 | 112 | 15 | 110 | 8,186 | 74,6 |
| AISI316_C60_d12 | 123 | 9 | 121 | 8,291 | 88,5 |
| HSS1_C60_d12 | 139 | 13 | 139 | 8,311 | 84,4 |
| A500_C35_d16 | 276 | 14 | 146 | 8,185 | 61,1 |
| AISI316_C35_d16 | 278 | 10 | 148 | 8,161 | 60,3 |
| HSS3_C35_d14 | 282 | 8 | 152 | 8,093 | 61,5 |
| A500_C60_d16 | 285 | 3 | 156 | 8,189 | 82,5 |
| AISI316_C60_d16 | 289 | 6 | 160 | 8,209 | 84,2 |
| HSS3_C60_d14 | 292 | 4 | 163 | 8,172 | 88,1 |

Dos resultados obtidos salientam-se mais uma vez as elevadas resistências obtidas para os dois tipos de betões. Verifica-se também que nos cubos que permaneceram nas mesmas condições que as vigas de referência, de betão de alta resistência (vigas A500_C60_d12 e

A500_C60_d16) foram obtidos valores de resistência à compressão inferiores aos obtidos aos 28 dias.

As diferenças obtidas não são muito significativas e justificam-se pela diferença nas condições de conservação dos provetes, sendo ainda possível constatar que a diferença é mais significativa no cubo pertencente à viga A500_C60_d12 que foi betonada no fim do mês de Julho, que no cubo da viga A500_C60_d16 que foi betonada na primeira semana de Dezembro.

3.2.2 - Caracterização dos varões do tipo A500NR

As 4 vigas de referência foram executadas em aço do tipo A500NR, sendo a armadura longitudinal inferior constituída por varões de 12 e 16 mm. Na totalidade das vigas executadas a armadura longitudinal superior funcionou apenas como armadura de montagem sendo constituída por dois varões de 10 mm. A armadura transversal foi executada com varões de 8 mm.

A avaliação das características mecânicas foi feita no LPM/LNEC através da realização de ensaios de tracção realizados de acordo com a norma EN 10002-1: 2001 [14], tendo sido obtidos os resultados do quadro seguinte.

Quadro 3-14 - Valores médios (3 provetes) dos resultados dos ensaios de tracção realizados no LPM/LNEC.

| ϕ (mm) | R_e (MPa) | R_m (MPa) | R_m/R_e | A_{gt} (%) |
|----------------|----------------|----------------|-----------|-----------------|
| 8 | 593 | 657 | 1,11 | 10,6 |
| 10 | 582 | 673 | 1,16 | 13,7 |
| 12 | 580 | 679 | 1,17 | 14,7 |
| 16 | 547 | 663 | 1,21 | 11,4 |

CAPÍTULO 4 - PREVISÃO ANALÍTICA DO COMPORTAMENTO DOS MODELOS

4.1 - Introdução

A previsão analítica do comportamento dos modelos concebidos foi realizada com recurso a um programa de cálculo automático que permite obter as relações momento - curvatura de uma secção de betão armado para uma determinada curvatura imposta [34].

A secção transversal é discretizada em fibras de betão paralelas à linha neutra e em camadas de armadura e, desde que sejam conhecidas as relações tensão - extensão do aço e do betão, obtém-se o correspondente diagrama momento - curvatura, bem como uma sistematização dos resultados expectáveis para:

- Momento e curvatura na cedência;
- Momento e curvatura última;
- Tipo de rotura.

Salienta-se que em relação ao betão o modelo despreza a resistência à tracção, partindo portanto de uma secção em estado fendilhado.

4.1.1 - Dados usados para o comportamento do betão

Tendo em consideração que o programa em questão permite modelar o comportamento do betão a partir da utilização do diagrama parábola - rectângulo ou em alternativa usando o modelo de Kent e Park, foram feitas diversas simulações de modo a verificar qual das hipóteses conduzia a resultados mais próximos dos obtidos experimentalmente.

Como seria de esperar, a análise dos primeiros resultados obtidos permitiu constatar que a utilização do modelo de Kent e Park conduzia a resultados muito mais próximos dos obtidos experimentalmente e portanto foi este o modelo adoptado.

No quadro seguinte indicam-se os dados considerados para a modelação do comportamento do betão, tendo o módulo de elasticidade sido obtido por extrapolação a partir das tensões de rotura obtidas em cubos submetidos a ensaio na data de ensaio da viga respectiva.

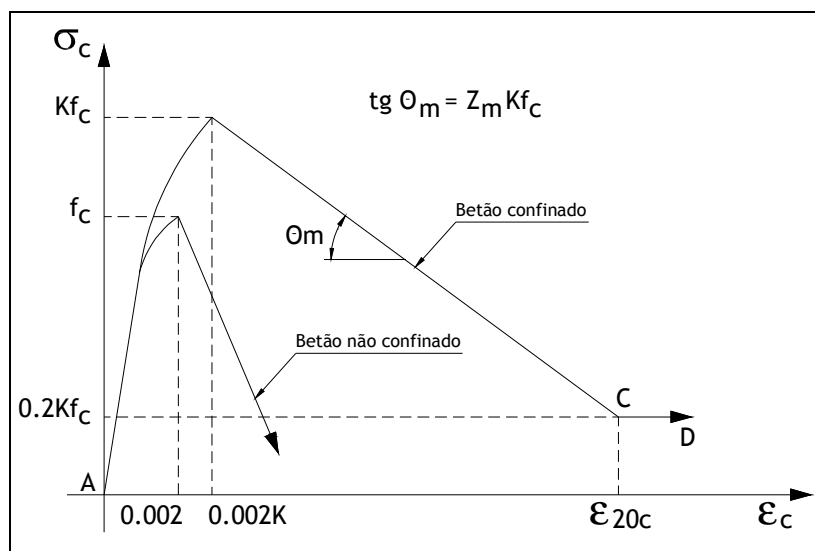


Figura 4-1 - Modelo de Kent e Park modificado para a relação tensão-deformação do betão [34].

A extrapolação feita seguiu o previsto no artigo 17.2 do REBAP [24], tendo sido feita a conversão das tensões de rotura do betão de cubos para cilindros através da seguinte expressão:

$$E_{cm} = 9,5 * \sqrt[3]{f_{cm} - 5}$$

A correlação entre as tensões de rotura e o módulo de elasticidade prevista pelo Eurocódigo 2 [26] conduz a resultados muito semelhantes, dado que a diferença média entre os módulos de elasticidade estimados pelos dois regulamentos é inferior a 1%.

Quadro 4-1 - Dados do modelo analítico do betão.

| VIGA | f_{cm} (MPa) | E_{cm} (GPa) REBAP [24] |
|-----------------|----------------|------------------------------|
| A500_C35_d12 | 60,3 | 36,2 |
| AISI316_C35_d12 | 59,1 | 35,9 |
| HSS1_C35_d12 | 59,4 | 36,0 |
| A500_C60_d12 | 74,8 | 39,1 |
| AISI316_C60_d12 | 88,6 | 41,5 |
| HSS1_C60_d12 | 84,4 | 40,8 |
| A500_C35_d16 | 61,1 | 36,4 |
| AISI316_C35_d16 | 60,3 | 36,2 |
| HSS3_C35_d14 | 61,5 | 36,5 |
| A500_C60_d16 | 82,5 | 40,5 |
| AISI316_C60_d16 | 84,2 | 40,8 |
| HSS3_C60_d14 | 88,1 | 41,5 |

4.1.2 - Dados usados para o comportamento dos aços

A partir dos ensaios de tracção realizados no LPM/LNEC foi possível definir o conjunto de pontos que se considera como mais representativo do comportamento de cada um dos diferentes tipos de aços inoxidáveis.

Os dados dos diagramas por pontos encontram-se definidos no Quadro 4-2 bem como nas figuras seguintes.

Quadro 4-2 - Dados dos aços inoxidáveis (diagramas por pontos).

| AISI 316 - 12 mm | | HSS1 - 12 mm | | AISI 316 - 16 mm | | HSS3 - 14 mm | |
|------------------|-------------|------------------|-------------|------------------|-------------|------------------|-------------|
| ϵ_s (%) | f_s (MPa) | ϵ_s (%) | f_s (MPa) | ϵ_s (%) | f_s (MPa) | ϵ_s (%) | f_s (MPa) |
| 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 0,0 | 0,2 | 1,2 | 239,5 | 1,6 | 300,1 | 2,0 | 349,8 |
| 0,0 | 2,8 | 3,1 | 522,7 | 4,6 | 560,8 | 3,8 | 490,6 |
| 0,1 | 6,2 | 5,0 | 713,0 | 4,8 | 565,9 | 4,4 | 512,9 |
| 0,1 | 8,4 | 6,1 | 752,9 | 8,2 | 612,8 | 6,2 | 538,4 |
| 0,1 | 14,3 | 7,2 | 820,6 | 12,4 | 629,2 | 8,8 | 554,8 |
| 0,2 | 29,6 | 9,4 | 875,9 | 17,0 | 640,0 | 11,8 | 565,4 |
| 0,3 | 59,8 | 12,0 | 904,0 | 21,9 | 648,5 | 15,0 | 571,7 |
| 0,6 | 109,1 | 14,1 | 910,7 | 26,9 | 655,8 | 18,6 | 578,7 |
| 1,0 | 177,2 | 15,9 | 917,8 | 31,8 | 661,1 | 21,4 | 584,3 |
| 1,4 | 255,2 | 18,0 | 920,7 | 36,8 | 667,7 | 25,0 | 590,3 |
| 1,9 | 343,2 | 20,1 | 922,5 | 41,6 | 672,9 | 27,9 | 593,9 |
| 2,6 | 440,2 | 22,3 | 924,3 | 46,4 | 677,7 | 31,1 | 602,6 |
| 3,3 | 535,3 | 24,5 | 924,9 | 51,2 | 682,2 | 34,6 | 601,3 |
| 4,3 | 621,7 | 26,9 | 926,0 | 56,0 | 684,8 | 38,2 | 607,3 |
| 5,4 | 689,3 | 29,8 | 927,4 | 60,7 | 690,0 | 42,1 | 611,6 |
| 5,8 | 705,0 | 32,7 | 927,4 | 65,4 | 694,4 | 45,2 | 614,2 |
| 6,8 | 733,2 | 36,1 | 928,5 | 70,3 | 698,4 | 48,6 | 618,6 |
| 8,5 | 756,6 | 39,8 | 930,0 | 75,2 | 702,1 | 51,9 | 621,7 |
| 10,3 | 767,6 | 43,8 | 928,5 | 80,1 | 705,6 | 55,2 | 625,0 |
| 12,2 | 773,1 | 44,2 | 932,3 | 84,9 | 708,6 | 58,7 | 628,6 |
| 12,4 | 775,7 | 44,6 | 933,6 | 89,6 | 711,9 | 62,0 | 629,8 |
| 12,6 | 777,2 | 45,0 | 935,4 | 94,4 | 715,4 | 65,0 | 633,9 |
| 12,8 | 777,8 | 45,4 | 936,3 | 99,4 | 718,4 | 68,4 | 635,5 |

| | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 13,0 | 778,2 | 45,9 | 938,3 | 100,2 | 718,9 | 71,6 | 638,8 |
| 13,2 | 778,2 | 65,7 | 939,9 | 100,9 | 719,4 | 74,8 | 641,2 |
| 24,5 | 778,2 | 67,8 | 941,0 | 101,7 | 719,8 | 78,2 | 644,2 |
| 26,6 | 777,9 | 69,5 | 942,3 | 102,4 | 720,2 | 81,4 | 647,1 |
| 28,6 | 777,7 | 70,8 | 943,2 | 283,0 | 760,8 | 84,6 | 649,1 |
| 30,6 | 777,2 | 71,9 | 943,9 | - | - | 87,7 | 653,2 |
| 32,6 | 777,0 | 72,8 | 945,4 | - | - | 90,7 | 653,2 |
| 34,6 | 776,5 | 73,7 | 947,0 | - | - | 92,9 | 659,2 |
| 36,5 | 776,0 | 74,6 | 949,0 | - | - | 95,1 | 657,8 |
| 38,4 | 775,5 | 75,6 | 950,8 | - | - | 97,0 | 660,4 |
| 40,2 | 775,0 | 76,8 | 952,8 | - | - | 99,1 | 662,7 |
| 41,9 | 774,2 | 109,8 | 980,6 | - | - | 326,0 | 732,0 |
| 50,0 | 779,0 | - | - | - | - | - | - |

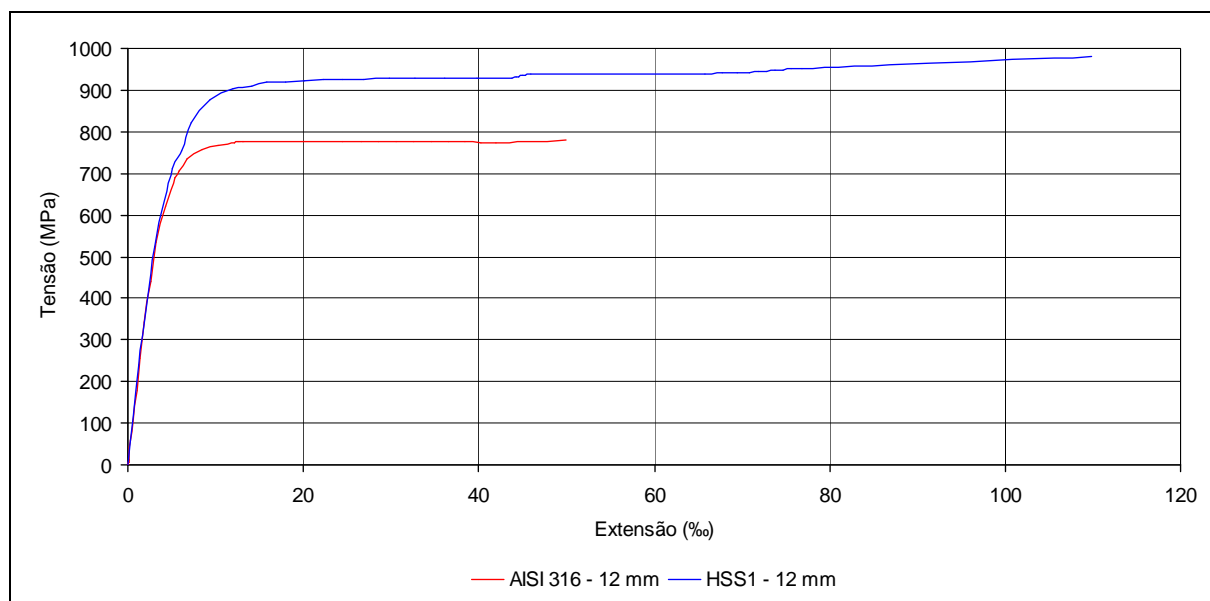


Figura 4-2 - Diagrama tensão-extensão dos aços AISI 316 (12 mm) e HSS1 (12 mm).

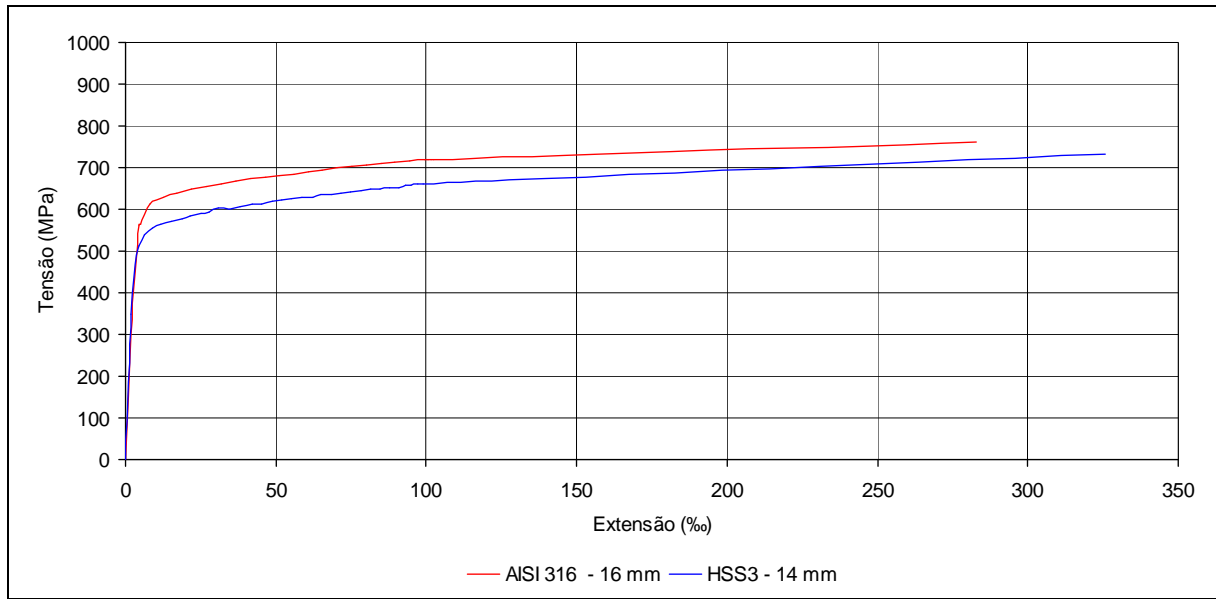


Figura 4-3 - Diagrama tensão-extensão dos aços AISI 316 (16 mm) e HSS3 (14 mm).

Relativamente às características do aço A500NR, usado nas vigas de referência, foram também considerados os valores médios obtidos em ensaios de tracção que já se encontram sistematizados no Quadro 3-14.

4.2 - Resultados analíticos obtidos

No quadro seguinte sistematizam-se os resultados obtidos para os momentos e curvaturas na cedência e na rotura, bem com o tipo de rotura esperado para cada modelo.

Apresentam-se também, para cada modelo, as curvaturas afectadas da respectiva altura útil: $(1/r) \times d$, uma vez que a redução de recobrimento se traduz num aumento da altura útil das vigas armadas com aço inoxidável.

Assim, torna-se mais fácil fazer a comparação entre os resultados obtidos analiticamente e os resultados obtidos nos ensaios que se encontram representados graficamente em Anexo a este trabalho.

Quadro 4-3 - Momentos e curvaturas na cedência e na rotura e tipo de rotura esperado em cada modelo de viga.

| VIGA | $M_{y, teo}$ kN.m | $(1/r)_y$ 1/km | $(1/r)_y \times d$ | $M_{u, teo}$ kN.m | $(1/r)_u$ 1/km | $(1/r)_u \times d$ | Tipo de rotura expectável |
|-----------------|----------------------|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|
| A500_C35_d12 | 70,97 | 12,93 | 0,004 | 73,35 | 167,97 | 0,049 | betão |
| AISI316_C35_d12 | 71,73 | 22,36 | 0,007 | 74,92 | 156,92 | 0,050 | betão |
| HSS1_C35_d12 | 78,22 | 23,42 | 0,007 | 88,27 | 133,62 | 0,042 | betão |
| A500_C60_d12 | 71,53 | 12,61 | 0,004 | 74,68 | 188,87 | 0,055 | betão |
| AISI316_C60_d12 | 72,05 | 21,50 | 0,007 | 78,14 | 178,29 | 0,056 | armadura |
| HSS1_C60_d12 | 77,96 | 22,58 | 0,007 | 91,82 | 171,06 | 0,054 | betão |
| A500_C35_d16 | 87,84 | 12,98 | 0,004 | 91,15 | 140,15 | 0,041 | betão |
| AISI316_C35_d16 | 100,2 | 19,52 | 0,006 | 107,26 | 109,44 | 0,034 | betão |
| HSS3_C35_d14 | 70,88 | 17,12 | 0,005 | 79,79 | 150,74 | 0,047 | betão |
| A500_C60_d16 | 88,89 | 12,50 | 0,004 | 94,21 | 167,41 | 0,048 | betão |
| AISI316_C60_d16 | 101,54 | 18,71 | 0,006 | 112,98 | 138,92 | 0,044 | betão |
| HSS3_C60_d14 | 70,94 | 16,48 | 0,005 | 83,51 | 191,71 | 0,060 | betão |

Relativamente ao tipo de rotura previsto, pode adiantar-se que nem mesmo no caso em que teoricamente se teria uma rotura mais dúctil isso veio a suceder, uma vez que em todos os elementos ensaiados se verificou em primeiro lugar o esgotamento da capacidade de deformação do betão em compressão.

A comparação com os resultados obtidos experimentalmente permite concluir que existe uma boa correlação entre a curvatura na cedência “nítida” nas vigas de referência e na rotura no segundo conjunto de modelos ensaiados.

Apresentam-se nas figuras seguintes os diagramas momento - curvatura obtidos para cada um dos modelos de viga, agrupados por tipo de betão e por diâmetros da armadura longitudinal inferior.

Em face dos resultados obtidos nos ensaios de tracção e da variação de secção transversal entre as vigas de referência e as vigas de aço inoxidável, era já expectável a maior deformabilidade dos elementos executados com armaduras de aço inoxidável. Consta-se também a maior resistência dos elementos executados com o aço inoxidável designado por HSS1, mesmo tendo sido reduzida a quantidade de armadura.

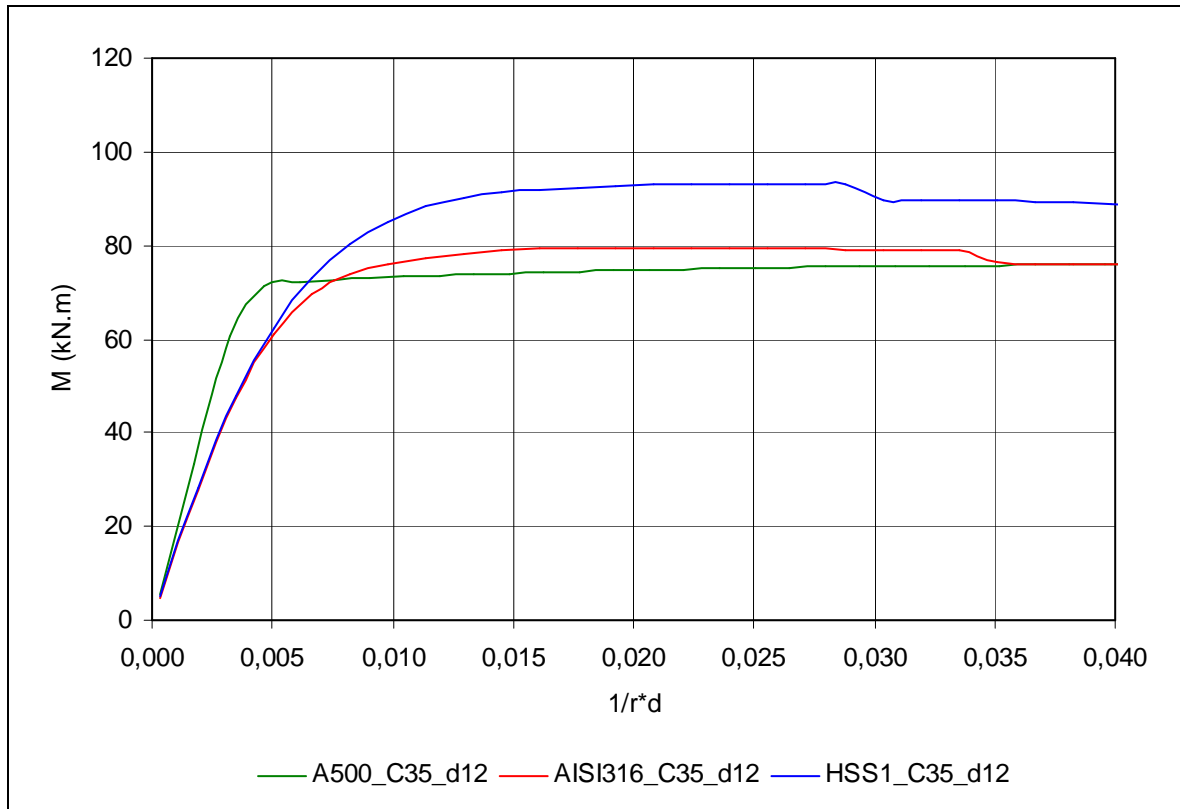


Figura 4-4 - Diagramas momento - curvatura das vigas com betão de resistência normal e varões de 12 mm.

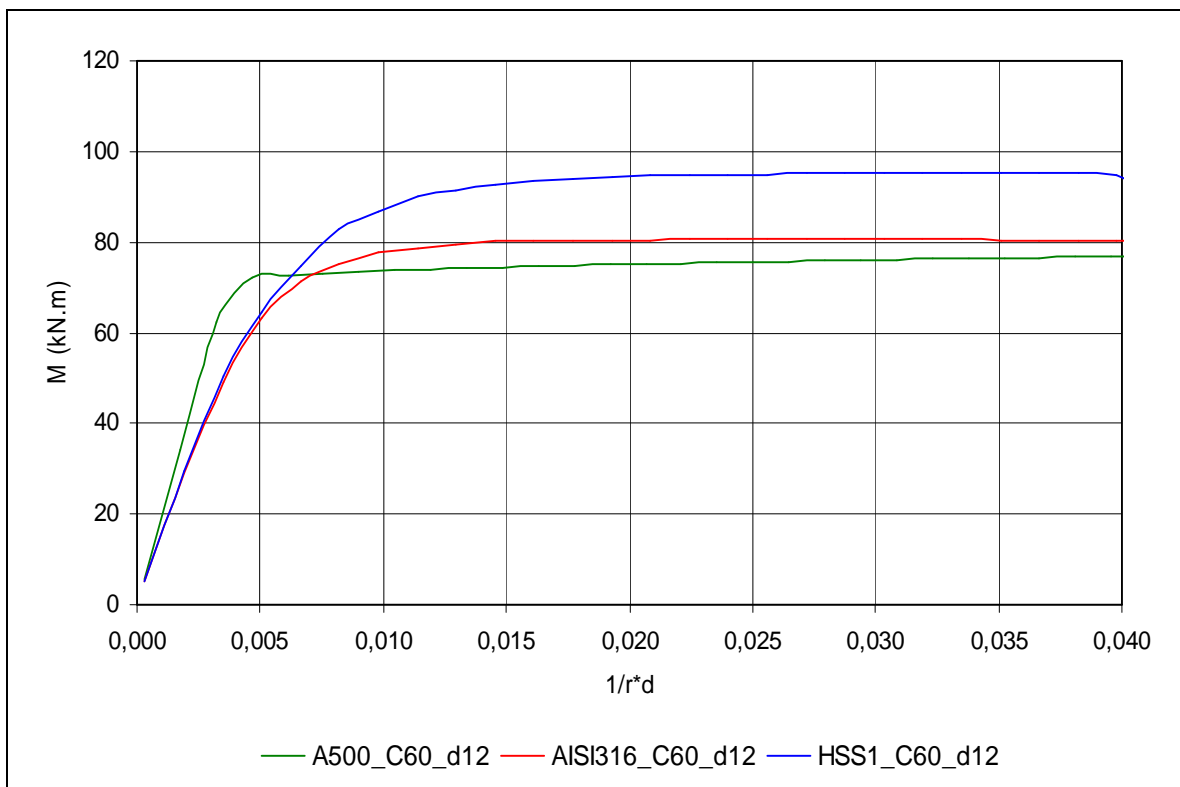


Figura 4-5 - Diagramas momento - curvatura das vigas com betão de alta resistência e varões de 12 mm.

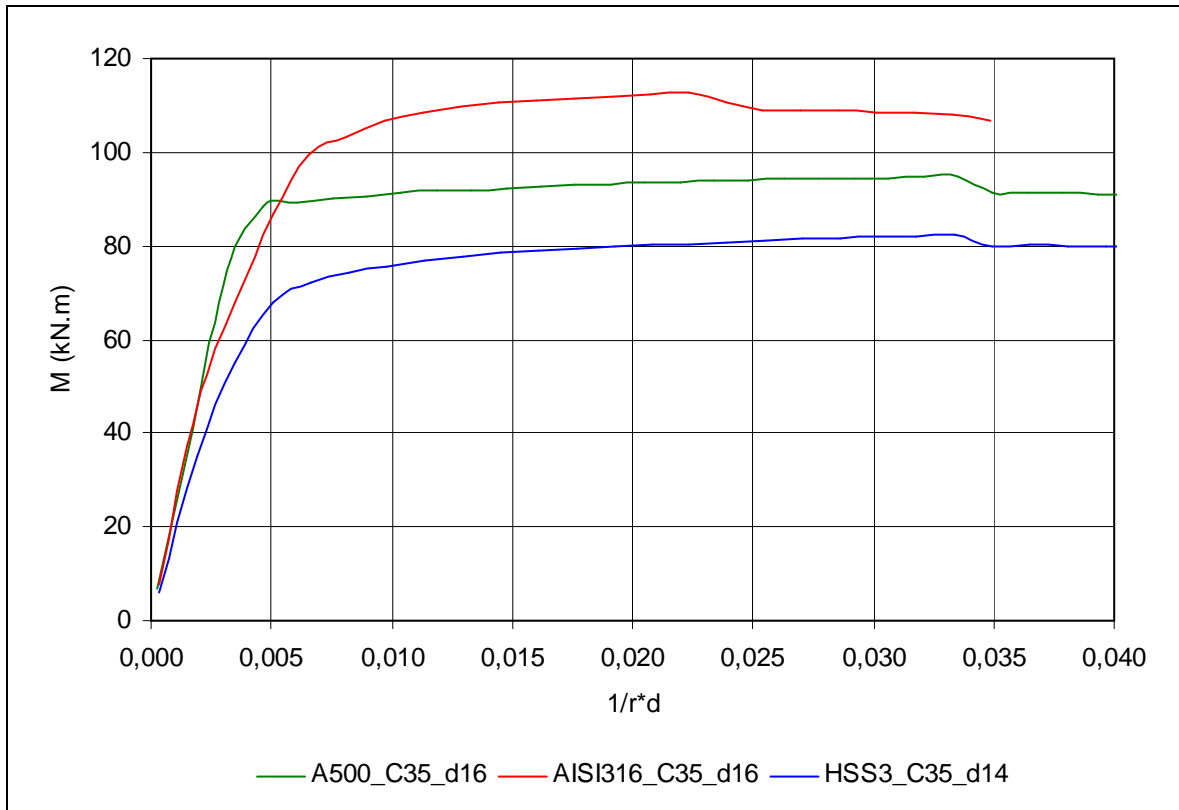


Figura 4-6 - Diagramas momento - curvatura das vigas com betão de resistência normal e varões de 16 e 14 mm.

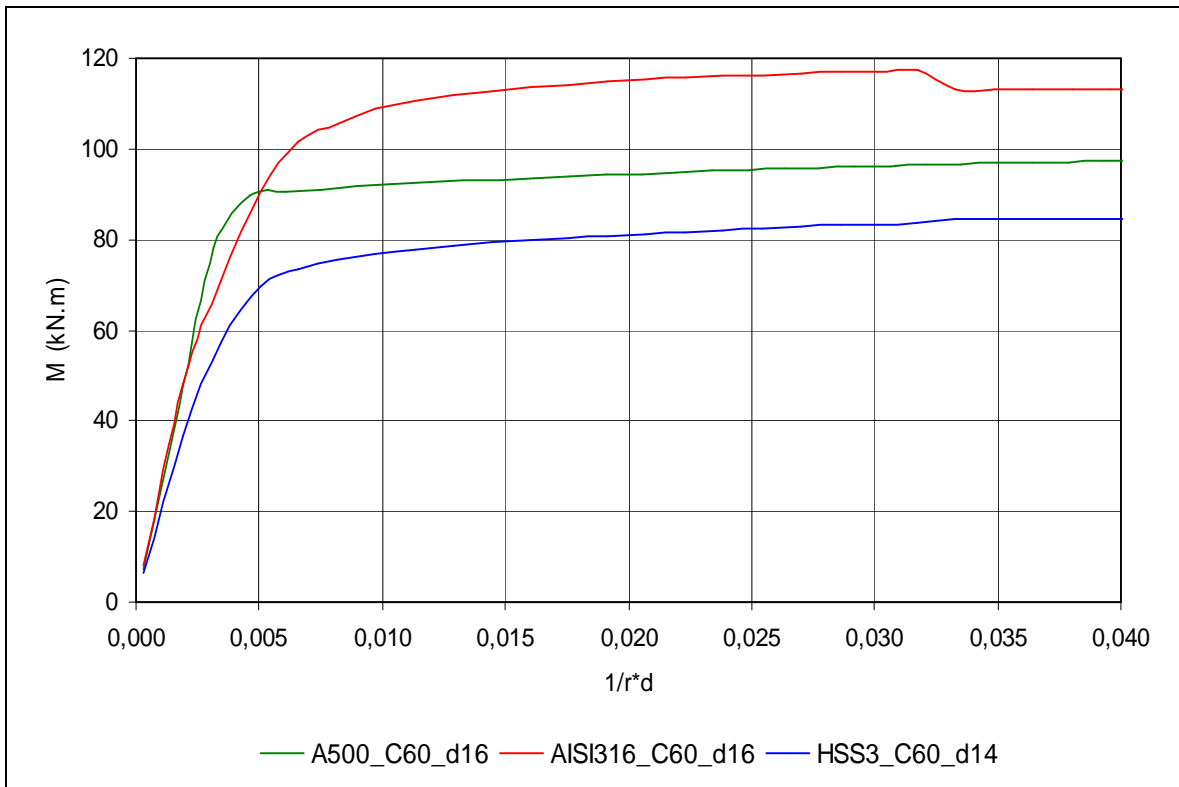


Figura 4-7 - Diagramas momento - curvatura das vigas com betão de alta resistência e varões de 16 e 14 mm.

CAPÍTULO 5 - SISTEMA DE ENSAIO

5.1 - Esquemas de ensaio

Para avaliar o comportamento à flexão 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.

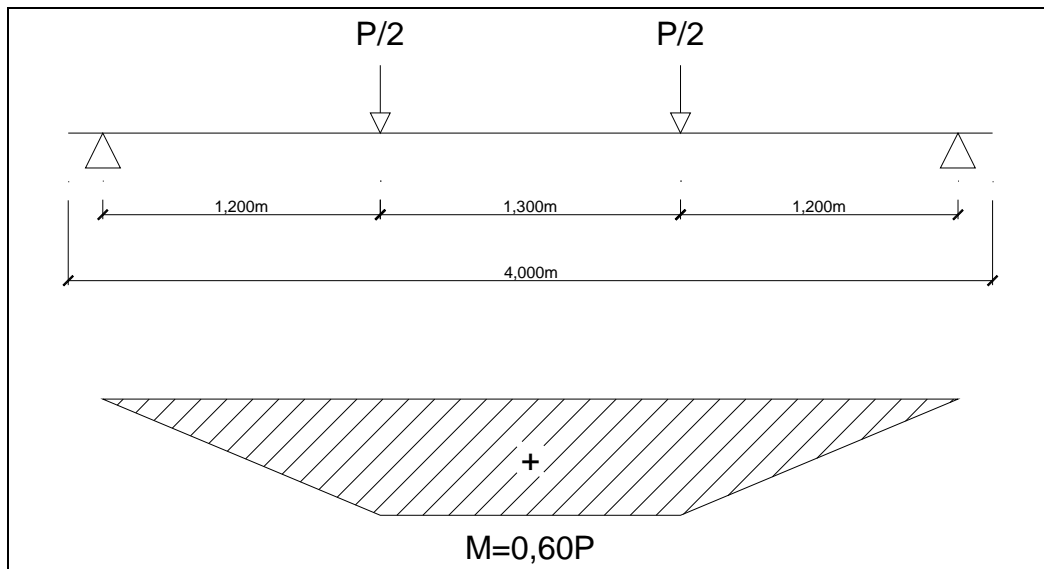


Figura 5-1 - Localização dos pontos de aplicação de carga.



Figura 5-2 - Aspecto geral da máquina Baldwin/Schenck usada para realizar os ensaios.

Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento na máquina servo-hidráulica BALDWIN/SCHENCK da Figura 5-2, que tem possibilidade de atingir uma carga máxima de 300kN.

5.2 - Instrumentação dos modelos

A instrumentação adoptada teve como principais objectivos medir os deslocamentos verticais de cada modelo a ensaiar bem como estimar as extensões 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, 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. O sistema de fixação permitiu avaliar a deformação dos modelos em 3 troços de 20 cm, por cada face.

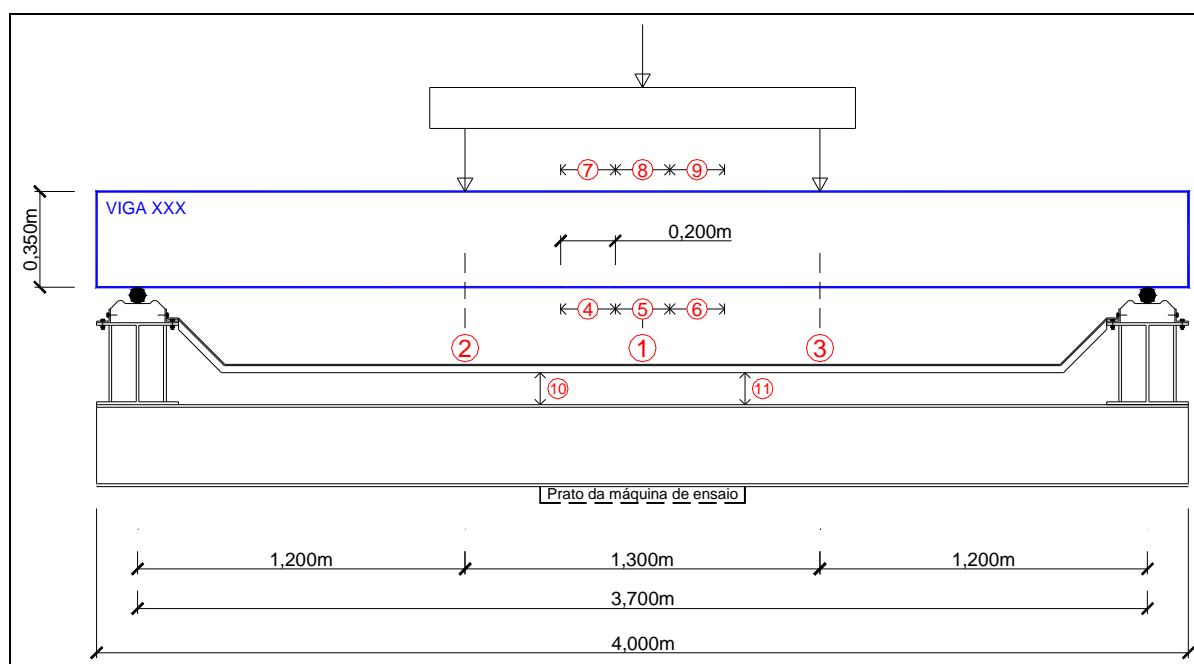


Figura 5-3 - Localização da instrumentação de cada modelo a ensaiar.

Finalmente, foram colocados dois transdutores de deslocamento para controlo da posição do sistema de suporte dos 3 transdutores de deslocamento usados para aferir a flecha, que permitiram concluir que o referido sistema de suporte se mantém imóvel durante a realização dos ensaios.

Os transdutores de deslocamento utilizados são do tipo indutivo, marca HBM. No quadro seguinte encontram-se especificados os modelos de transdutores de deslocamento utilizados em cada uma das posições de leitura indicadas no esquema da Figura 5-3, bem como os respectivos campos de medida.

Quadro 5-1 - Tipo de medidor usado em cada posição.

| Posição | Medidor de deslocamento | Campo de medida |
|---------|-------------------------|-----------------|
| 1 | HBM W100 | ± 100 mm |
| 2 e 3 | HBM W50 | ± 50 mm |
| 4 a 9 | HBM W20 | ± 20 mm |
| 10 a 11 | HBM W10 | ± 10 mm |

Nas figuras que se seguem são apresentados detalhes da montagem da instrumentação utilizada para monitorizar o comportamento das vigas durante os ensaios.

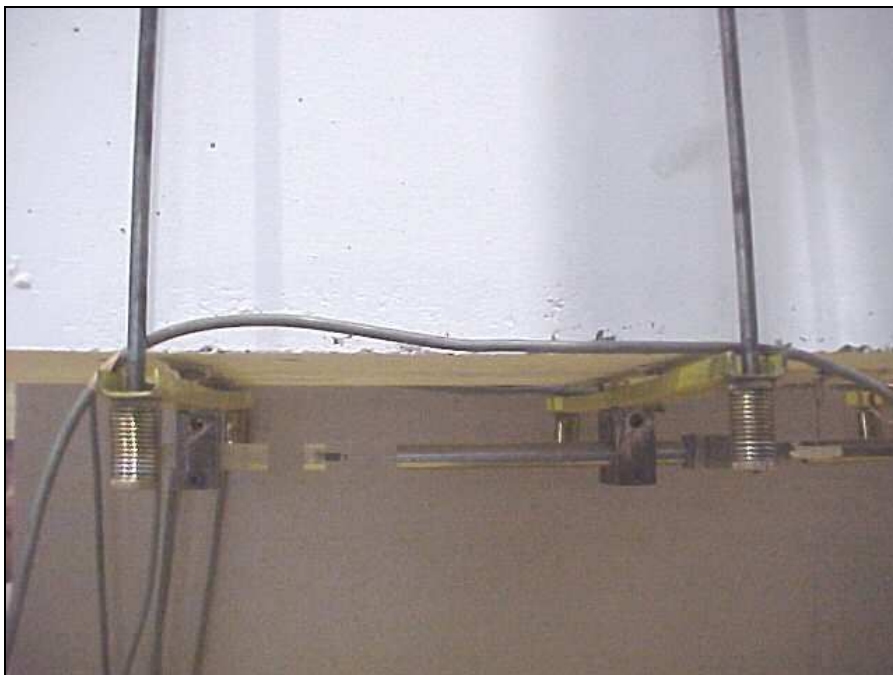


Figura 5-4 - Vista lateral de um medidor colocado na zona inferior de uma das vigas a ensaiar.

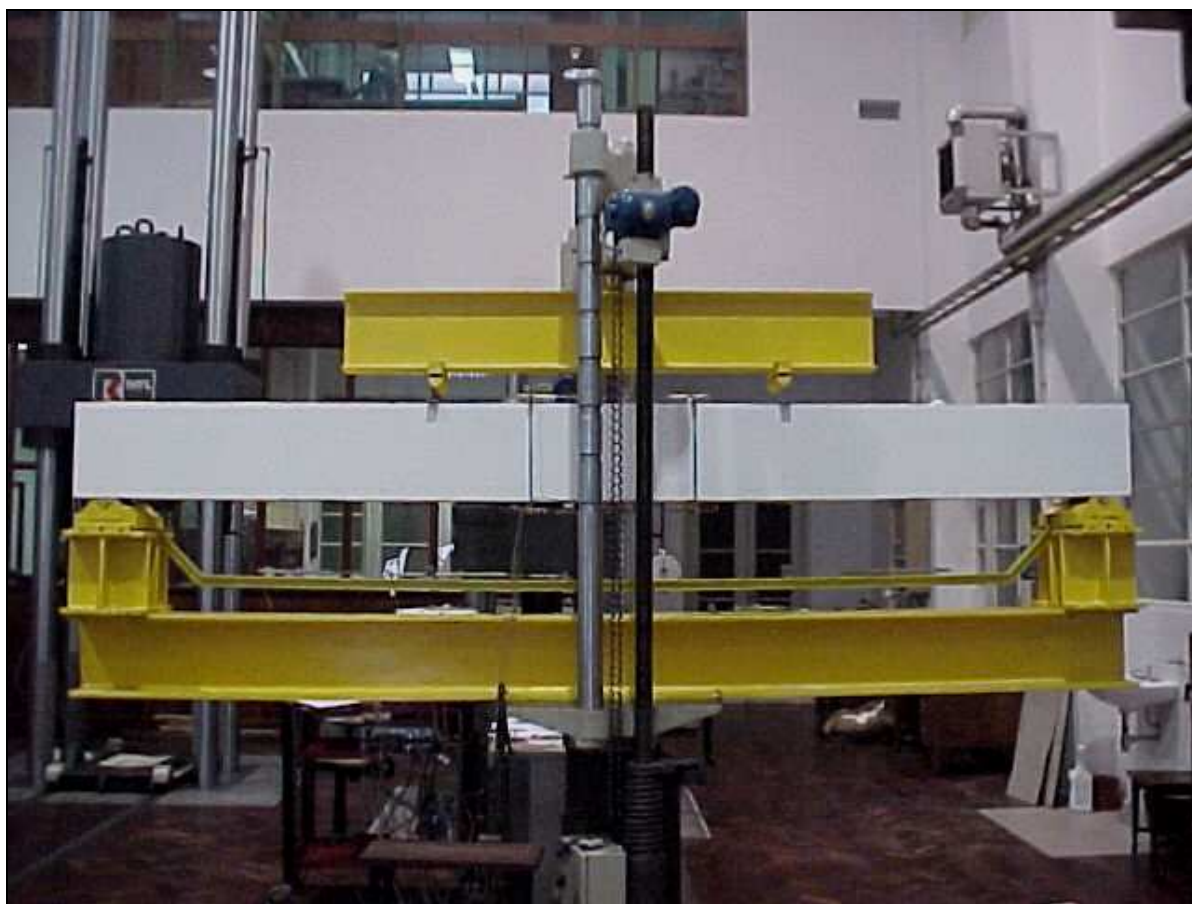


Figura 5-5 - Vista geral do sistema de ensaio.

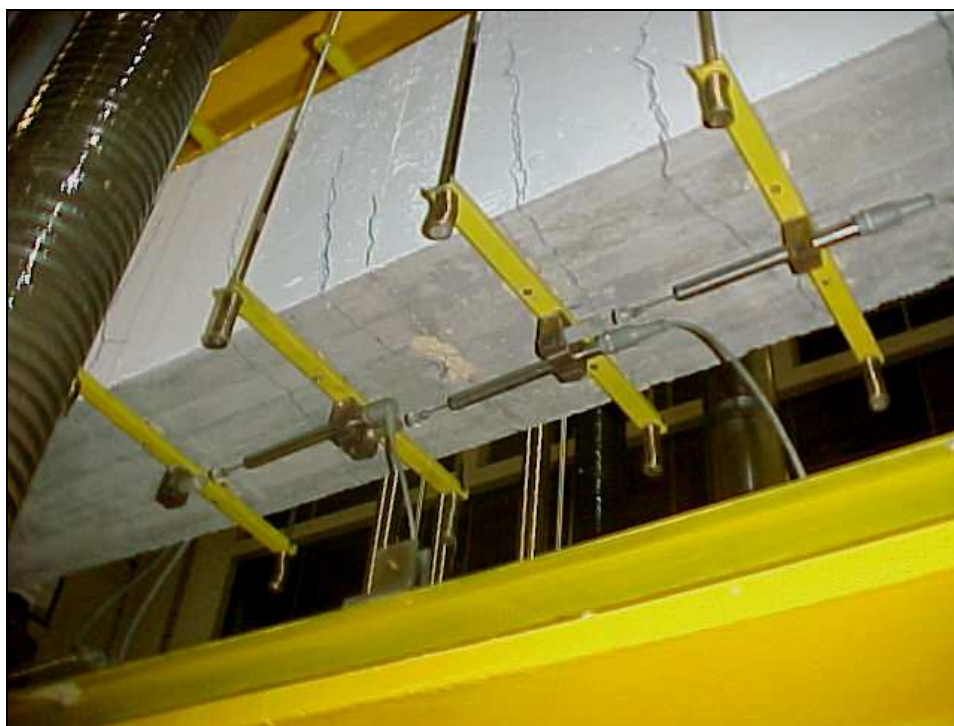


Figura 5-6 - Aspecto geral da instrumentação utilizada.

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, conforme documenta a figura que se segue.

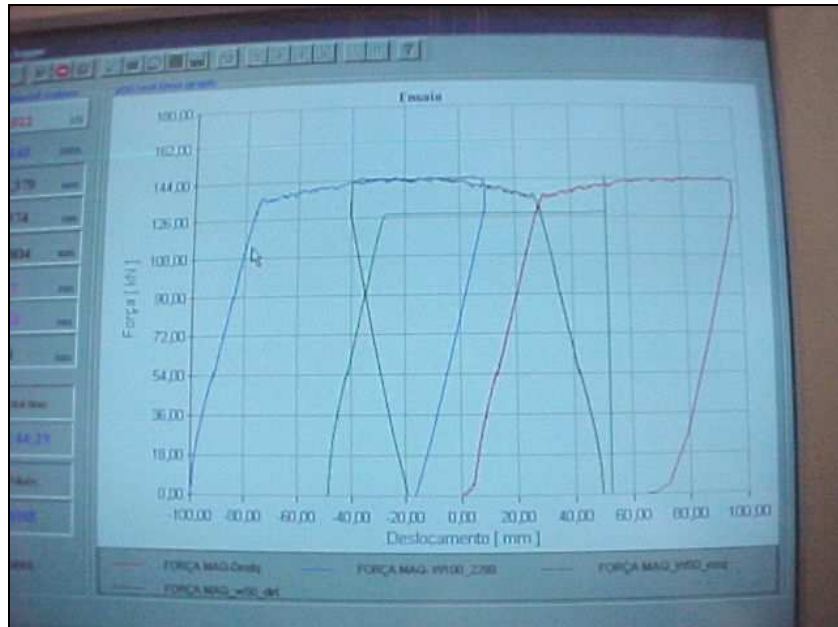


Figura 5-7 - Interface gráfica do programa Catman, usado para acompanhamento dos ensaios.

5.3 - Descrição do programa de ensaio

Tal como a produção das vigas, a realização dos ensaios também se desenvolveu em duas etapas diferentes. O primeiro conjunto de vigas foi ensaiado depois de decorridos aproximadamente 3 meses após a betonagem da primeira viga e o segundo conjunto ao fim de aproximadamente 9 meses.

Quadro 5-2 - Data de ensaio das vigas.

| VIGA | Tempo (dias) |
|-----------------|--------------|
| A500_C35_d12 | 76 |
| AISI316_C35_d12 | 102 |
| HSS1_C35_d12 | 105 |
| A500_C60_d12 | 112 |
| AISI316_C60_d12 | 123 |
| HSS1_C60_d12 | 139 |
| A500_C35_d16 | 276 |
| AISI316_C35_d16 | 278 |
| HSS3_C35_d14 | 282 |
| A500_C60_d16 | 285 |
| AISI316_C60_d16 | 289 |
| HSS3_C60_d14 | 292 |

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.

Salienta-se que 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 na 2.^a série de ensaios se optou por manter todos os transdutores de deslocamento até ao fim do ensaio.

CAPÍTULO 6 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

6.1 - Apresentação geral dos resultados obtidos

Com base nas leituras dos diferentes canais registadas pelo sistema de aquisição automática de dados utilizado, foi possível proceder ao tratamento dos resultados em folhas de cálculo previamente preparadas para o efeito.

Assim, para cada modelo ensaiado foi possível usar as diferentes leituras registadas para obter as seguintes representações gráficas:

- Diagramas força - flechas;
- Diagramas força - deslocamento da máquina;
- Diagramas momento - extensões no betão e na armadura;
- Diagramas momento - curvatura.

Relativamente aos diagramas apresentados, salienta-se que para as seis primeiras vigas ensaiadas, foram retirados todos os transdutores de deslocamento após ter sido atingida a cedência, pelo que 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. Por outro lado, em alguns casos não existem registos da totalidade do ensaio por parte de alguns transdutores de deslocamento devido a problemas ocorridos durante a aquisição dos dados.

No caso da viga A500_C35_d12, que foi a primeira viga a ser ensaiada, constatou-se que o sistema de suporte dos transdutores de deslocamento não se encontrava devidamente solidarizado à viga, pelo que não foi possível ter resultados fiáveis para a relação entre o momento actuante e as extensões no betão e na armadura, bem como para a relação momento - curvatura. Nos restantes ensaios optou-se por colocar, no sistema de suporte dos transdutores de deslocamento, diversas molas que acabaram por garantir o posicionamento adequado dos transdutores de deslocamento durante os ensaios, em particular para as deformações mais elevadas.

Relativamente às vigas de referência executadas com varões de 12 e 16 mm 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 A500NR, 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 título exemplificativo as figuras seguintes mostram claramente a posição inicial, intermédia e final do ensaio da viga HSS3_C60_d14.



Figura 6-1 - Posição inicial de ensaio da viga HSS3_C60_d14.



Figura 6-2 - Posição intermédia de ensaio da viga HSS3_C60_d14.

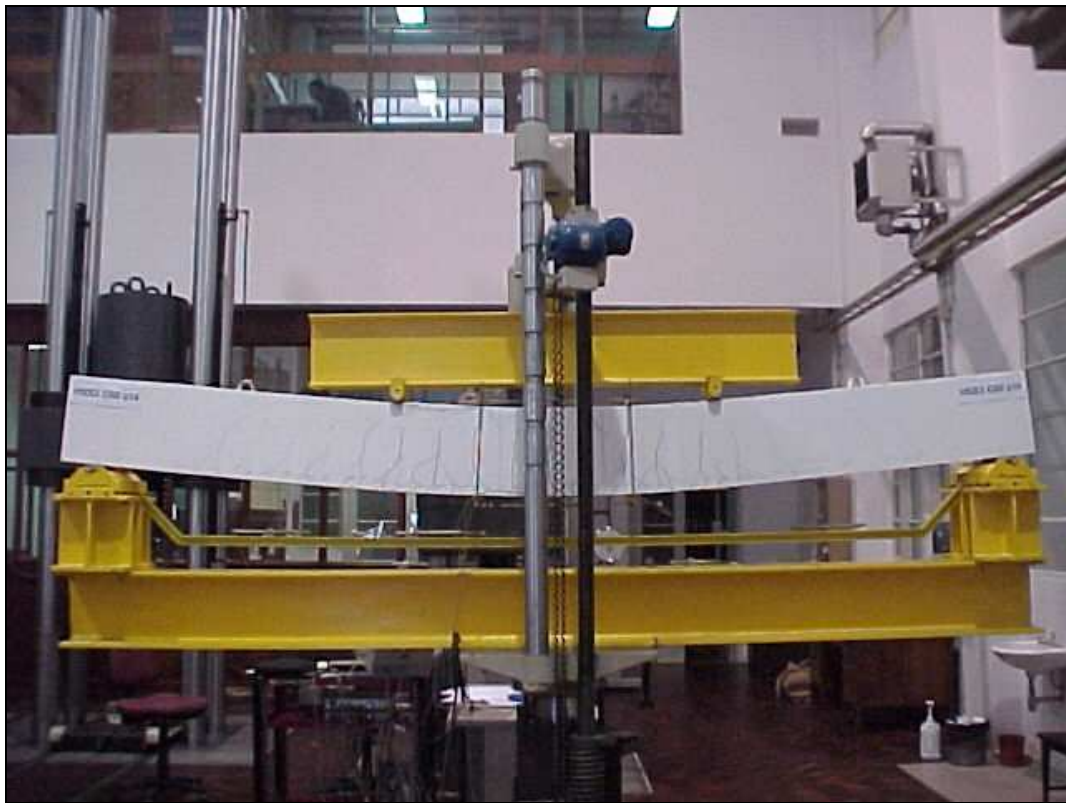


Figura 6-3 - Posição final de ensaio da viga HSS3_C60_d14.

De seguida 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).

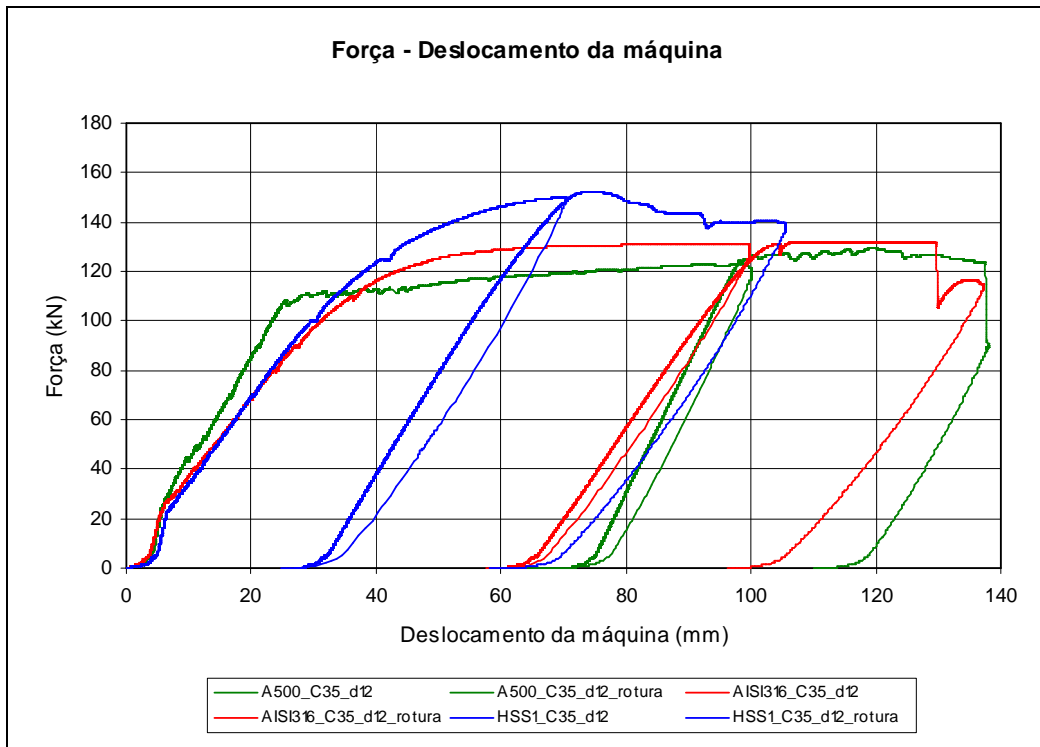


Figura 6-4 - Vigas com betão de resistência normal e varões de 12 mm.

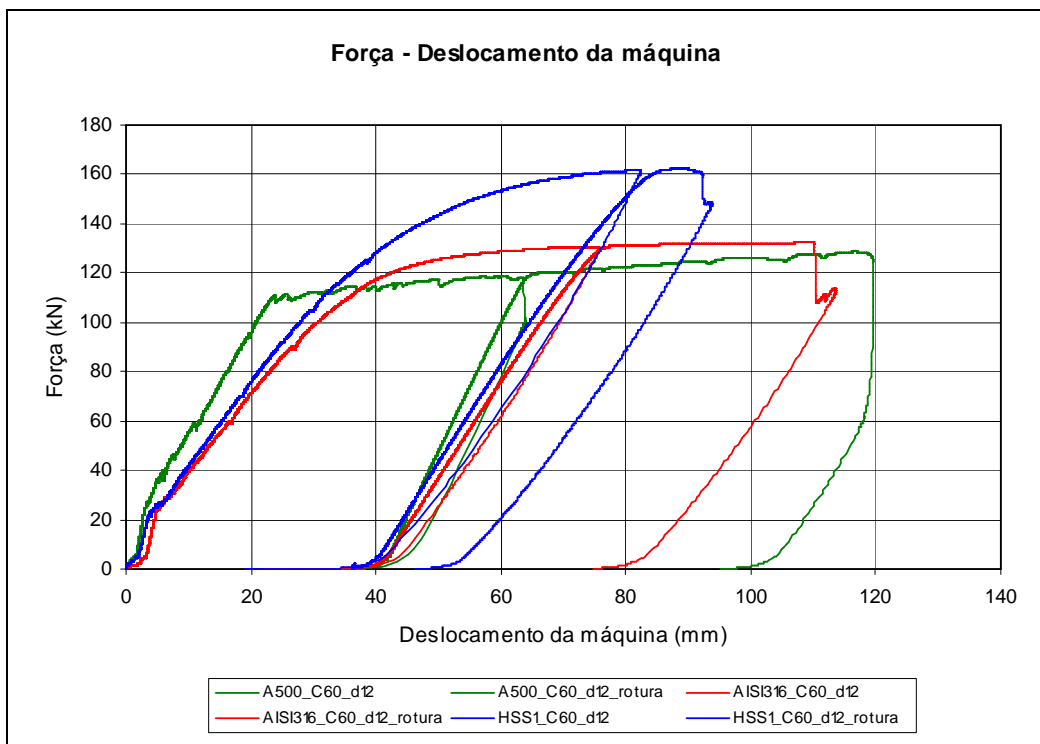


Figura 6-5 - Vigas com betão de alta resistência e varões de 12 mm.

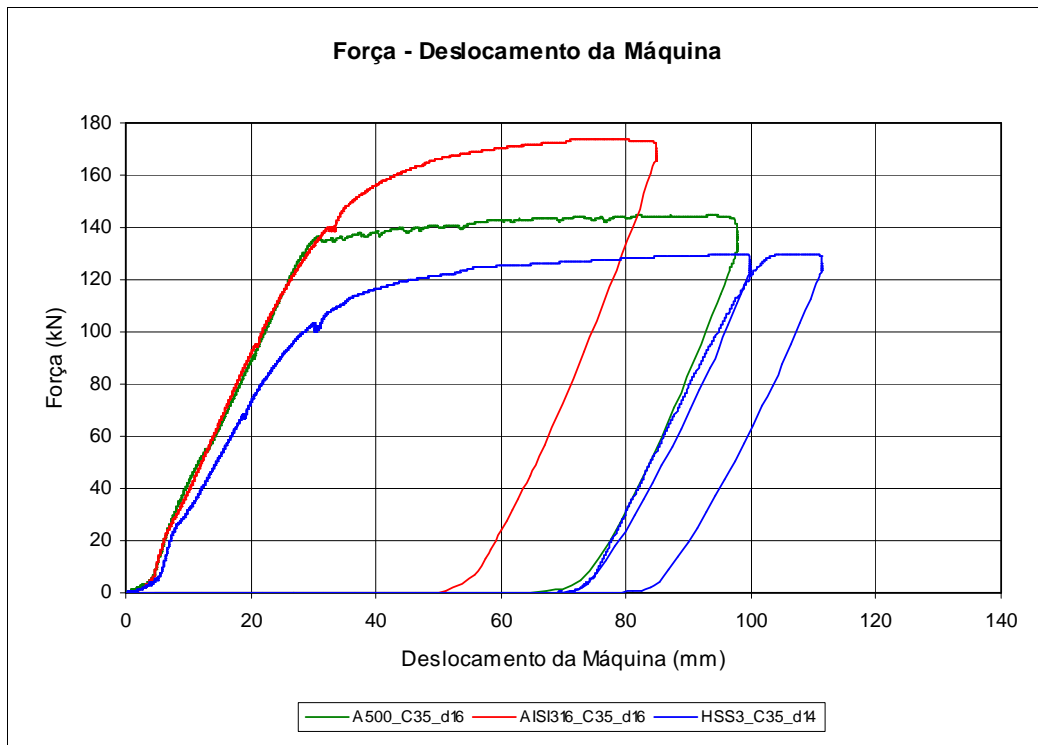


Figura 6-6 - Vigas com betão de resistência normal e varões de 16 e 14 mm.

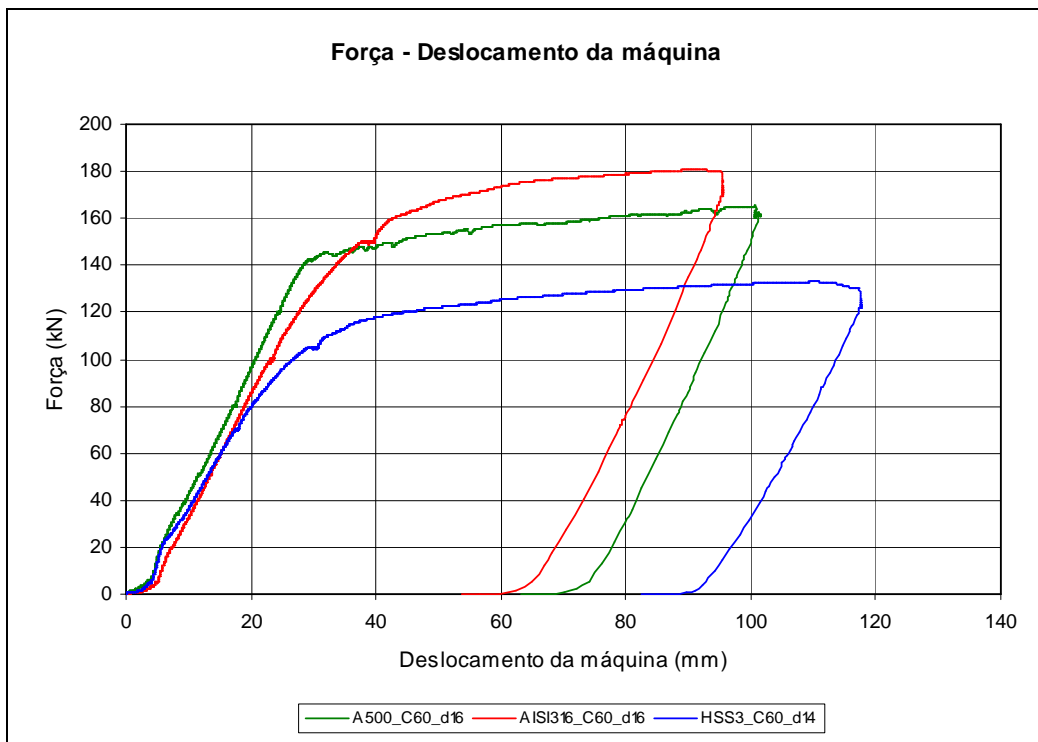


Figura 6-7 - Vigas com betão de alta resistência e varões de 16 e 14 mm.

A totalidade dos resultados, por cada modelo de viga, encontra-se no anexo deste trabalho.

6.2 - Análise e discussão dos resultados obtidos

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

- Flechas em condições de serviço;
- Sistematização dos resultados obtidos para as flechas e deslocamentos do equipamento de ensaio correspondentes às forças de cedência teórica, força máxima e força de rotura;
- 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 é efectivamente representativa do aço das armaduras utilizadas na execução destas vigas.

6.3 - Flecha 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 3-1.

Considerando que o momento resistente de cálculo pode ser obtido a partir do valor do momento de cedência teórico ($M_{y, \text{teo}}$)^Y 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

^Y Momento de cedência experimental para as vigas de referência.

de cálculo de cada modelo (M_{Rd}) foi possível avaliar o valor correspondente de flecha obtida experimentalmente ($f_{serviço}$) que se apresenta no quadro que se segue.

Quadro 6-1 - Flechas em condições de serviço.

| VIGAS | $M_{y, teo}$ ^Y (kN.m) | f_{syd} (MPa) | f_{sy} (MPa) | M_{Rd} (kN.m) | $M_{serviço}$ $\cong 0,6M_{Rd}$ (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 6-1 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 [26] em situações correntes, para: $\frac{L}{250} = \frac{3700}{250} = 14,8 \text{ mm}$. Porém, como se pode constatar pelos resultados obtidos através do Método Bilinear, as flechas a longo prazo encontram-se acima dos limites previstos pelo Eurocódigo 2 [26].

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.

6.3.1 - 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 [35]. 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 seguinte 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 6-2 - Comparação entre os resultados de flecha experimental e flechas estimadas (instantânea e a longo prazo) usando o Método Bilinear [35], para as vigas executadas com betão de resistência normal.

| VIGAS | $M_{serviço} \cong 0,6M_{Rd}$ (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 [35] permite concluir que não existem diferenças muito acentuadas entre os resultados obtidos experimentalmente e os resultados estimados, 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 [26] 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.

6.4 - Flechas e deslocamentos do equipamento de ensaio

Com o objectivo de sistematizar a informação relativa ao ensaio dos diferentes modelos que se apresenta no Anexo do presente trabalho, os quadros que se seguem indicam os resultados mais relevantes obtidos durante a realização dos ensaios.

Estes dados são fundamentais para quantificar o índice de ductilidade em deslocamento no ponto 6.5 deste trabalho, uma vez que não é possível relacionar os deslocamentos na rotura para a globalidade dos modelos, sem ser através dos deslocamentos do equipamento de ensaio, pois como já foi referido, na 1.^a série de ensaios foram retirados todos os transdutores de deslocamento antes da rotura.

Quadro 6-3 - Primeira série de vigas: força de cedência teórica, força máxima e força última.

| VIGAS | $F_{y, \text{teo}}^{\text{Y}}$ (kN) | $F_{\text{max,exp}}$ (kN) | $F_{\text{ult,exp}}$ (kN) |
|-----------------|--|------------------------------|------------------------------|
| A500_C35_d12 | 107,1 | 129,5 | 123,5 |
| AISI316_C35_d12 | 119,6 | 131,9 | 130,5 |
| HSS1_C35_d12 | 130,4 | 152,2 | 137,2 |
| A500_C60_d12 | 109,3 | 128,7 | 125,3 |
| AISI316_C60_d12 | 120,1 | 132,3 | 130,8 |
| HSS1_C60_d12 | 129,9 | 162,4 | 157,5 |

Quadro 6-4 - Primeira série de vigas: flecha e deslocamento do equipamento de ensaio correspondentes à força de cedência teórica, à força máxima e à força última.

| VIGAS | $f(F_{y, \text{teo}}^{\text{Y}})$ (mm) | $d_{\text{eq}}(F_{y, \text{teo}}^{\text{Y}})$ (mm) | $d_{\text{eq}}(F_{\text{max}})$ (mm) | $d_{\text{eq}}(F_{\text{ult}})$ (mm) |
|-----------------|---|---|---|---|
| A500_C35_d12 | 22,8 | 26,2 | 119,4 | 137,5 |
| AISI316_C35_d12 | 44,0 | 42,8 | 127,3 | 129,6 |
| HSS1_C35_d12 | 43,1 | 44,0 | 74,1 | 105,4 |
| A500_C60_d12 | 23,3 | 23,1 | 116,6 | 119,5 |
| AISI316_C60_d12 | 43,0 | 42,4 | 109,0 | 110,2 |
| HSS1_C60_d12 | 43,4 | 40,8 | 89,4 | 92,3 |

^Y Momento de cedência experimental para as vigas de referência.

Quadro 6-5 - Segunda série de vigas: força de cedência teórica, força máxima e força última.

| VIGAS | $F_{y, \text{teo}}^{\text{Y}}$ (kN) | $F_{\text{max,exp}}$ (kN) | $F_{\text{ult,exp}}$ (kN) |
|-----------------|--|------------------------------|------------------------------|
| A500_C35_d16 | 134,5 | 144,7 | 140,7 |
| AISI316_C35_d16 | 167,0 | 173,7 | 171,1 |
| HSS3_C35_d14 | 118,1 | 130,0 | 127,4 |
| A500_C60_d16 | 142,9 | 165,2 | 163,2 |
| AISI316_C60_d16 | 169,2 | 180,6 | 177,1 |
| HSS3_C60_d14 | 118,2 | 133,1 | 128,5 |

Quadro 6-6 - Segunda série de vigas: flecha e deslocamento do equipamento de ensaio correspondentes à força de cedência teórica, à força máxima e à força última.

| VIGAS | $f(F_{y, \text{teo}}^{\text{Y}})$ (mm) | $d_{\text{eq}}(F_{y, \text{teo}}^{\text{Y}})$ (mm) | $f(F_{\text{max}})$ (mm) | $d_{\text{eq}}(F_{\text{max}})$ (mm) | $f(F_{\text{ult}})$ (mm) | $d_{\text{eq}}(F_{\text{ult}})$ (mm) |
|-----------------|---|---|-----------------------------|---|-----------------------------|---|
| A500_C35_d16 | 25,7 | 29,7 | 103,4 | 93,3 | 109,3 | 97,7 |
| AISI316_C35_d16 | 49,2 | 51,3 | 79,3 | 77,1 | 88,0 | 84,7 |
| HSS3_C35_d14 | 39,3 | 42,7 | 115,1 | 106,9 | 120,5 | 111,3 |
| A500_C60_d16 | 26,0 | 30,2 | 109,2 | 100,7 | 109,3 | 100,8 |
| AISI316_C60_d16 | 50,1 | 52,7 | 97,7 | 92,6 | 100,9 | 95,5 |
| HSS3_C60_d14 | 39,7 | 40,7 | 123,7 | 110,8 | 131,1 | 117,5 |

A comparação dos resultados experimentais aqui apresentados com as forças máximas e últimas obtidas analiticamente no Capítulo 4 permite concluir que existe uma boa aproximação entre os mesmos.

^Y Momento de cedência experimental para as vigas de referência.

Quadro 6-7 - Comparação entre resultados analíticos e experimentais para as forças máximas e últimas de cada viga e respectivas diferenças relativas.

| VIGAS | $F_{max., teo}$ (kN) | $F_{max., exp}$ (kN) | Diferença relativa (%) | $F_{ult., teo}$ (kN) | $F_{ult., exp}$ (kN) | Diferença relativa (%) |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|
| A500_C35_d12 | 126,9 | 129,5 | 2,1 | 122,3 | 123,5 | 1,0 |
| AISI316_C35_d12 | 132,2 | 131,9 | -0,2 | 124,9 | 130,5 | 4,5 |
| HSS1_C35_d12 | 155,2 | 152,2 | -1,9 | 147,1 | 137,2 | -6,7 |
| A500_C60_d12 | 129,1 | 128,7 | -0,3 | 124,5 | 125,3 | 0,7 |
| AISI316_C60_d12 | 134,3 | 132,3 | -1,5 | 130,2 | 130,8 | 0,4 |
| HSS1_C60_d12 | 158,6 | 162,4 | 2,4 | 153,0 | 157,5 | 2,9 |
| A500_C35_d16 | 157,9 | 144,7 | -8,4 | 151,9 | 140,7 | -7,4 |
| AISI316_C35_d16 | 187,6 | 173,7 | -7,4 | 178,8 | 171,1 | -4,3 |
| HSS3_C35_d14 | 137,4 | 130,0 | -5,4 | 133,0 | 127,4 | -4,2 |
| A500_C60_d16 | 163,1 | 165,2 | 1,3 | 157,0 | 163,2 | 3,9 |
| AISI316_C60_d16 | 195,5 | 180,6 | -7,6 | 188,3 | 177,1 | -5,9 |
| HSS3_C60_d14 | 142,3 | 133,1 | -6,5 | 139,2 | 128,5 | -7,7 |

Relativamente aos diagramas que a seguir se apresentam, salienta-se que na 1.ª série existe uma melhor aproximação entre os valores obtidos pelas duas vias, apesar dos diagramas não reflectirem a totalidade do ensaio.

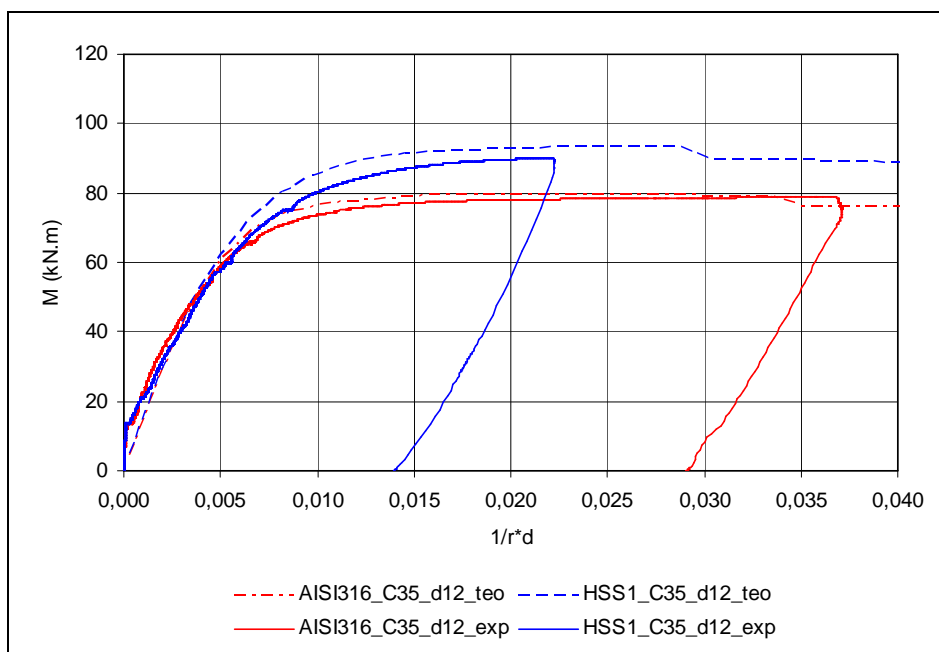


Figura 6-8 - Momentos - curvaturas teóricos e experimentais das vigas de aço inoxidável da 1.ª série de modelos com betão de resistência normal.

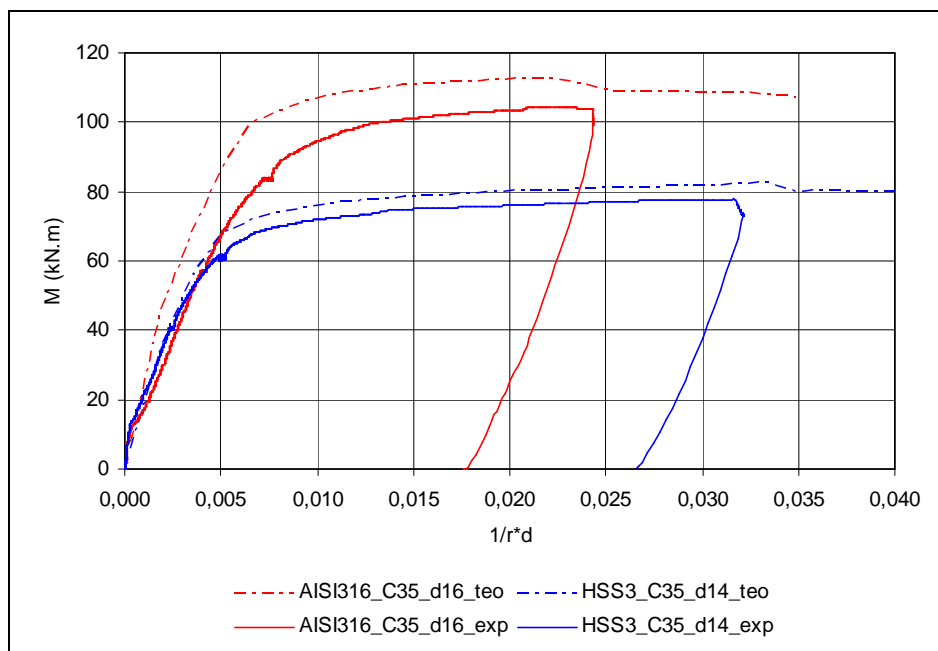


Figura 6-9 - Momentos - curvaturas teóricos e experimentais das vigas de aço inoxidável da 2.ª série de modelos com betão de resistência normal.

Por outro lado, a relação entre a curvatura na rotura, obtida experimentalmente, pode não reflectir de uma forma adequada a curvatura limite que o modelo poderia ter, uma vez que o critério de paragem do ensaio esteve sempre associado ao início da rotura do betão, para não danificar o sistema de ensaio.

Da realização dos ensaios importa ainda destacar que a rotura dos modelos ocorreu sempre por esgotamento da capacidade de deformação do betão em compressão, conforme documentam as figuras seguintes, mesmo para a viga AISI316_C60_d12 em que se suponha ser possível ter uma rotura mais dúctil.



Figura 6-10 - Detalhe da rotura do betão em compressão na viga A500_C35_d16.

6.5 - 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 seguinte encontram-se quantificados os seguintes parâmetros:

- Percentagem geométrica de armadura: $\rho = \frac{A_s}{b * d}$
- Percentagem mecânica de armadura: $\omega = \frac{A_s}{b * d} * \frac{f_{sy}}{f_{cm}}$
- Índice de ductilidade em deslocamento: $\mu_\delta = \frac{d_{eq}(F_{ult})}{d_{eq}(F_{y,teo})}$

Quadro 6-8 - 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 três vigas cada, 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%.

6.6 - 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.

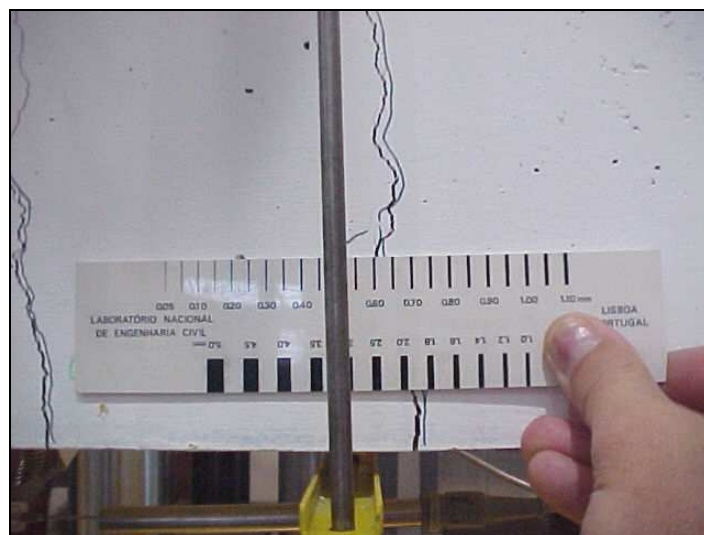


Figura 6-11 - Pormenor da medição da abertura de fendas, ao nível da armadura, da viga A500_C35_d16.

Os valores experimentais obtidos são comparados com os valores teóricos esperados, determinados de acordo com o previsto pelo REBAP [24] que segue as recomendações do CEB Design Manual on Cracking and Deformations [35].

Quadro 6-9 - Resultados médios do espaçamento e abertura de fendas esperados e obtidos experimentalmente.

| VIGAS | Resultados esperados | | | Resultados experimentais | |
|-----------------|---|--|----------------------------------|--|-----------------------------------|
| | $M_{serviço} \cong 0,6M_{Rd}$ (kN.m) | Espaçamento médio entre fendas (cm) | Abertura média de fendas (mm) | Espaçamento médio entre fendas (cm) | Abertura máxima de fendas (mm) |
| A500_C35_d12 | 28,9 | 15,9 | 0,16 | 15,1 | 0,15 |
| AISI316_C35_d12 | 31,8 | 9,7 | 0,15 | 12,5 | 0,15 |
| HSS1_C35_d12 | 35,2 | 9,7 | 0,17 | 11,3 | 0,30 |
| A500_C60_d12 | 29,5 | 16,0 | 0,17 | 17,4 | 0,25 |
| AISI316_C60_d12 | 32,0 | 9,8 | 0,15 | 10,1 | 0,15 |
| HSS1_C60_d12 | 35,1 | 9,8 | 0,16 | 13,9 | 0,30 |
| A500_C35_d16 | 38,5 | 17,0 | 0,19 | 11,6 | 0,15 |
| AISI316_C35_d16 | 46,2 | 8,9 | 0,12 | 10,4 | 0,05 |
| HSS3_C35_d14 | 36,0 | 9,3 | 0,12 | 8,1 | 0,05 |
| A500_C60_d16 | 40,9 | 17,0 | 0,20 | 15,1 | 0,10 |
| AISI316_C60_d16 | 46,8 | 9,0 | 0,12 | 8,1 | 0,15 |
| HSS3_C60_d14 | 36,1 | 9,4 | 0,12 | 8,9 | 0,05 |

Nas figuras seguintes documenta-se o estado de fendilhação de algumas das vigas de aço inoxidável, para níveis de força correspondentes ao estado limite de utilização.



Figura 6-12 - Viga HSS1_C35_d12: a azul medição da espessura das fendas, para nível de força correspondente ao estado limite de utilização.

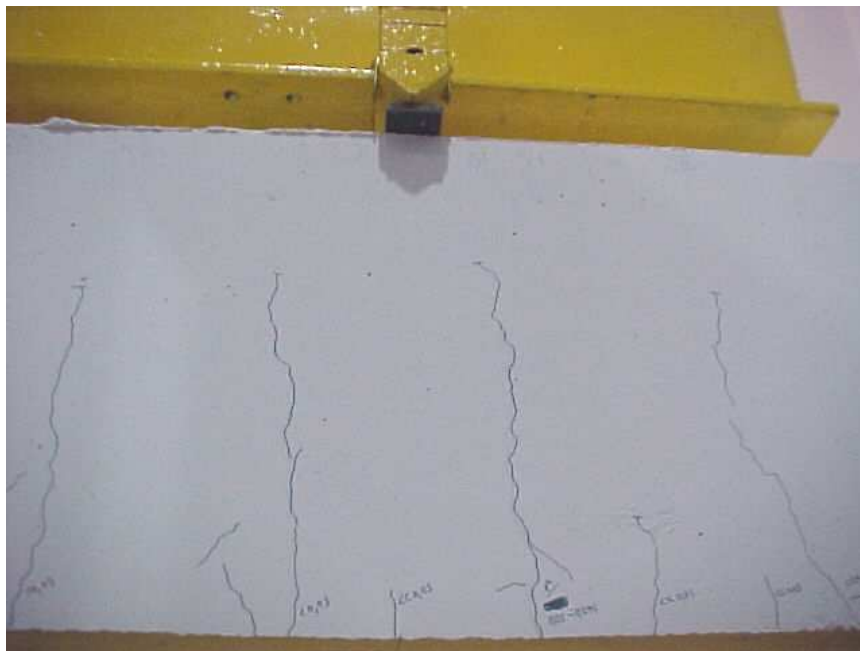


Figura 6-13 - Viga HSS3_C35_d14: medição da espessura das fendas, para nível de força correspondente ao estado limite de utilização.

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, conforme se pode verificar nas figuras seguintes e para níveis de força aplicados correspondentes a valores de momento flector muito acima dos momentos de cedência teóricos obtidos.



Figura 6-14 - Pormenor da fendilhação da viga AISI316_C35_d16.

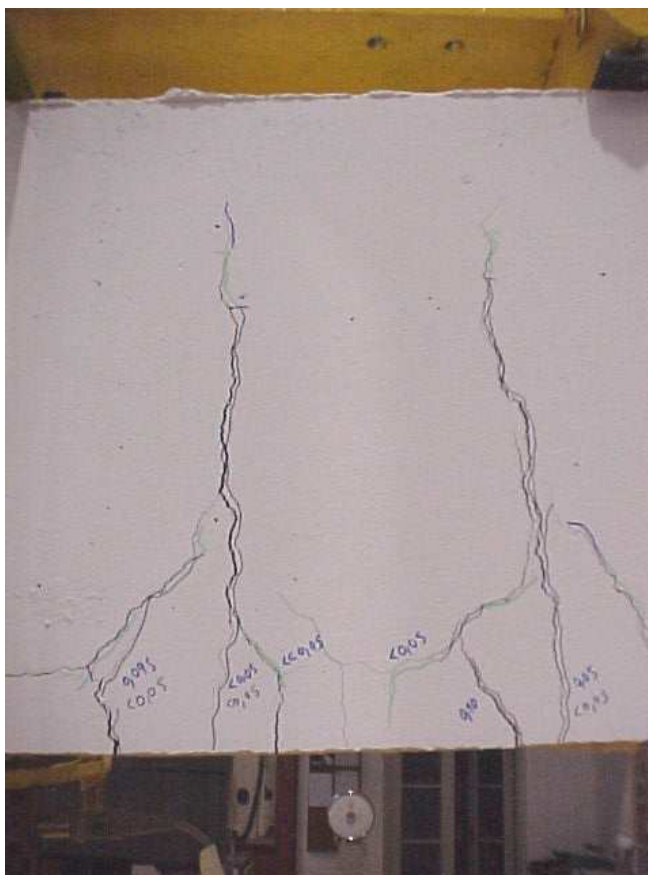


Figura 6-15 - Pormenor da fendilhação da viga HSS3_C35_d14.

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.

6.7 - 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.

Para esta análise simplificada foram considerados os preços correntes dos materiais em questão no mercado nacional, à data de realização deste trabalho, tendo sido admitidas as seguintes hipóteses:

- Custo betão C35 = 75 € /m³;
- Custo betão C60 = 85 € /m³;

- Custo aço carbono montado = 1,20 €/kg, sendo 0,45€/kg o custo do material e 0,75 €/kg a montagem;
- Custo aço inoxidável \cong 5 x Custo aço carbono;
- 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;
- Admitiu-se que o custo de montagem das armaduras de aço inoxidável é equivalente ao das armaduras de aço carbono.

No quadro seguinte encontra-se quantificado o custo por unidade de momento resistente de cálculo para cada um dos modelos de vigas.

Quadro 6-10 - Custo por unidade de momento resistente.

| VIGA | M_{Rd} (kN.m) | Volume Betão (m ³) | Custo Betão (€) | Peso Aço (kg) | Custo Aço (€) | Custo Total (€) | 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 € |

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, como estes varões apresentam o comportamento típico de um aço A500NR, 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).

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 melhore substancialmente a eficiência desta última composição.

Finalmente, da análise deste caso, constata-se 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.

CAPÍTULO 7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 - Relativas às características dos aços em estudo

Com os resultados obtidos no presente estudo é possível concluir que as novas composições de aço inoxidável apresentam desempenho adequado à sua utilização como armaduras para betão. Contudo, os varões cujo comportamento mecânico é mais promissor (HSS1) são aqueles que revelam maior fragilidade na rotura e também pior desempenho em termos de resistência à corrosão, de acordo com os estudos desenvolvidos por outros parceiros [21], no âmbito do projecto de investigação.

Desta forma, a composição HSS3 apresenta-se como sendo a melhor alternativa, uma vez que apresenta o comportamento típico de um A500NR associado a uma boa resistência à corrosão e a um custo inferior aos dos aços inoxidáveis actualmente usados.

A comparação entre os resultados obtidos nos ensaios de *pull-out* e nas medições de nervuras permite verificar que existe uma boa correlação entre eles, confirmando-se portanto que é adequado e suficiente caracterizar a aderência através da medição do perfil nervurado.

Verifica-se no entanto que os limites estabelecidos pelo Eurocódigo 2 [26] para a área relativa das nervuras transversais (f_R), no caso dos varões de 12 mm ($f_R > 0,040$), são demasiado baixos uma vez que os resultados obtidos para as tensões de aderência ($\tau_{média}$ e $\tau_{máxima}$) correspondem aos valores mínimos estabelecidos sendo que os resultados de f_R obtidos são muito superiores aos mínimos exigidos ($f_R \geq 0,050$).

Nestas circunstâncias parecem mais adequados os limites previstos pelas Especificações LNEC actualmente em vigor.

7.2 - Relativas ao comportamento dos modelos de vigas

A utilização de varões de aço inoxidáveis em vigas, em ambientes muito agressivos, permite reduzir significativamente os recobrimentos a adoptar, sendo apenas necessário garantir uma espessura mínima de recobrimento, para que seja assegurada uma transmissão eficiente das forças entre as armaduras e o betão.

Em termos de estados limites últimos de resistência, esta redução dos recobrimentos permite aumentar a altura útil das vigas, de que resulta uma maior resistência à flexão,

para a mesma quantidade de armadura. Tal poderá representar uma economia nas quantidades de aço a utilizar.

Se além disto se tratarem de aços inoxidáveis de elevada resistência, como é o caso do aço aqui designado como HSS1, a quantidade de aço pode ser significativamente reduzida, obtendo-se resistências semelhantes, traduzindo-se também numa economia de armadura. Do mesmo modo, a redução de recobrimento permitirá reduzir as secções de betão, reduzindo a sua largura e mantendo a mesma altura, conseguindo-se ainda uma economia na quantidade de betão, e mantendo a mesma resistência à flexão.

A concepção das vigas que foram ensaiadas, no âmbito do programa experimental desenvolvido neste trabalho, pretendeu reflectir todas as vantagens anteriormente citadas em termos de economia nas quantidades dos materiais a considerar para o mesmo nível de resistência.

O principal objectivo dos ensaios realizados foi analisar as consequências das alterações efectuadas 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 confirmam que os modelos analíticos considerados pelo Eurocódigo 2 [26] 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. Este fenómeno é explicado basicamente através da redução do recobrimento, que por sua vez reduz o espaçamento entre fendas e consequentemente a abertura dessas fendas.

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 A500NR 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 [26] para as flechas instantâneas.

A utilização de armaduras de aço inoxidável conduziu a uma redução da ductilidade dos elementos quando se compara a ductilidade das vigas de referência e com a das vigas de aço inoxidável.

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.

Ainda com base nos dados e nas limitações deste estudo pode concluir-se que a utilização de betões de alta resistência acaba por não trazer qualquer benefício, visto que o custo mais elevado deste material acaba por não ser compensado em termos de uma maior resistência das secções transversais.

7.3 - Perspectivas futuras

7.3.1 - Ao nível do enquadramento legal da utilização de armaduras de aço inoxidável

A necessidade crescente de utilizar materiais com melhor desempenho em termos de resistência mecânica e de resistência à corrosão e que consequentemente garantam uma maior durabilidade das estruturas exigirá, a curto prazo, a definição ao nível da normalização das características a que os mesmos devem satisfazer.

Neste sentido, a ECISS/TC19/SC1 criou em 2005 um grupo de trabalho (WG6) que tem como tarefa principal o desenvolvimento de uma norma europeia harmonizada para armaduras de aço inoxidável.

Actualmente, o documento em questão [58] encontra-se ainda longe de poder ser submetido à ECISS/TC19/SC1, uma vez que é necessário desenvolver algum trabalho ao nível da definição das características destas armaduras em termos de resistência ao fogo e de metodologias de avaliação da resistência à fadiga. A actual versão da norma harmonizada em preparação [58] carece também de uma metodologia que permita avaliar o nível de qualidade do material produzido a longo prazo, à semelhança do que se encontra proposto pela EN 10080 [25].

Até à publicação da referida norma harmonizada, a utilização de armaduras ordinárias em Portugal continua a ser regulada pelo REBAP [24] que especifica os tipos de armaduras

usadas (varões e redes electrossoldadas) e as principais características de cada tipo de armadura, estipulando o artigo 23.º a obrigatoriedade da sua prévia Classificação pelo LNEC.

Assim, é expectável que seja necessário regular a utilização destes materiais em Portugal à luz dos conhecimentos e exigências actuais, definindo as condições a que os varões nervurados de aço inoxidável devem satisfazer com vista ao cumprimento do REBAP [24] mas também de outras disposições, nomeadamente, exigências de ductilidade, de soldabilidade, de aderência, de resistência à fadiga e de resistência à corrosão.

Portanto, considera-se imprescindível que a muito curto prazo se esclareça o meio técnico sobre o enquadramento legal da utilização de armaduras de aço inoxidável em Portugal, em face do disposto no artigo 23.º do REBAP [24] e em especial após a publicação do Decreto-Lei n.º 390/2007 [59], que através do seu artigo 3.º abrange as armaduras para betão armado de aço inoxidável.

A certificação obrigatória, por entidade acreditada no âmbito do Sistema Português da Qualidade, de todos os produtos de aço para betão armado, imposta pelo referido decreto [59] exigirá também a definição de metodologias que permitam garantir um adequado controlo de qualidade destes produtos.

7.3.2 - Ao nível do enquadramento no Eurocódigo 2

Actualmente as regras de concepção e pormenorização de estruturas de betão armado definidas pelo Eurocódigo 2 [26] apenas são válidas para armaduras com tensões de cedência características entre 400 e 600 MPa.

Apesar do Eurocódigo 2 [26] já prever a utilização de armaduras de aço inoxidável, ainda não estão devidamente aferidas as implicações associadas à utilização de armaduras que além de boa resistência à corrosão apresentem também elevada resistência mecânica. Assim, considera-se que o enquadramento ou a criação de regras adicionais no Eurocódigo 2 [26] para este tipo de armaduras, deve ser precedido de estudos mais aprofundados que permitam definir as regras a observar para se tirar o máximo partido possível das potencialidades dos aços de alta resistência. Estudos recentes demonstram também a necessidade de definir diagramas tensão - extensão de cálculo específicos para estes materiais [60].

Com os resultados obtidos no presente trabalho, perspectiva-se também a necessidade de estudar qual ou quais os limites mais adequados que devem ser impostos na regulamentação para a verificação da segurança aos estados limite de utilização, quer ao

nível da deformação dos elementos quer ao nível da fendilhação, uma vez que as armaduras de aço inoxidável apresentam, na generalidade, níveis de ductilidade muito acima do que é comum para os aços carbono que actualmente se utilizam.

Paralelamente, considera-se também de grande interesse a utilização destes materiais em estruturas localizadas em áreas com risco sísmico elevado, uma vez que a sua elevada ductilidade é uma mais valia no que diz respeito à capacidade de dissipação de energia imposta pela acção sísmica.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Salta, M. Manuela - “A utilização de varões de aço inoxidável como medida preventiva da corrosão em estruturas em ambiente marítimo”; REPAR 2000 - Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas; GPEE; 2000.
- [2] Mesquita, Carlos et al.; “Inspeção de estruturas de betão armado deterioradas por corrosão das armaduras”; Brochura OZ; <http://www.oz-diagnostico.pt>.
- [3] <http://www.stainless-rebar.org>
- [4] Giraud, P.; Moulinier, F.; “Stainless steel rebar, the choice of a long lasting quality”; fib Symposium “Keep Concrete Attractive”; Budapest; 2005; p. 397-403.
- [5] 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.
- [6] Castro-Borges, P. et al.; “Performance of a 60-Year-Old Concrete Pier with Stainless Steel Reinforcement”; Materials Performance; Outubro 2002; p. 50-55.
- [7] Schnell, R. E.; Bergmann, M. P.; “Improving Tomorrow’s Infrastructure: Extending the Life of Concrete Structures with Solid Stainless Steel Reinforcing Bar”; 2007 New York City Bridge Engineering Conference; 2007.
- [8] Deyu Qu; Shiyuan Qian; Bruce Baldock; - “Effects of galvanic coupling between carbon steel and stainless steel reinforcements”; COM2005 Materials; Degradation: Innovation, Inspection, Control and Rehabilitation; Calgary, Alberta; p. 99-117.
- [9] Qian, S.; Qu, D. Coates, G.; “Galvanic coupling between carbon steel and stainless steel reinforcements”; National Research Council Canada; <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ircpubs>.
- [10] Abreu, C.M. et al; “Galvanic coupling between carbon steel and austenitic stainless steel in alkaline media”; Electrochimica Acta 47; 2002; p. 2271-2279.
- [11] HIPER - Increased infrastructure reliability by developing a low cost and high performance stainless steel rebars, project n.º GDR1-2000-25601.
- [12] CIM Béton; I. D. Inox; “Béton armé d’inox - le choix de la durée”; Collection technique; CIM Béton; 2004.

- [13] EN 10088-1:1995 - “Stainless steels: - Part 1: List of stainless steels”.
- [14] EN 10002-1:2001 - “Metallic materials. Tensile testing. Part 1: Method of test at ambient temperature”.
- [15] BS 6744:1986 - “Austenitic stainless steel bars for the reinforcement of concrete”.
- [16] ASTM A955M:1996 - “Deformed and plain stainless steel bars for concrete”.
- [17] BS 6744:2001 - “Stainless steel bars for the reinforcement of and use in concrete”.
- [18] Paolucci, Mario Gial et al., “Ductility of Stainless Steel Rebars”, Bulletin d’ Information n.º 218: Ductility Reinforcement, CEB, 1993.
- [19] ASTM E1086-94 (2005) - “Standard Test Method for Optical Emission Vacuum Spectrometric Analysis of Stainless Steel by the Point-to-Plane Excitation Technique”.
- [20] Especificação Técnica LNEC E450-1998 - “Varões de aço A500NR para Armaduras de Betão Armado. Características, Ensaios e Marcação”.
- [21] “Mechanical properties of the innovative stainless steels rebars in comparison with those of the AISI 304, 316 and FB44K ones.”, Politecnico di Torino, 2003.
- [22] EN ISO 15630-1:2002 - “Steel for the reinforcement and prestressing of concrete - Test methods - Part 1: Reinforcing bars, wire rod and wire”.
- [23] Especificação Técnica LNEC E460-2002 - “Varões de aço A500NR de Ductilidade Especial para Armaduras de Betão Armado. Características, Ensaios e Marcação”.
- [24] REBAP - Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado, Decreto-Lei nº 349-C/83, de 30 de Julho.
- [25] EN 10080: 2005 - “Steel for the reinforcement of concrete - Weldable reinforcing steel”; May 2005.
- [26] EN 1992 - 1-1: 2004 - Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings”.
- [27] Recommendation RC 6 - Bond test for reinforcement steel - 2. *Pull-out test*; RILEM; 1983.
- [28] Baurat; Stefan Soretz; Joint Investigation of “Bond as a test quality”; Bulletin d’ Information N.º 118; CEB; 1979.

-
- [29] Draft prEN 1992-1-1 - Eurocode 2: “Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings”; October 2001.
- [30] Appleton, Júlio; “Construções em betão - Nota histórica sobre a sua evolução”; www.ist.utl.pt.
- [31] NP 1383:1976 - Betões. Preparação de provetes para ensaios de compressão e de flexão.
- [32] Especificação Técnica LNEC E 226:1968 - “Betão. Ensaio de compressão”.
- [33] Especificação técnica LNEC E 227:1968 - “Betão. Ensaio de flexão”.
- [34] Pipa, M.; “Ductilidade de elementos de betão armado sujeitos a acções cíclicas. Influência das características das armaduras”; Tese de Doutoramento; 1993.
- [35] CEB Design Manual on Cracking and Deformations; École Polytechnique Fédérale de Lausanne; 1985.
- [36] Kilworth, S.R.; Fallon, J.; “Stainless Steels for Reinforcement”; 2nd Regional Conference on Concrete Durability in the Arabian Gulf; Bahrain Society of Engineers; 1995.
- [37] “Guidance on the use of stainless steel reinforcement”; Report of a Concrete Society Steering Committee; Concrete Society Technical Report 51; 1998; 55 p.
- [38] “Use of Stainless Steel Reinforcement in Highway Structures” - Part 15 of the Design Manual for Roads and Bridges: Volume 1 - Highway Structures: Approval Procedures and General Design; Section 3: General Design, Highways Agency; 2002.
- [39] Outokumpu; webpage: <http://www.outokumpu.com/> Products information.
- [40] McDonald D. B. et al.; “Stainless Steel reinforcing as corrosion protection”, Concrete International; Maio 1995.
- [41] Markeset, G.; Rostam, S.; “Guide for the use of stainless steel reinforcement in concrete structures”; Project Report 405; 2006.
- [42] “Stainless steel reinforcement in concrete. The use of stainless steel reinforcement in bridges”; British Steel Association; April 2002.
- [43] “Stainless Steel in Concrete”; European Federation of Corrosion Publications; Number 18; The Institute of Materials; 1996.

- [44] Flint, G.N.; Cox, R.N.; "The Resistance of Stainless Steel Partly Embedded in Concrete to Corrosion by Seawater"; Magazine of Concrete Research, Vol. 40, N.º 142; 1988.
- [45] Bertolini, L.; Pedefferri, P.; Pastore, T.; "Stainless Steel in Reinforced Concrete Structures"; TProceedings of the Second International Conference on "Concrete under Severe Conditions", Vol. 1T, Tromsø, Norway; 1998.
- [46] "Stainless Steel Rebar Guidelines for Shipping, Handling, Fabrication and Placement"; SSINA and NiDI; <http://www.ssina.com/publications/index.htm>.
- [47] James, E.; "A brighter future for ageing"; Concrete Engineering; Vol. 6; Nº 2.; 2002; p. 64-67.
- [48] Smith, F.N.; Tullmin, M.; "Using Stainless Steels as Long-Lasting Rebar Material"; Materials Performance; Vol. 38; Nº 5; 1999; p. 72.
- [49] Bourgin, C.; Chauveau, E.; Demelin, B.; "Stainless steel rebar: the choice of service life"; 5th European Stainless Steel Science and Market Congress; CSIC; Spain; September 2005.
- [50] Neff, L. Theodore; "Predicting the Life Cycle Costs of Structures Based on Accelerated Corrosion Testing: A Framework for Incorporating Reliability Concepts"; TRB Transportation Research Circular 498.
- [51] Nelson, F.J.; "Stainless Steel for Bridges"; Bridge Section of Oregon Department of Transportation Report.
- [52] Favre, R.; Charif H.; "Basic Model and Simplified Calculations of Deformations according to the CEB-FIP Model Code 1990"; ACI Structural Journal; Title nº. S18.
- [53] Rasheed, H.; Nayal, R.; Melhem, H.; "Response prediction of concrete beams reinforced with FRP bars"; Science Direct, Composite Structures 65; 2004; p. 193-204.
- [54] García-Alonso, M.C. et al; "Corrosion behaviour of new stainless reinforcing bars"; Science Direct; Cement and Concrete Research, 2007.
- [55] Cares "Standard, Codes and Regulations"; Guide to Reinforcing Steels, Part 7.
- [56] Cares "Standard, Codes and Regulations"; Guide to Reinforcing Steels, Part 10.
- [57] <http://www.imoa.info/FileLib/StainlessSteelReinforcement.pdf>

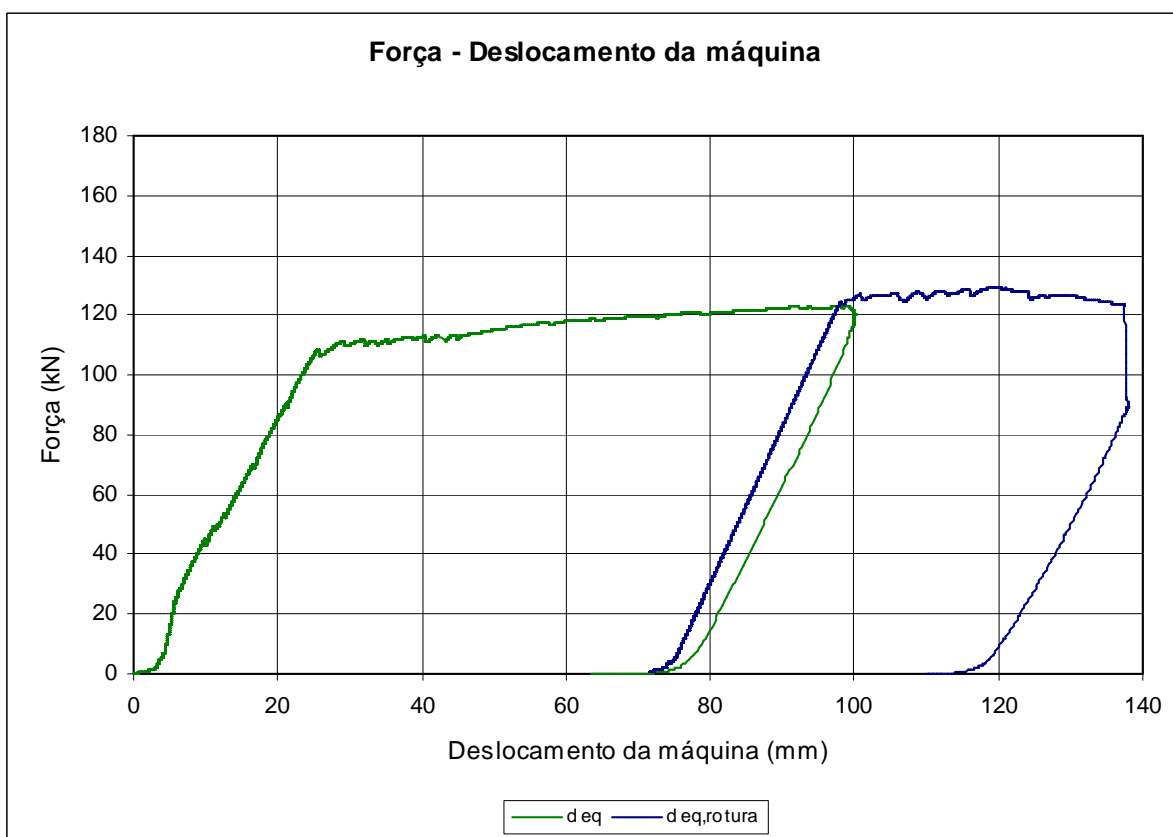
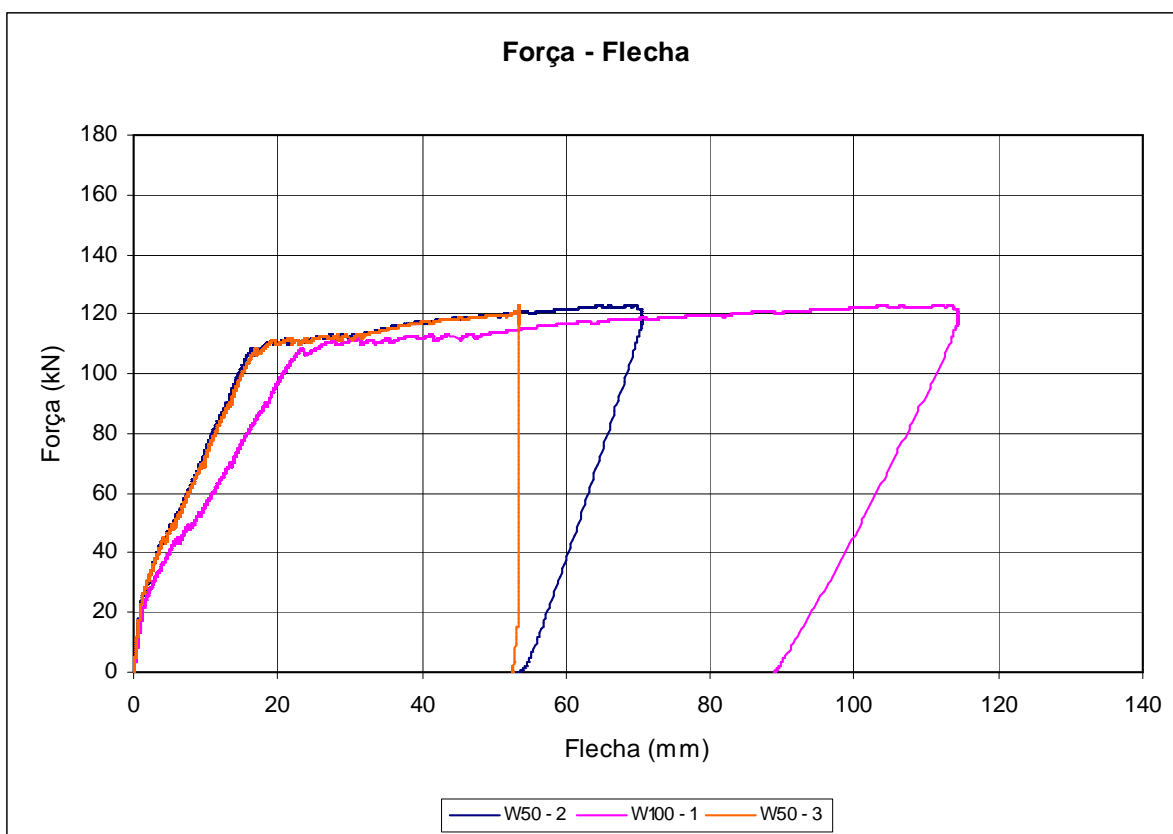
- [58] TC 19 WI EC019025:2006 - Steel for the reinforcement of concrete - Corrosion resistant reinforcing steels.
- [59] Decreto-Lei n.º 390/2007 de 10 de Dezembro.
- [60] Geromel, M.; Mazzarella, O.; “Experimental and analytical assessment of the behavior of stainless steel reinforced concrete beams”; *Materials and Structures* 38; March 2005; p. 211-218.

Anexo A - Resultados obtidos nos ensaios dos modelos de viga

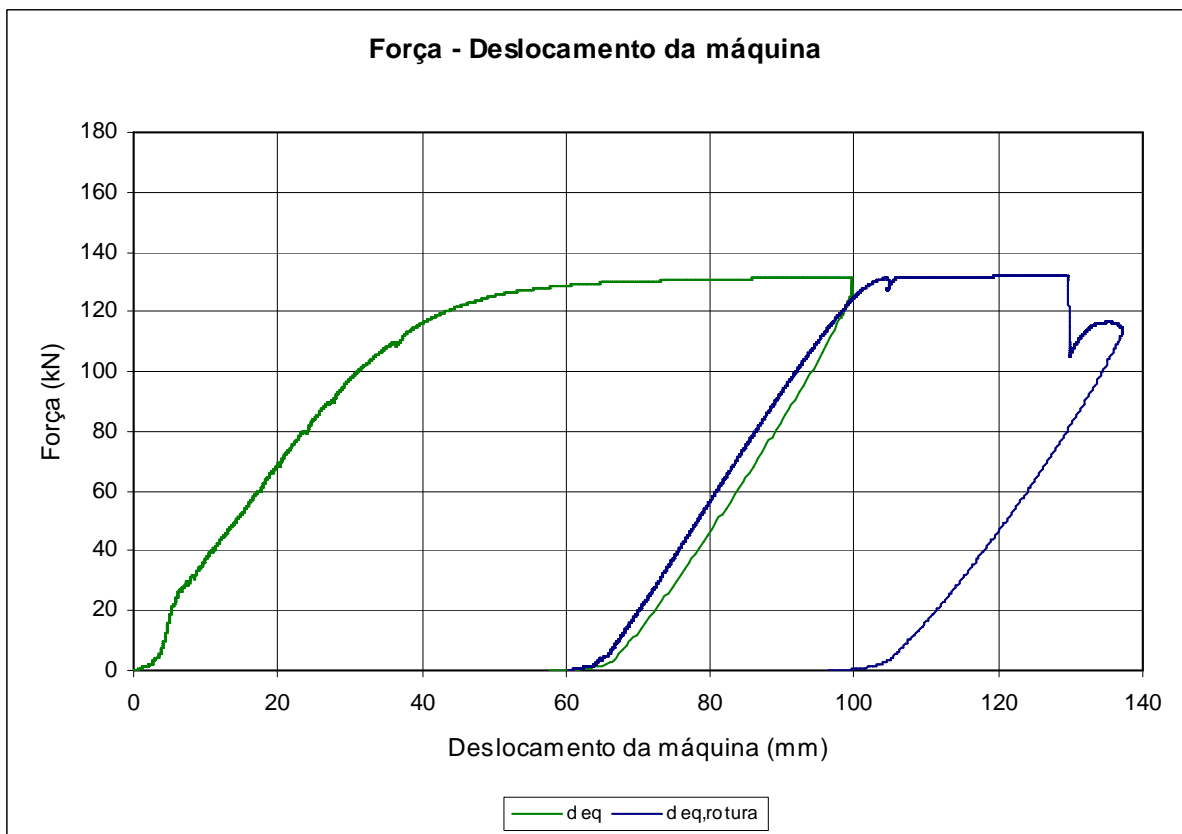
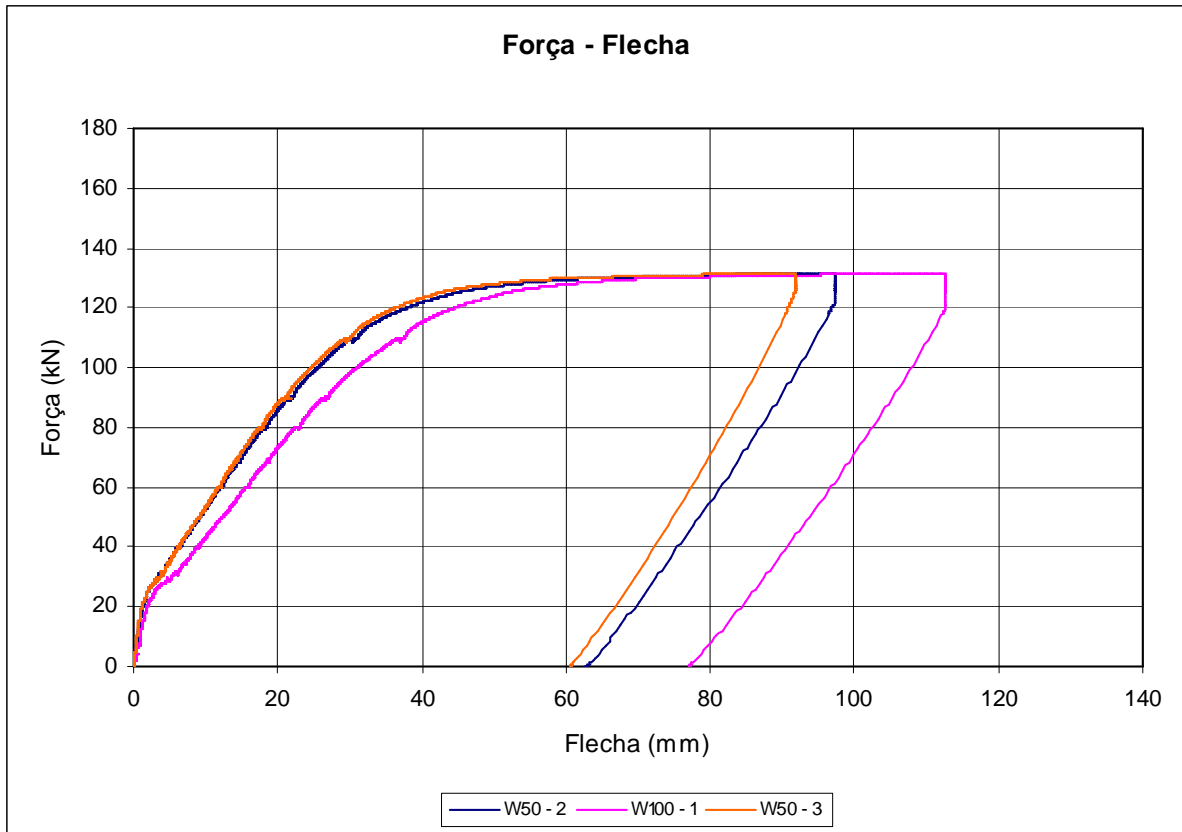
Neste anexo apresentam-se para cada modelo os resultados obtidos em termos de:

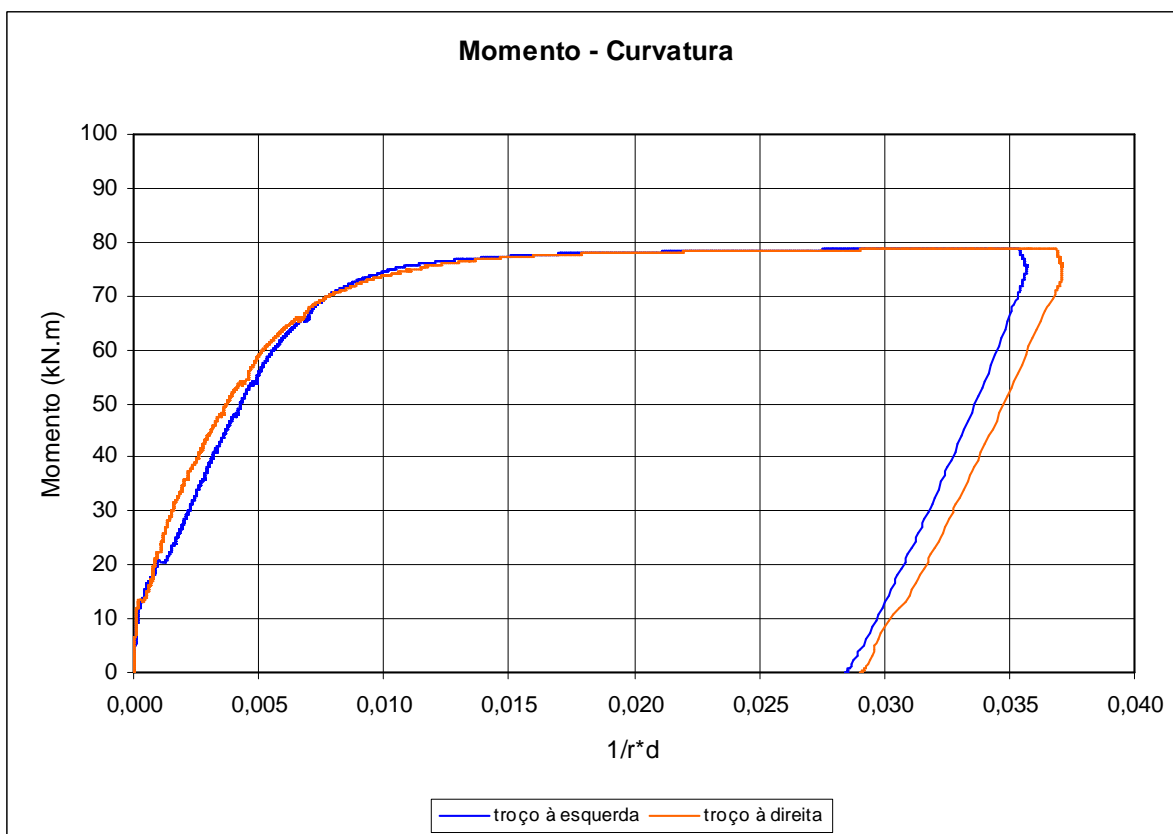
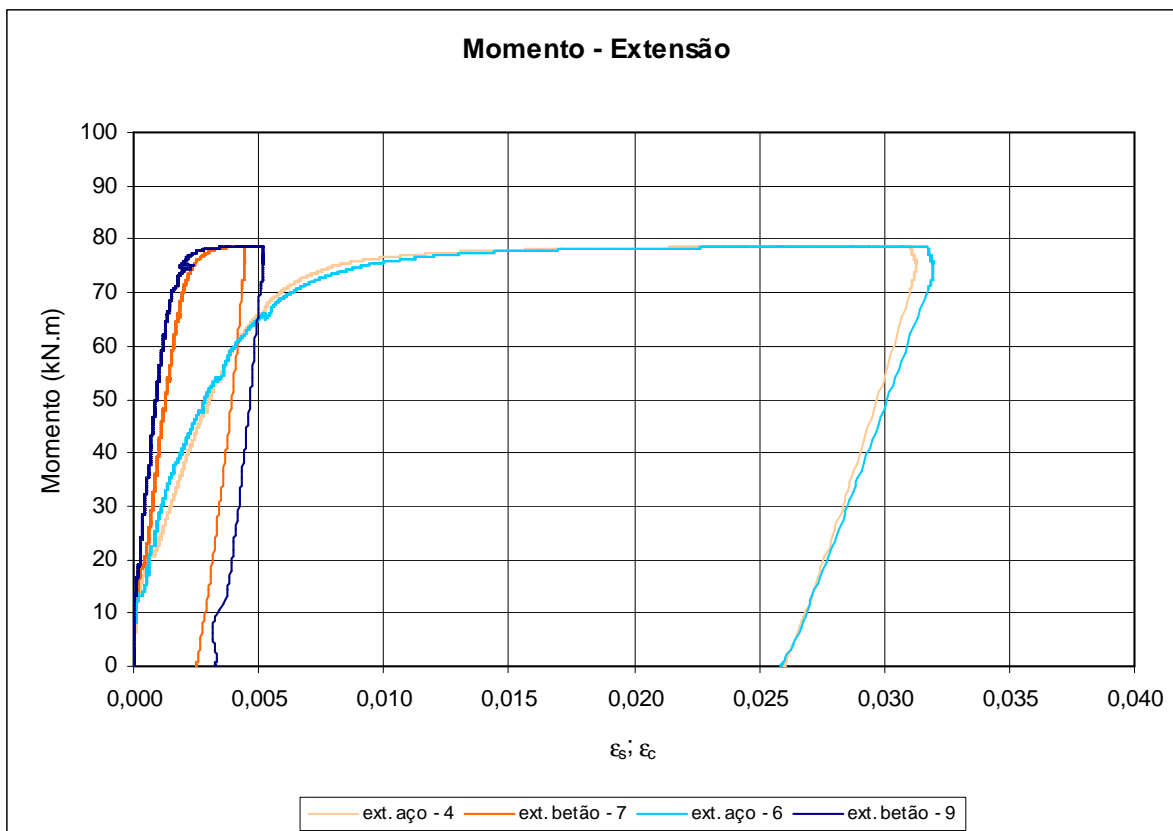
- Diagramas força - flechas;
- Diagramas força - deslocamento da máquina;
- Diagramas momento - extensão no betão e extensão na armadura;
- Diagramas momento - curvatura.

Viga A500_C35_d12

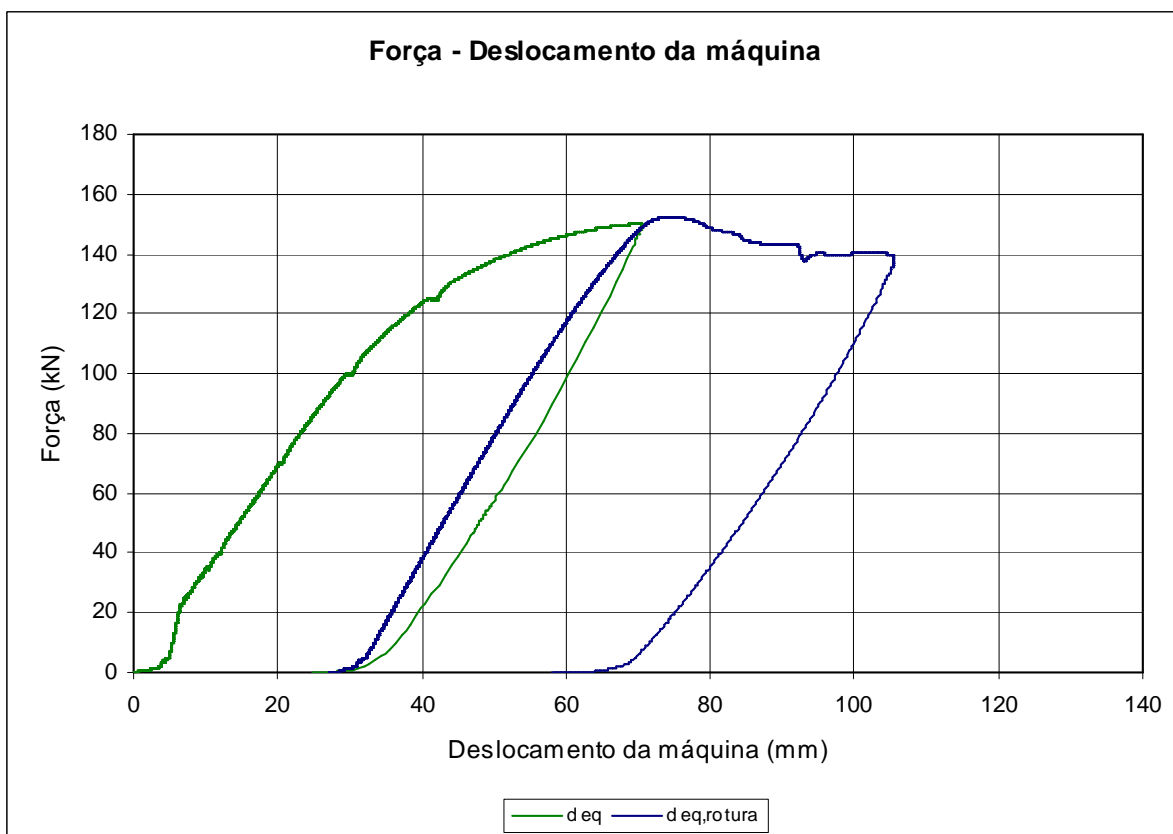
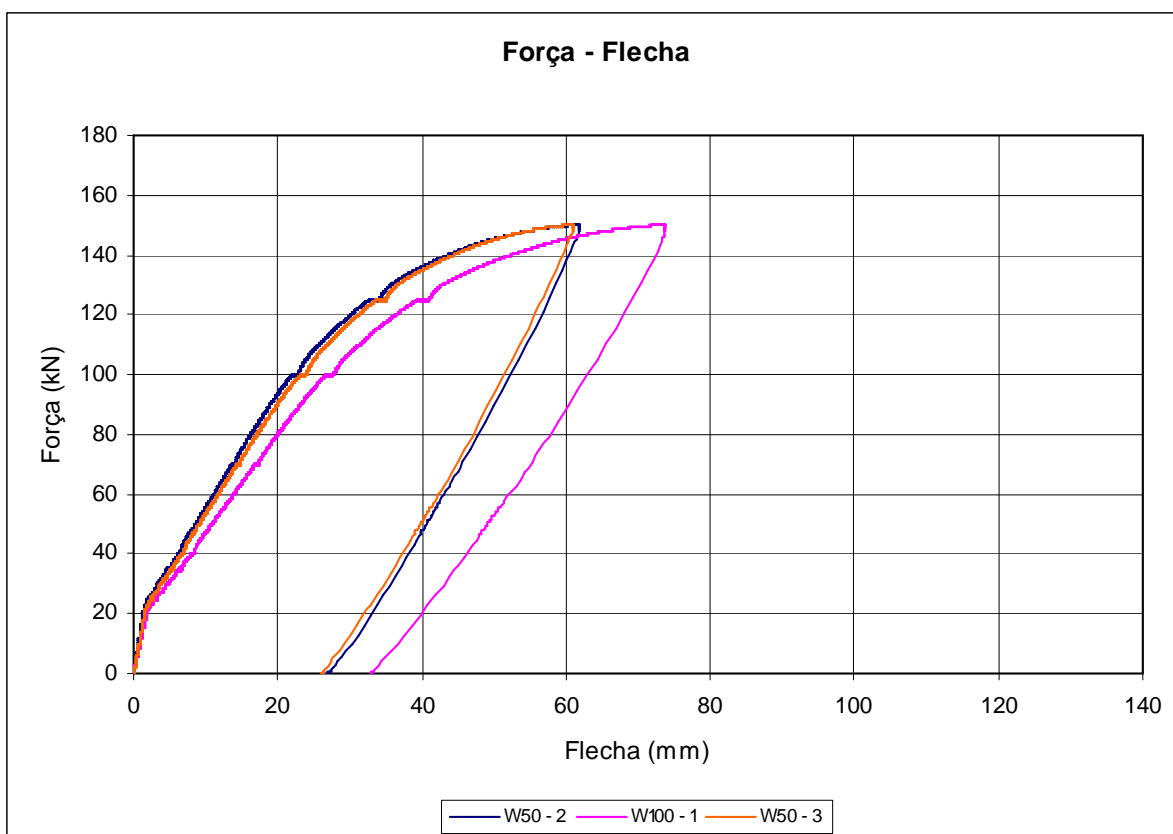


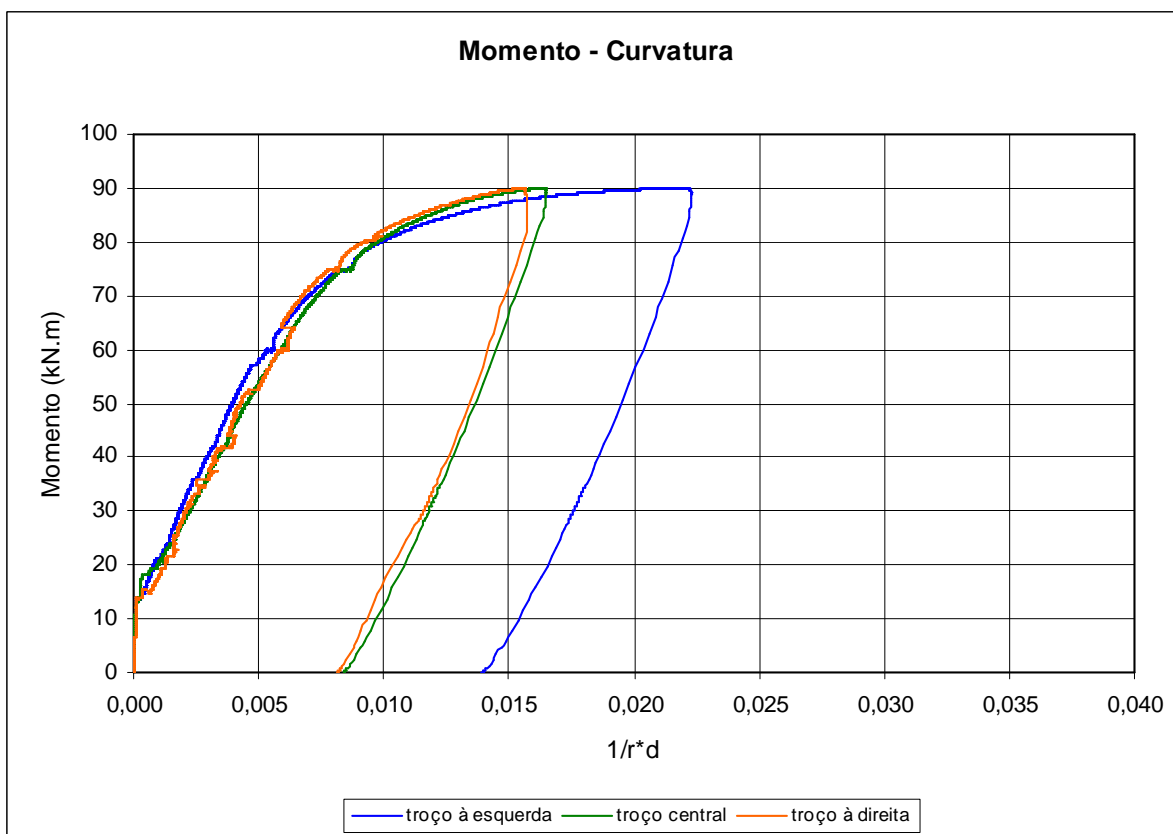
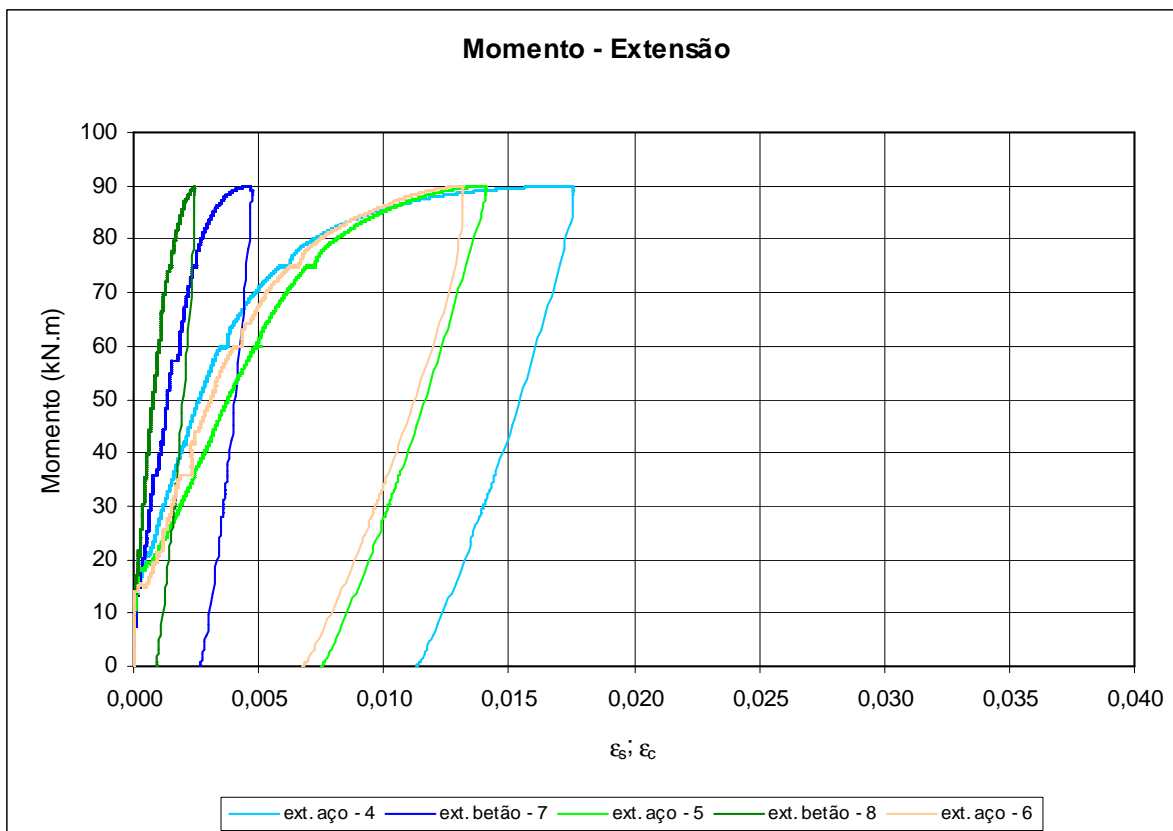
Viga AISI316_C35_d12



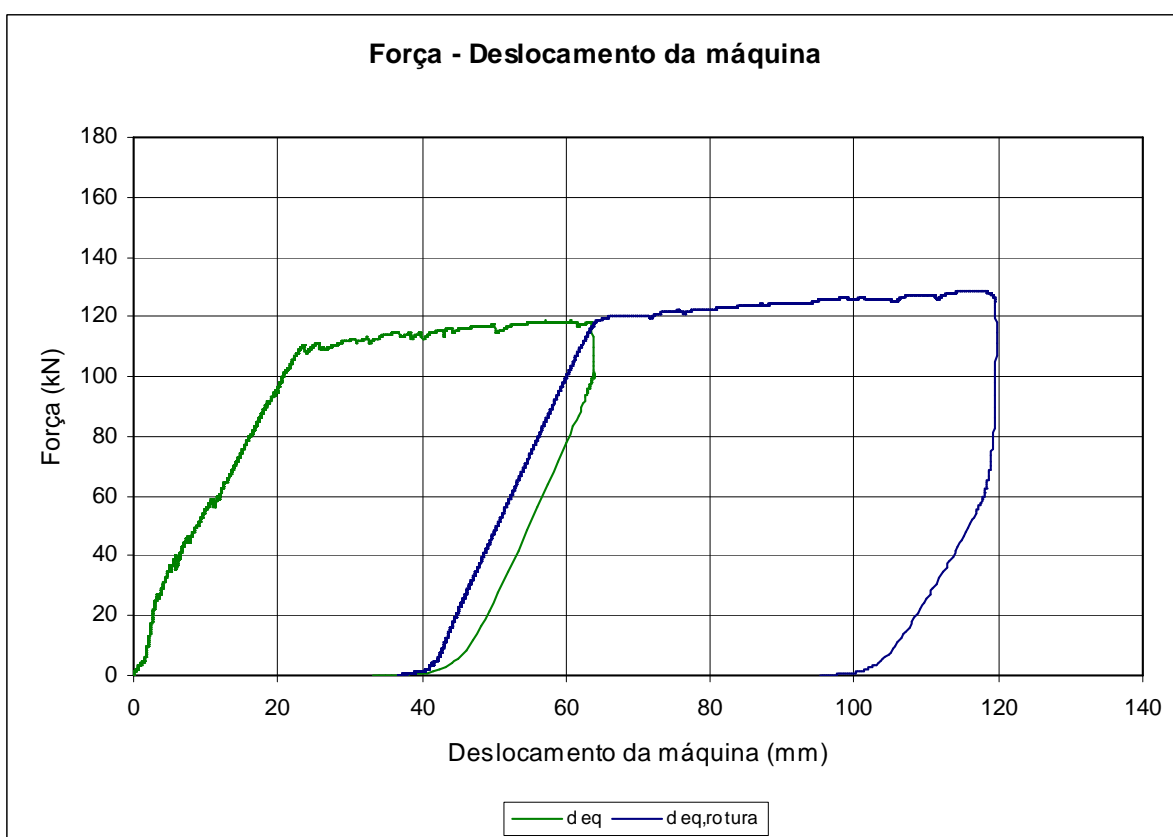
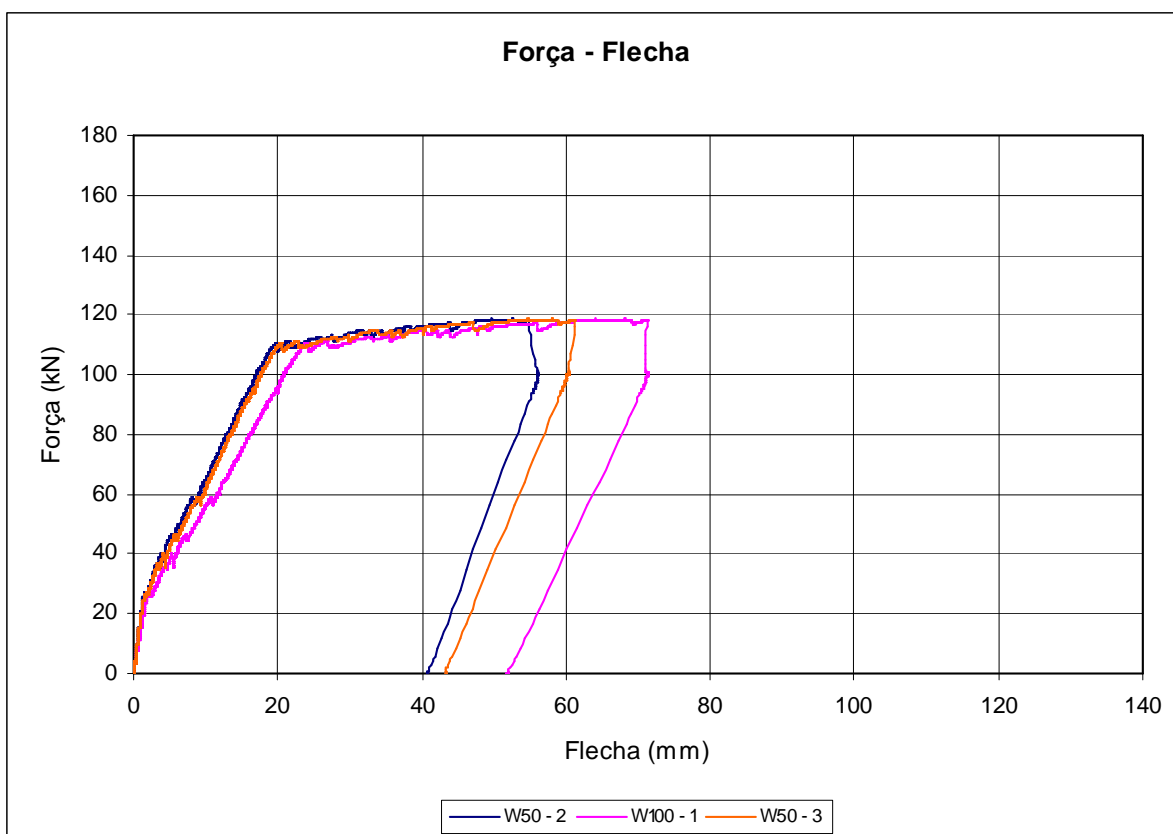


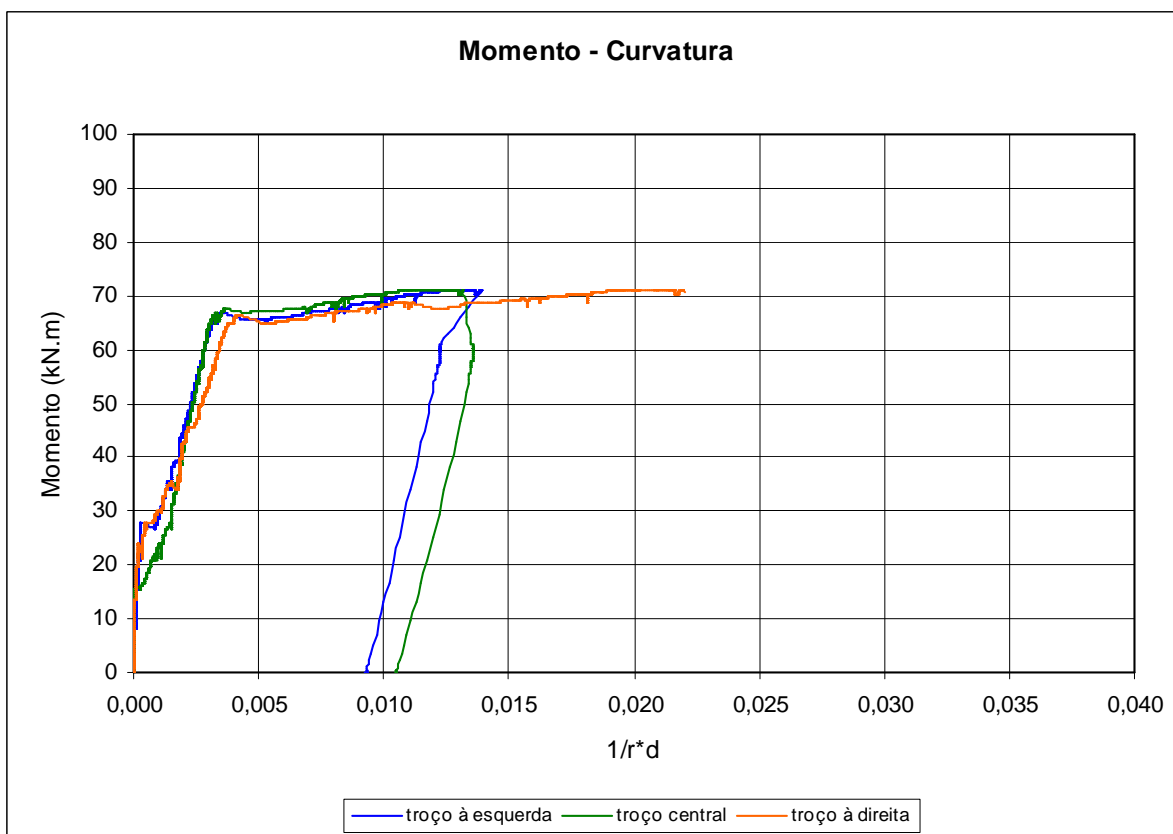
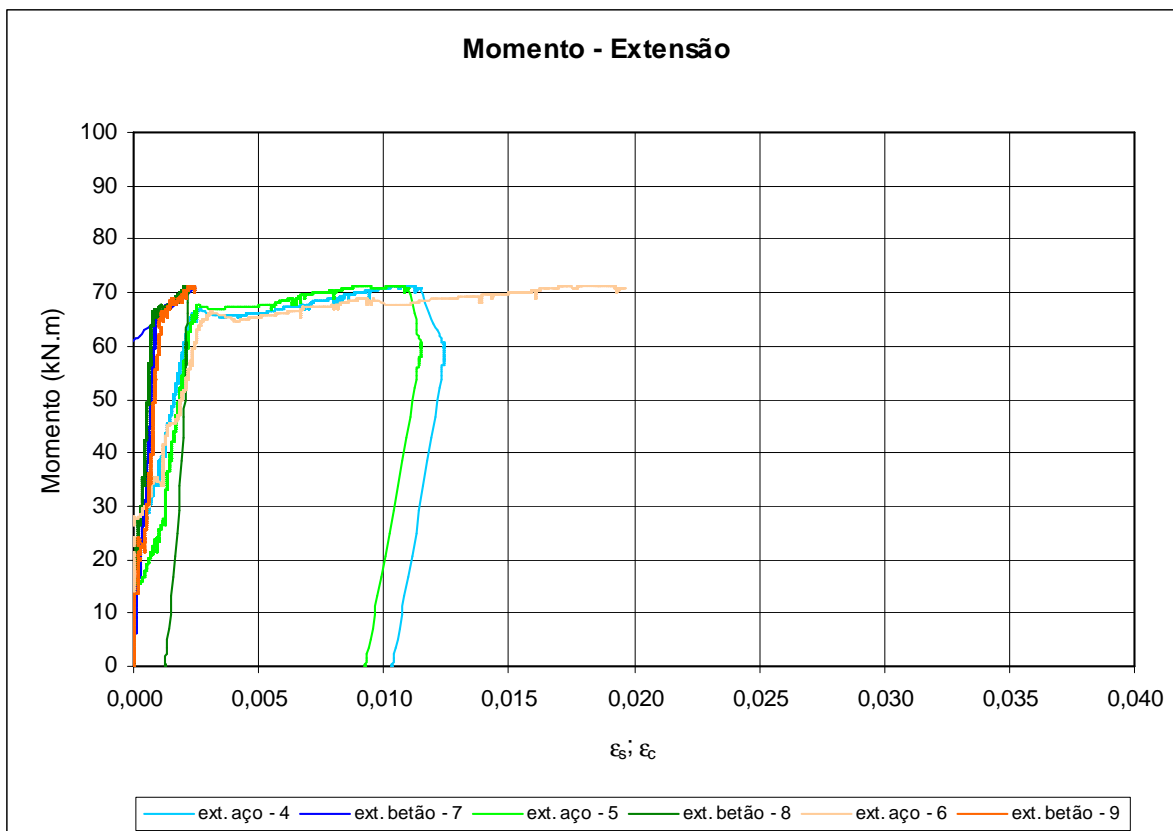
Viga HSS1_C35_d12



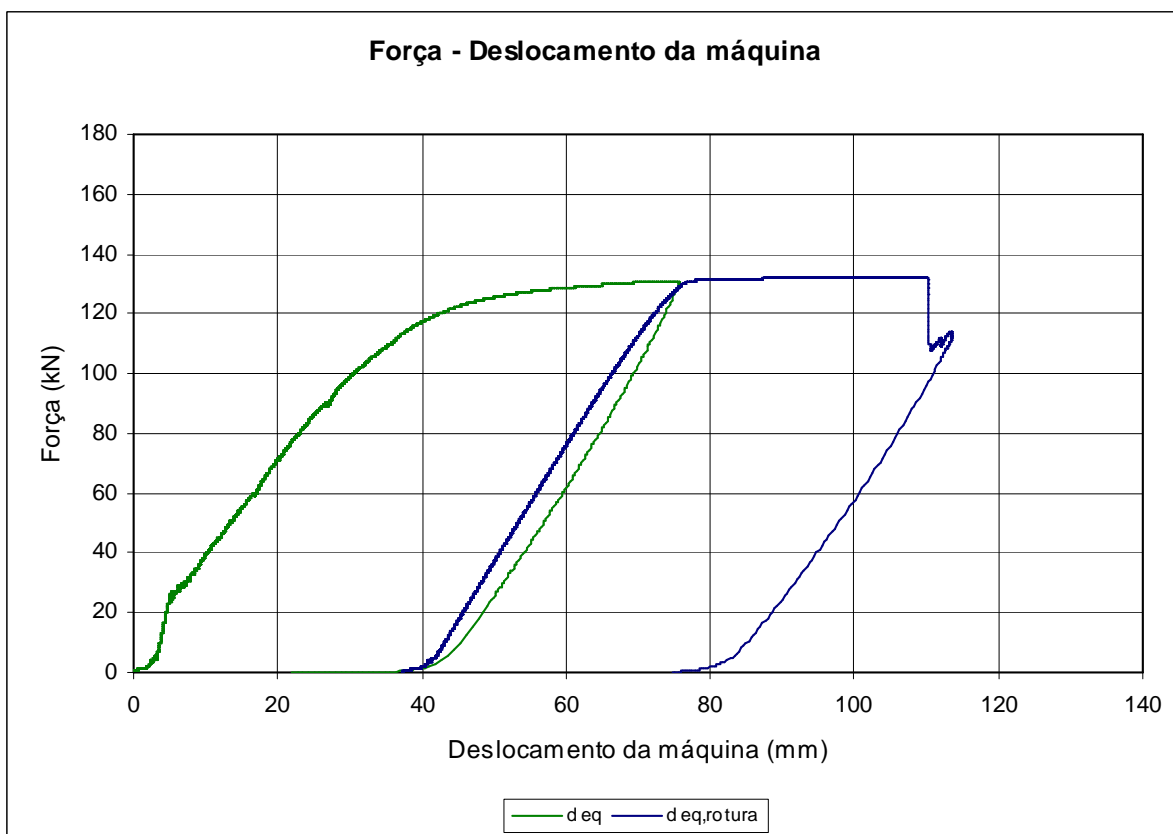
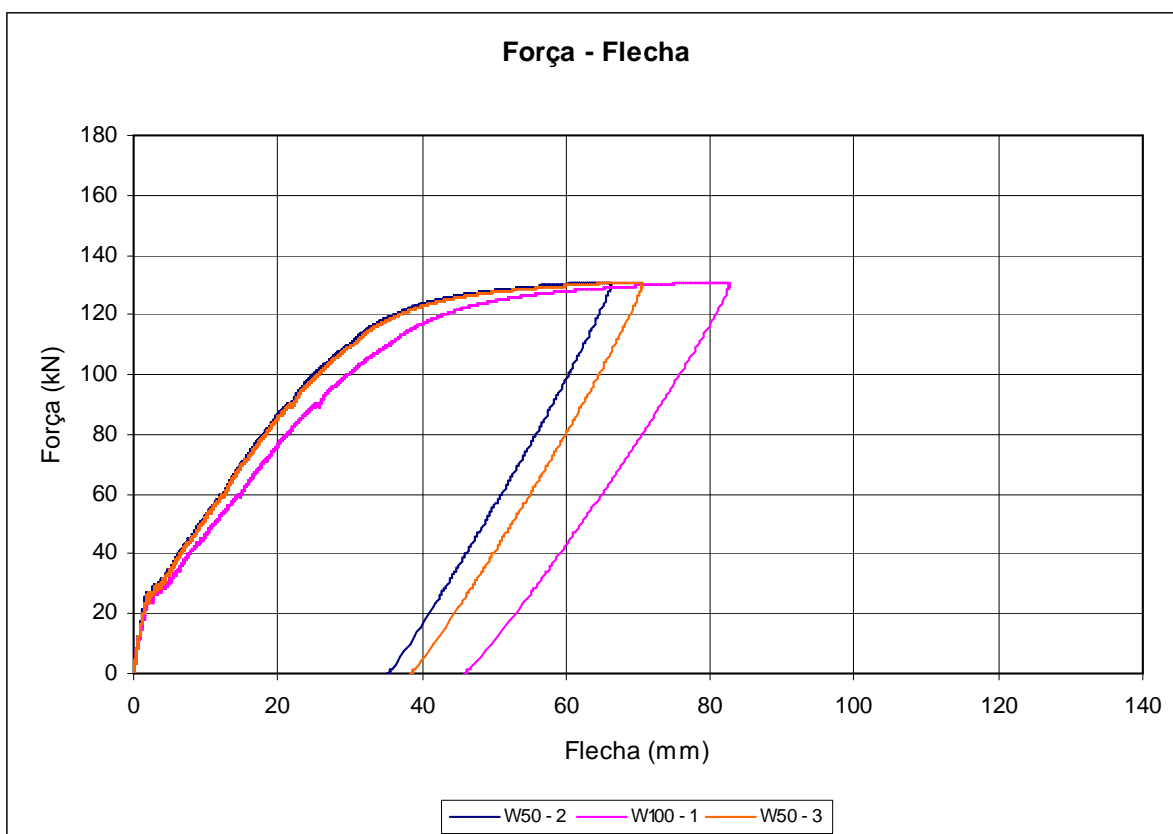


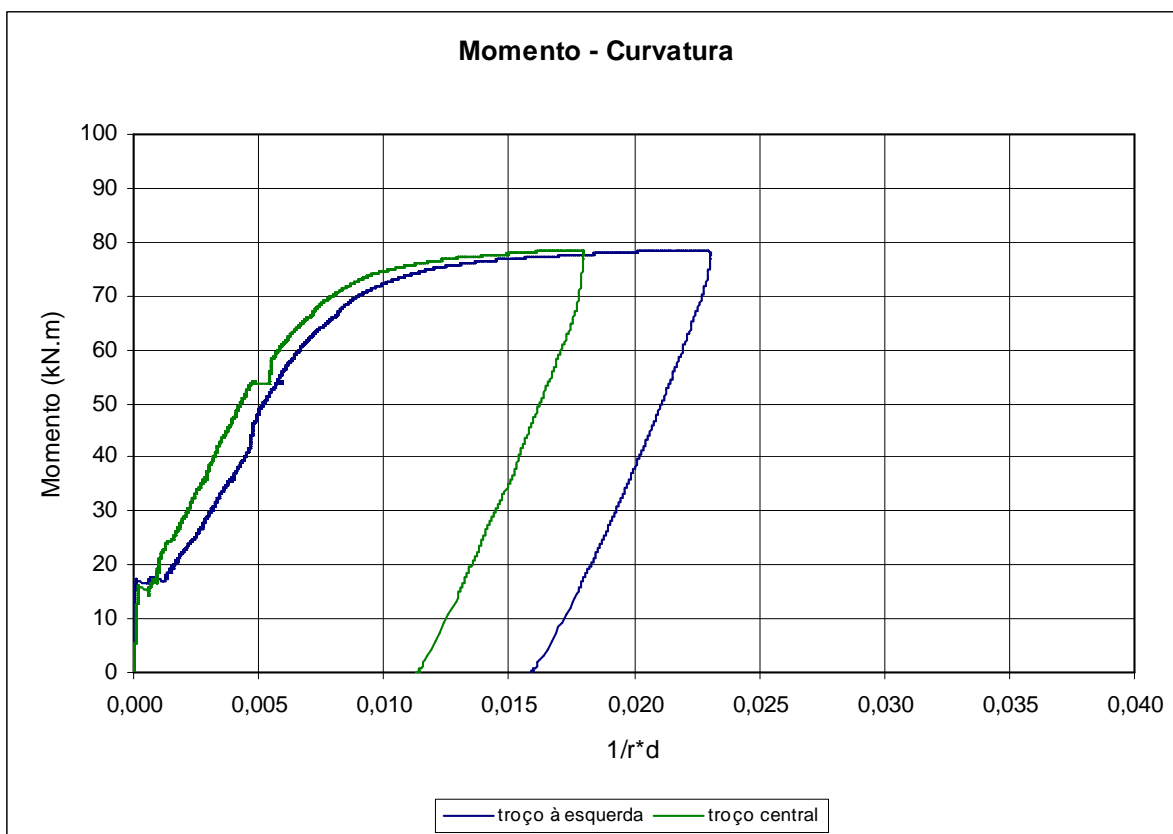
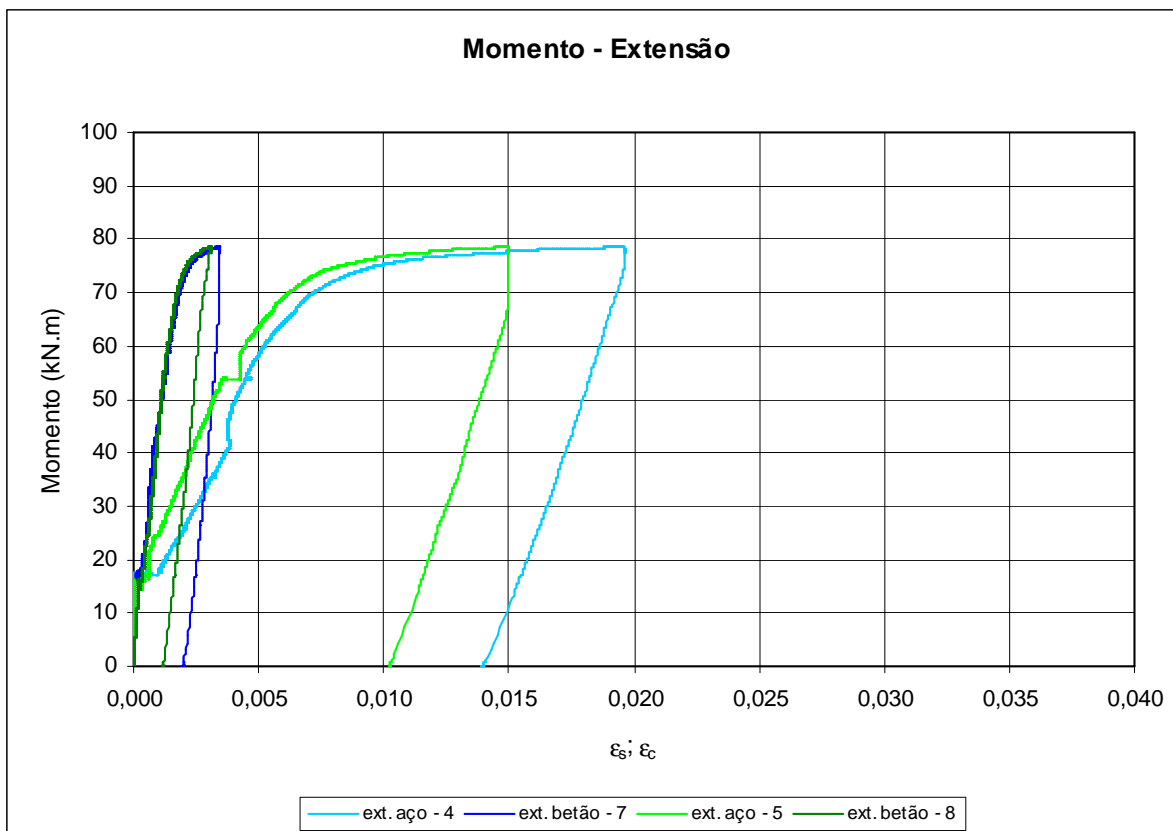
Viga A500_C60_d12



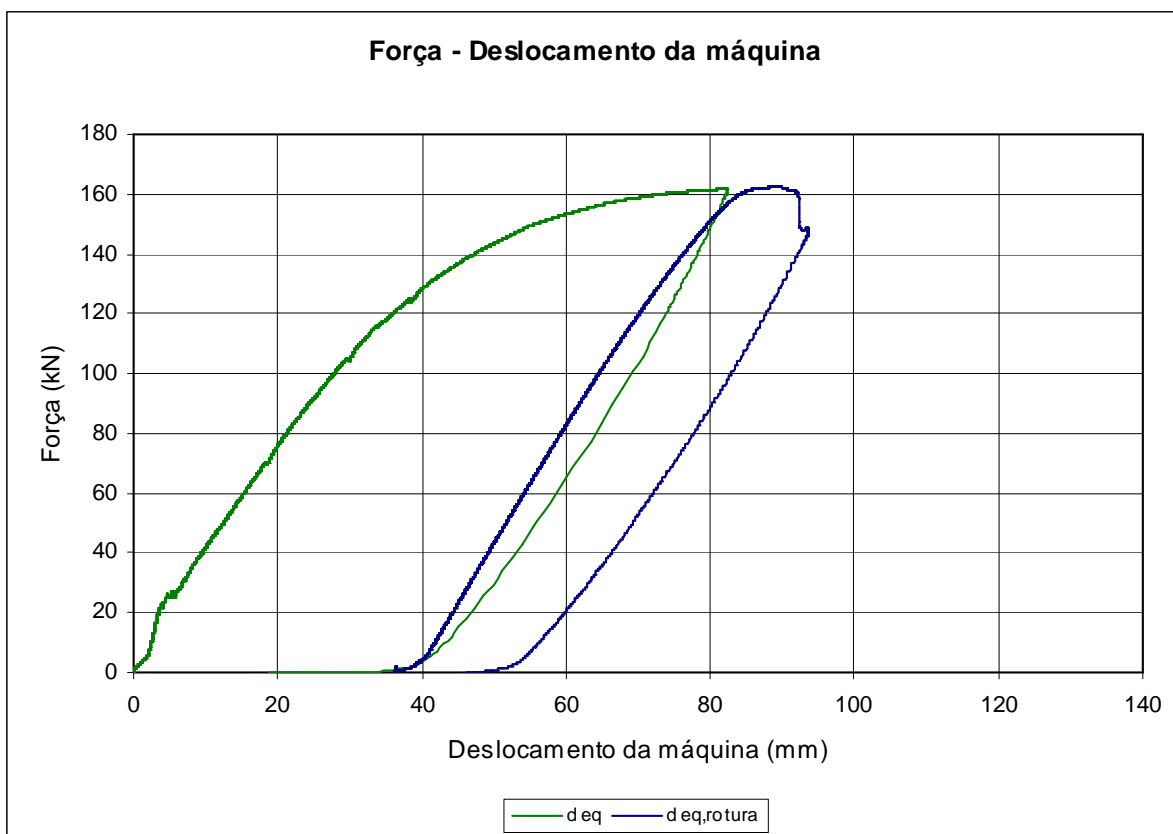
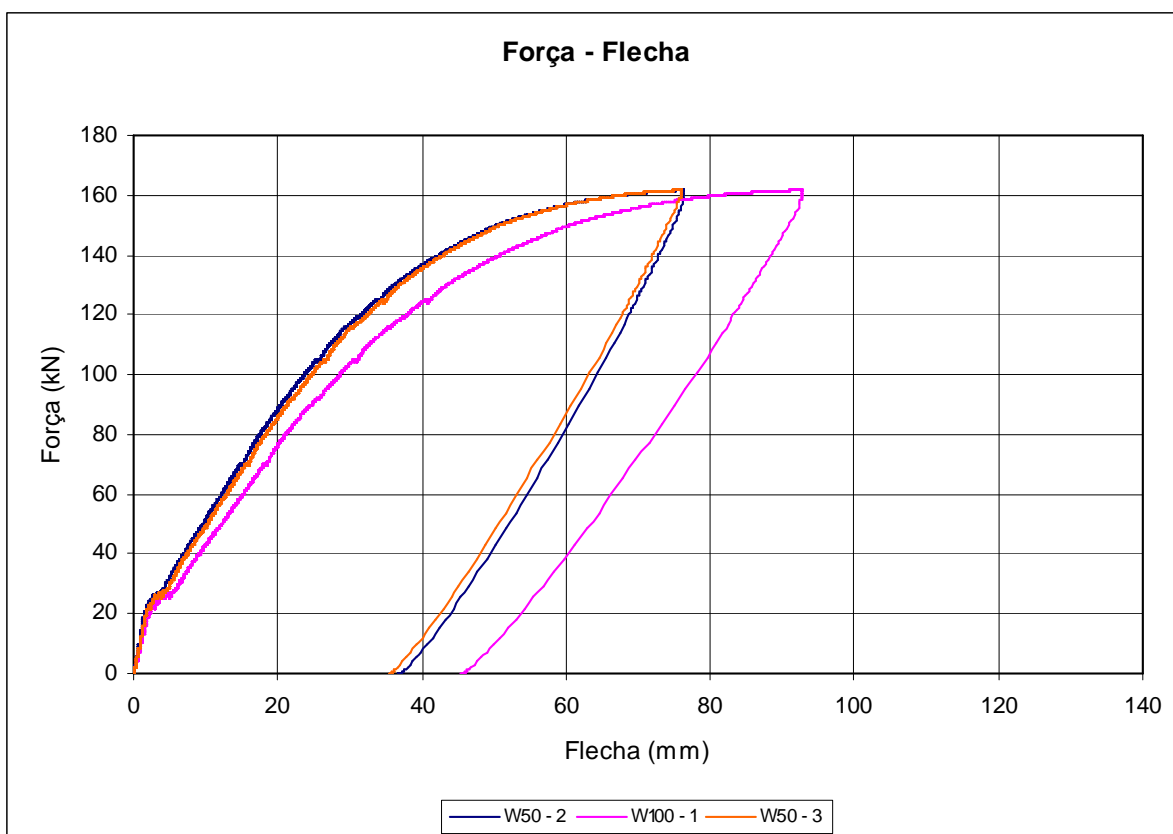


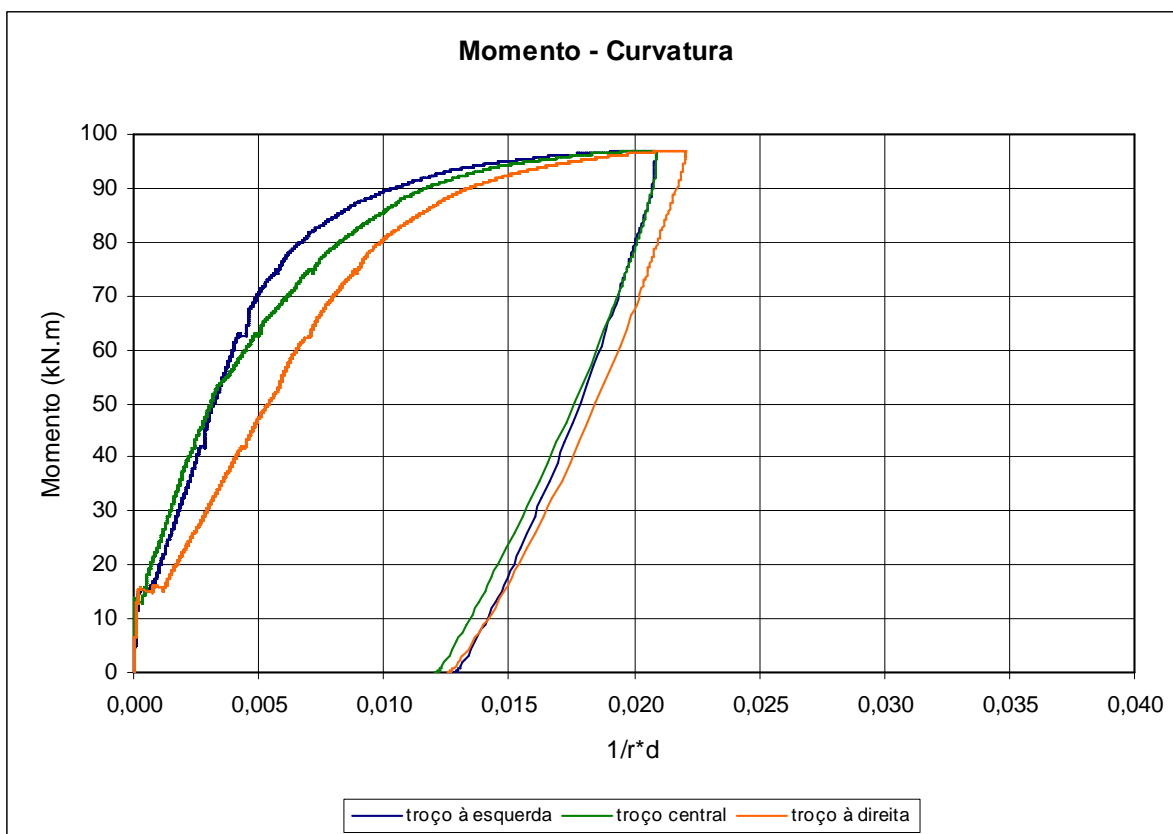
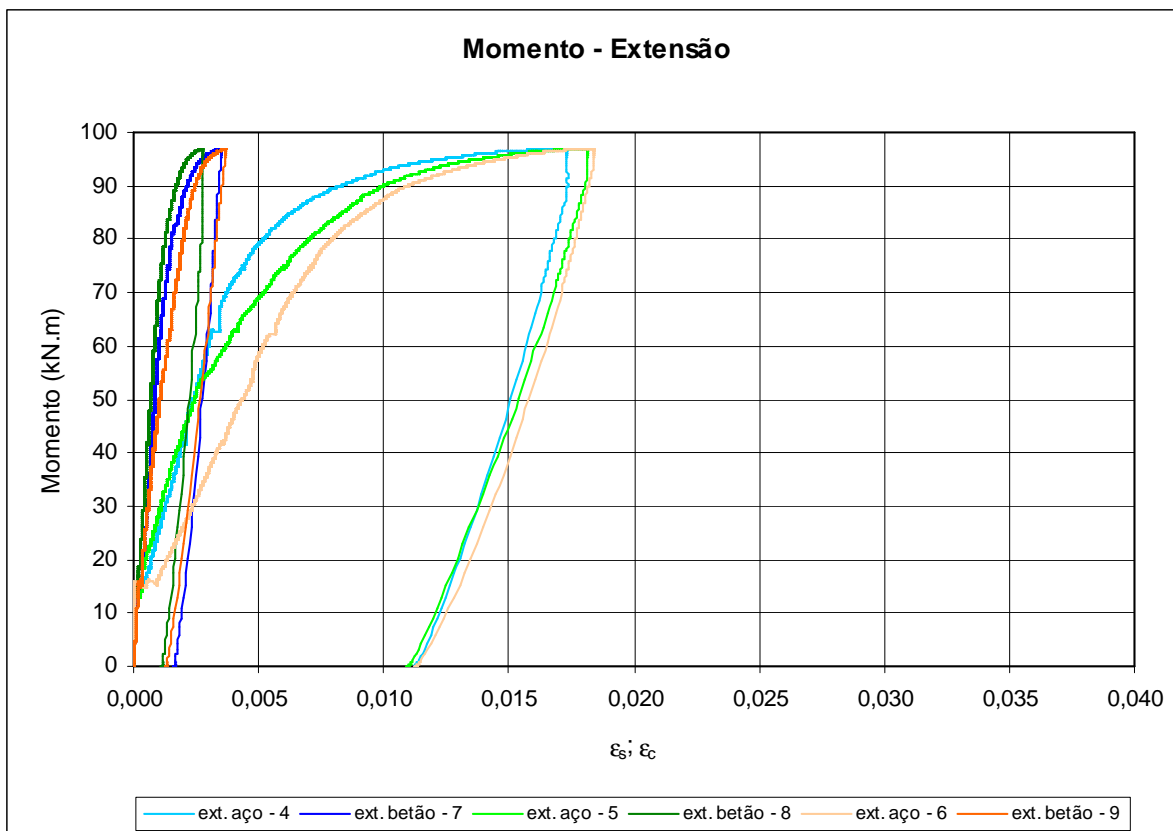
Viga AISI316_C60_d12



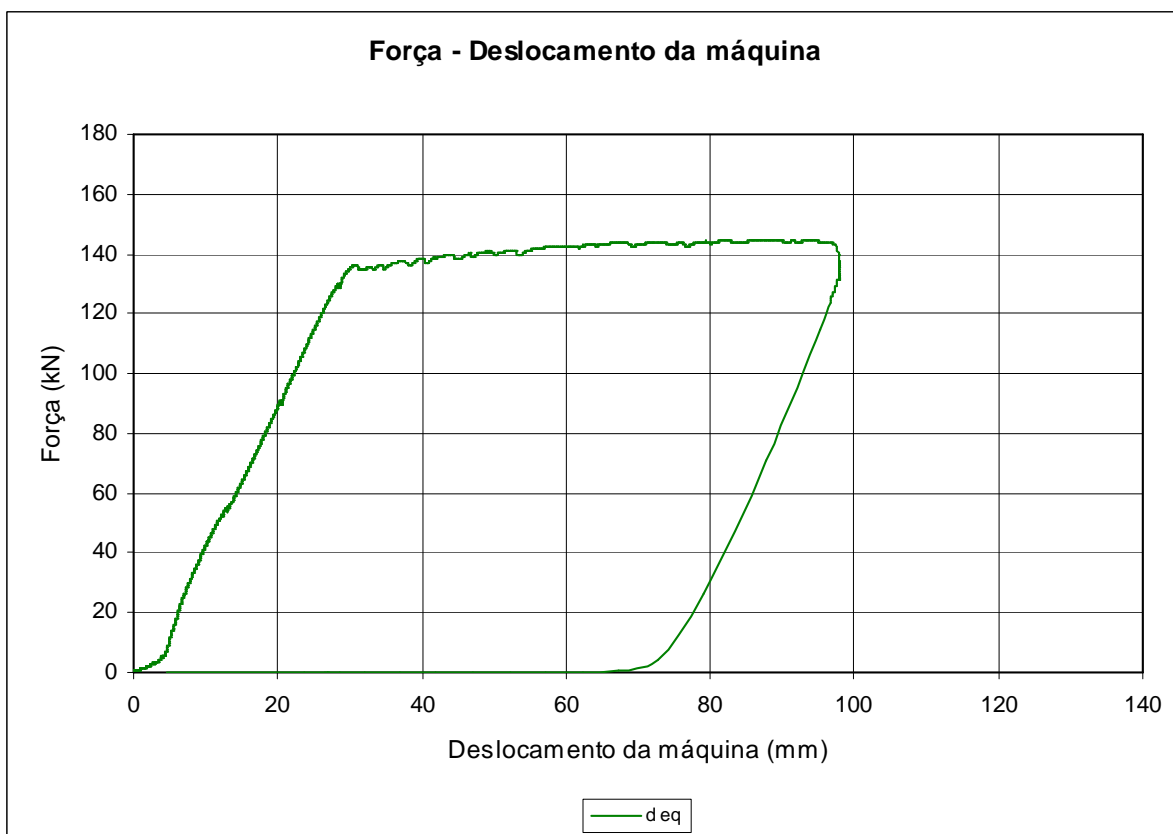
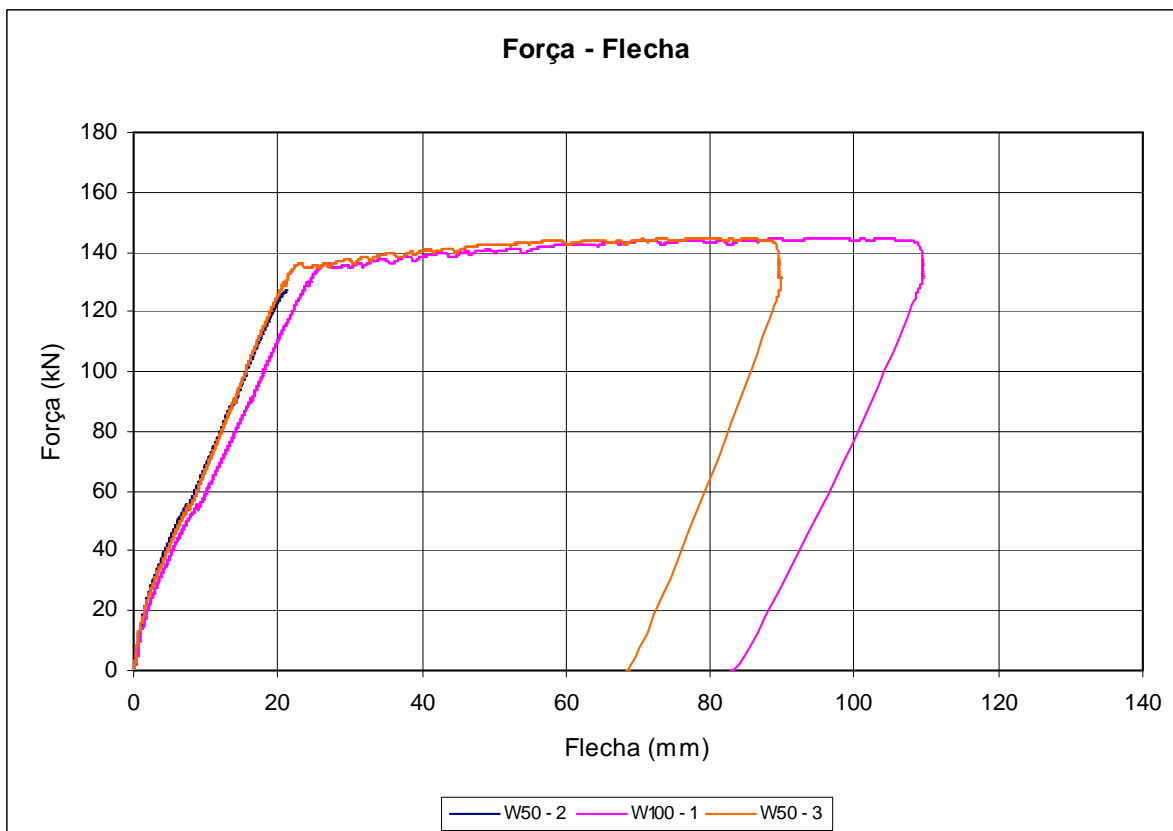


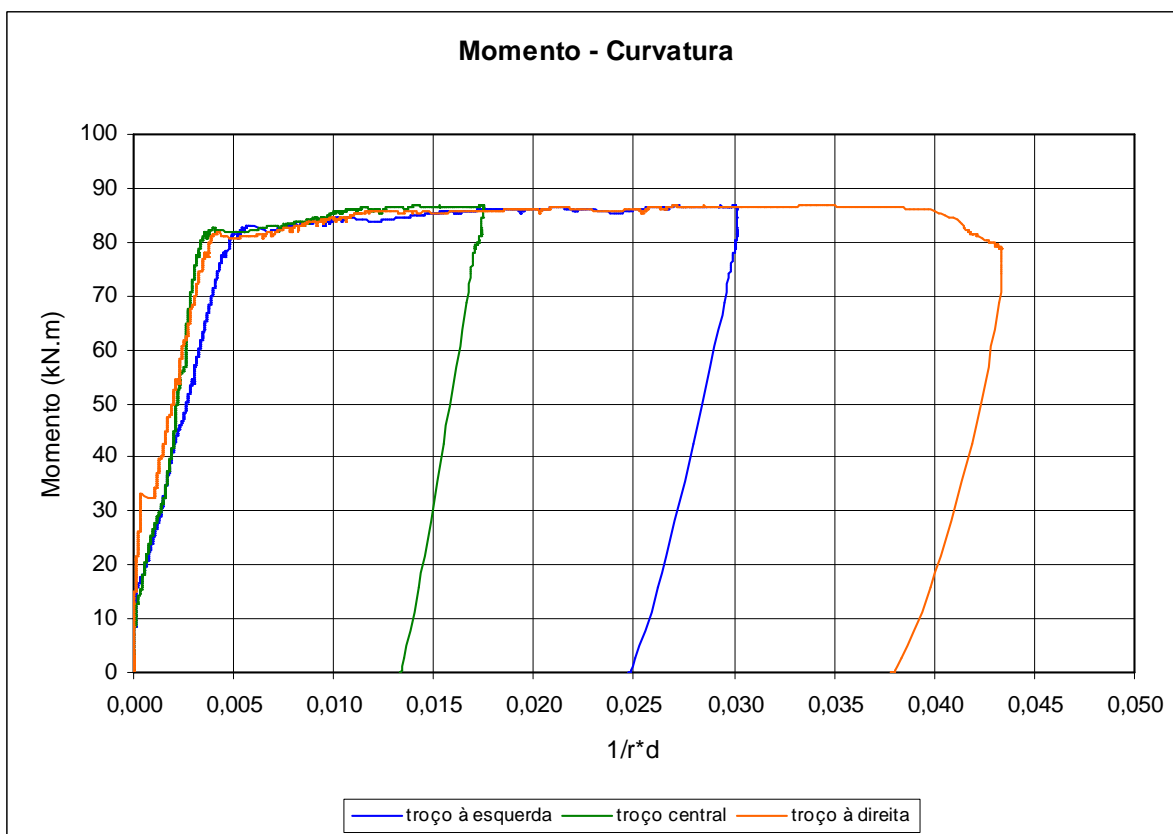
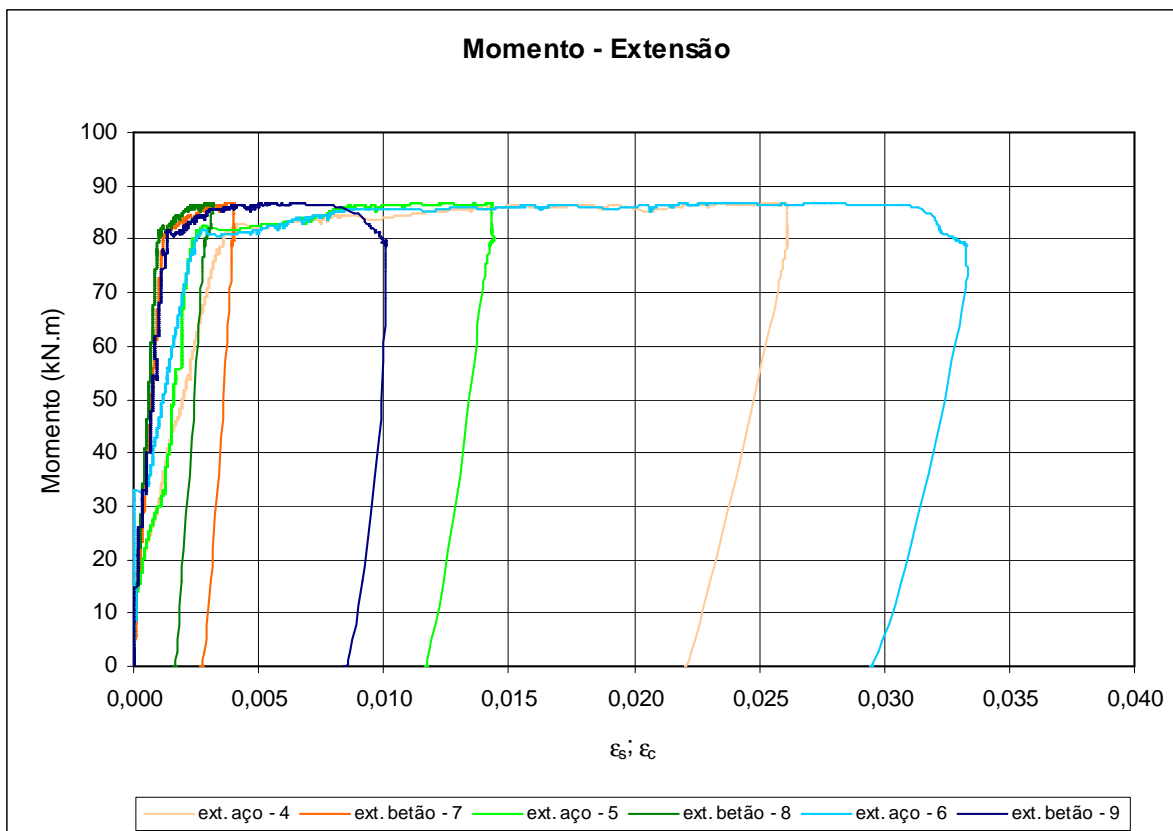
Viga HSS1_C60_d12



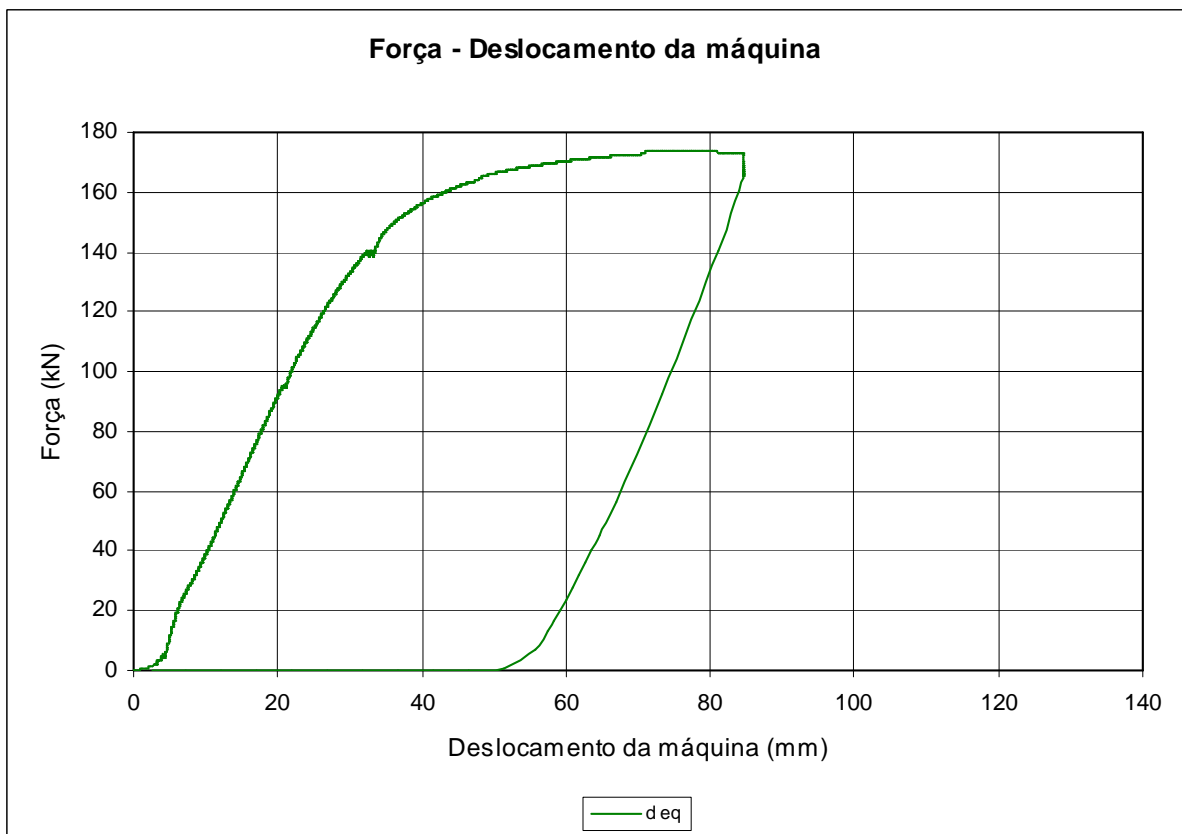
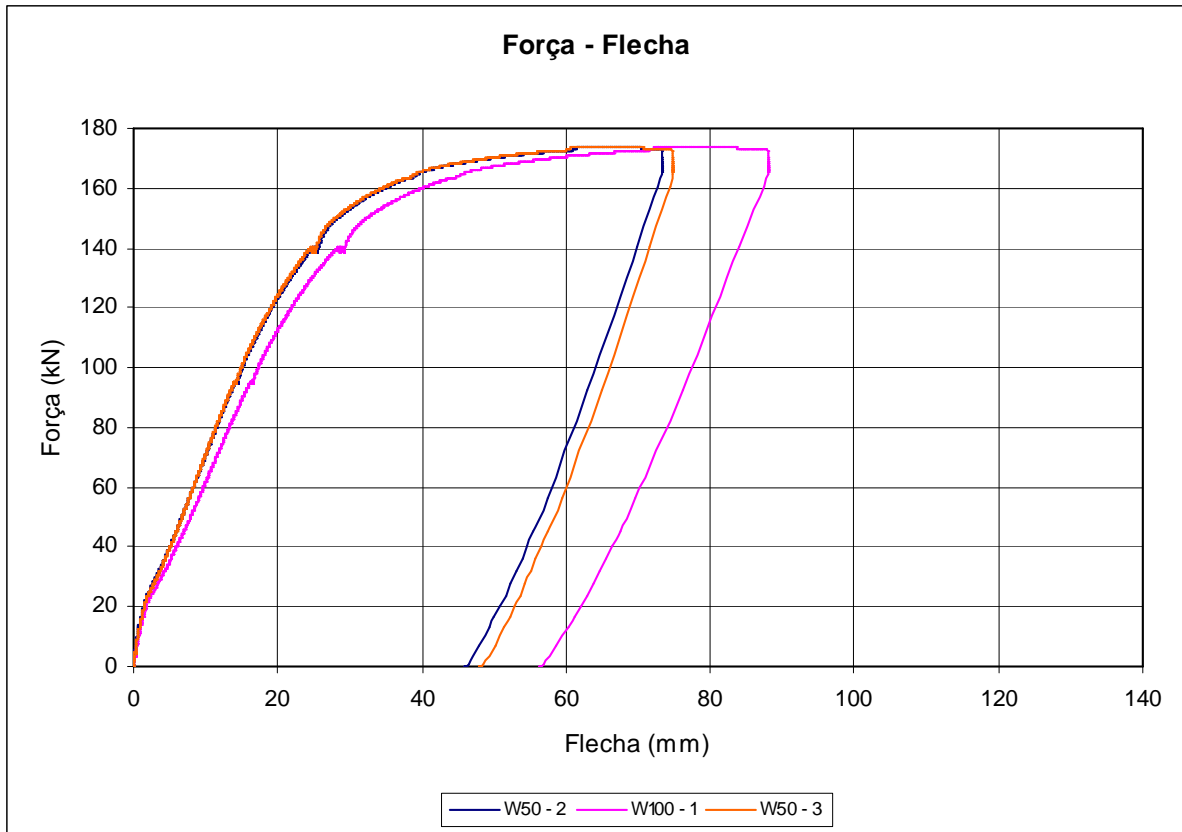


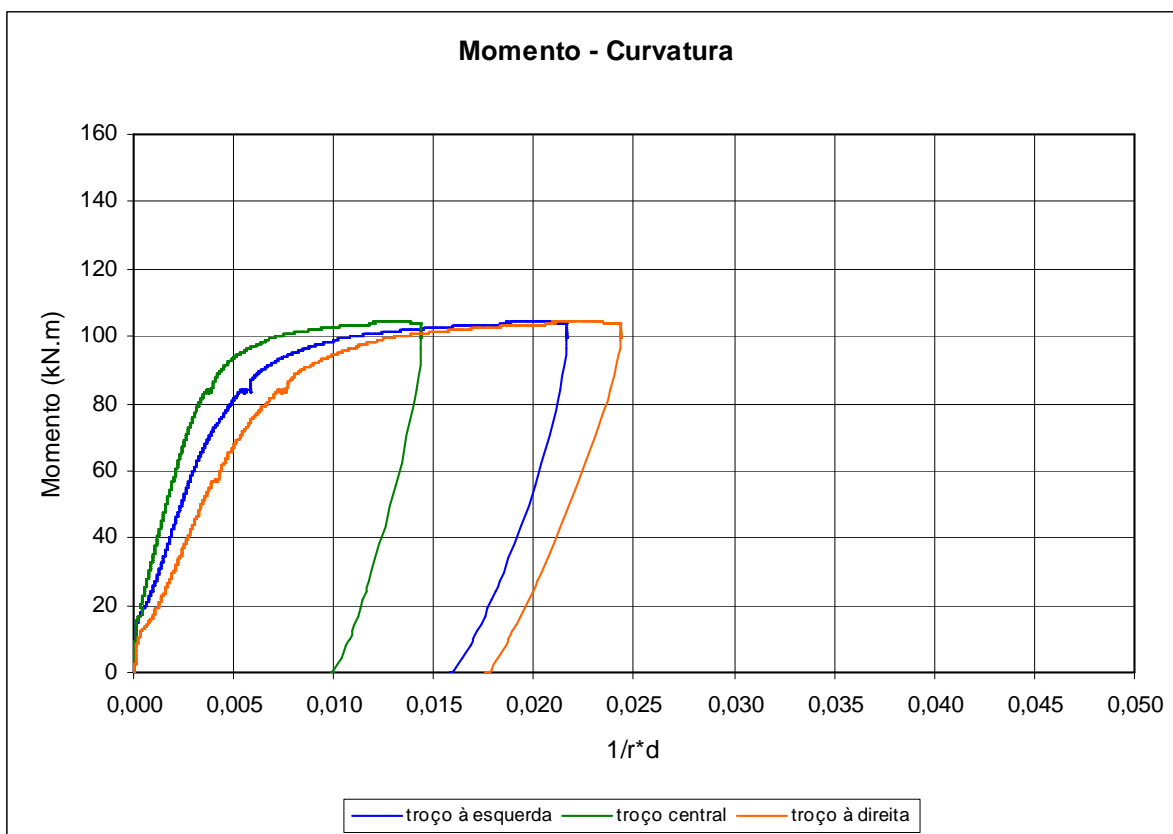
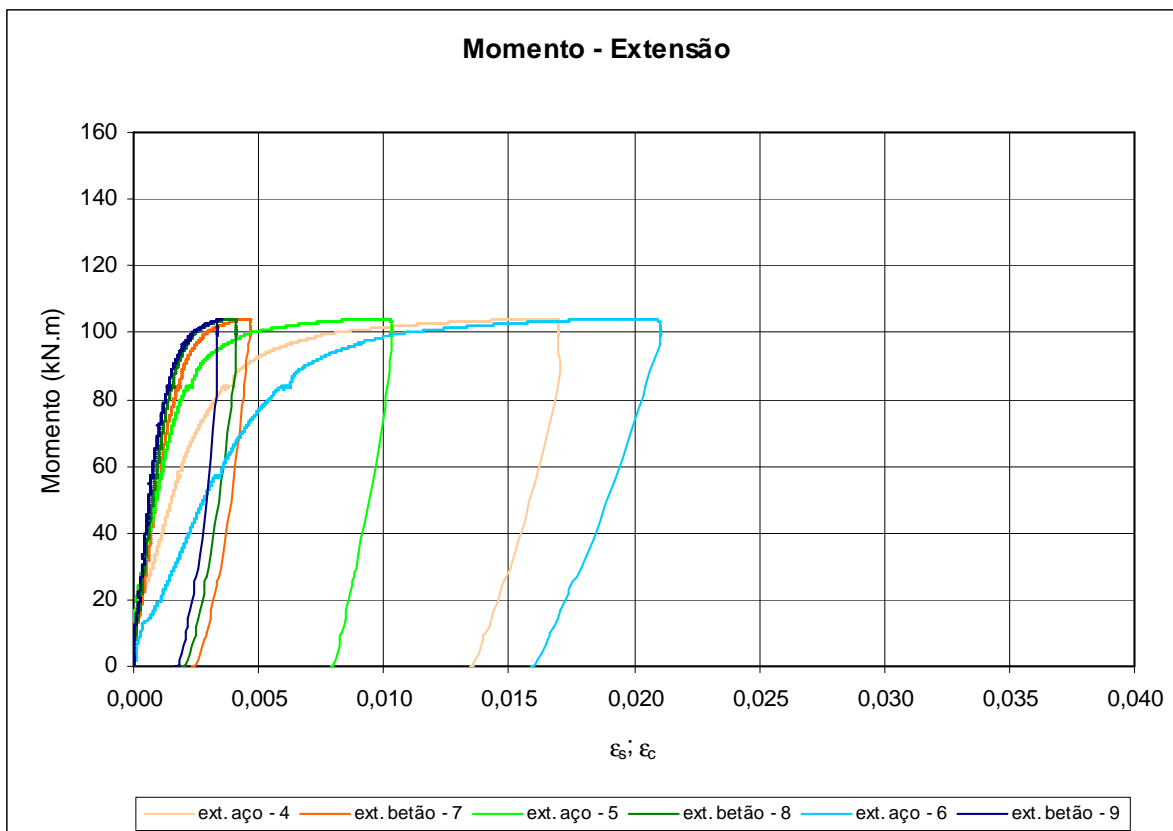
Viga A500_C35_d16



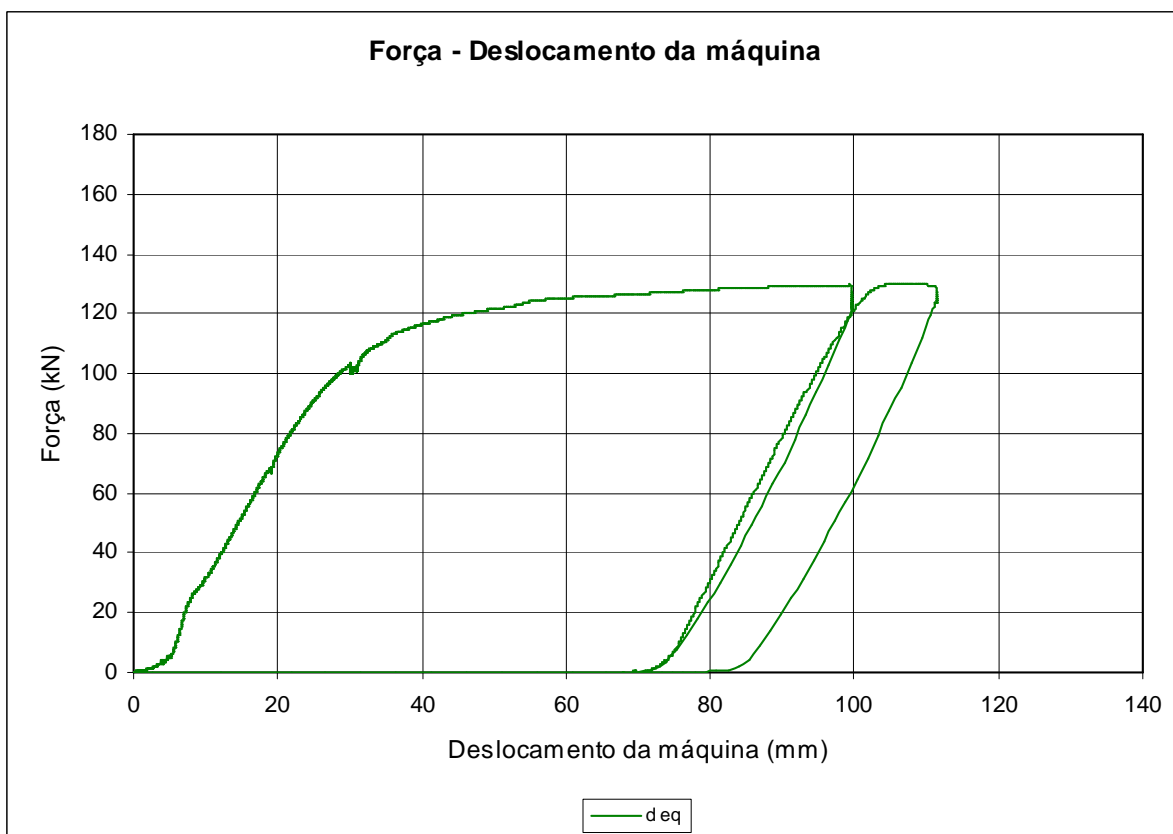
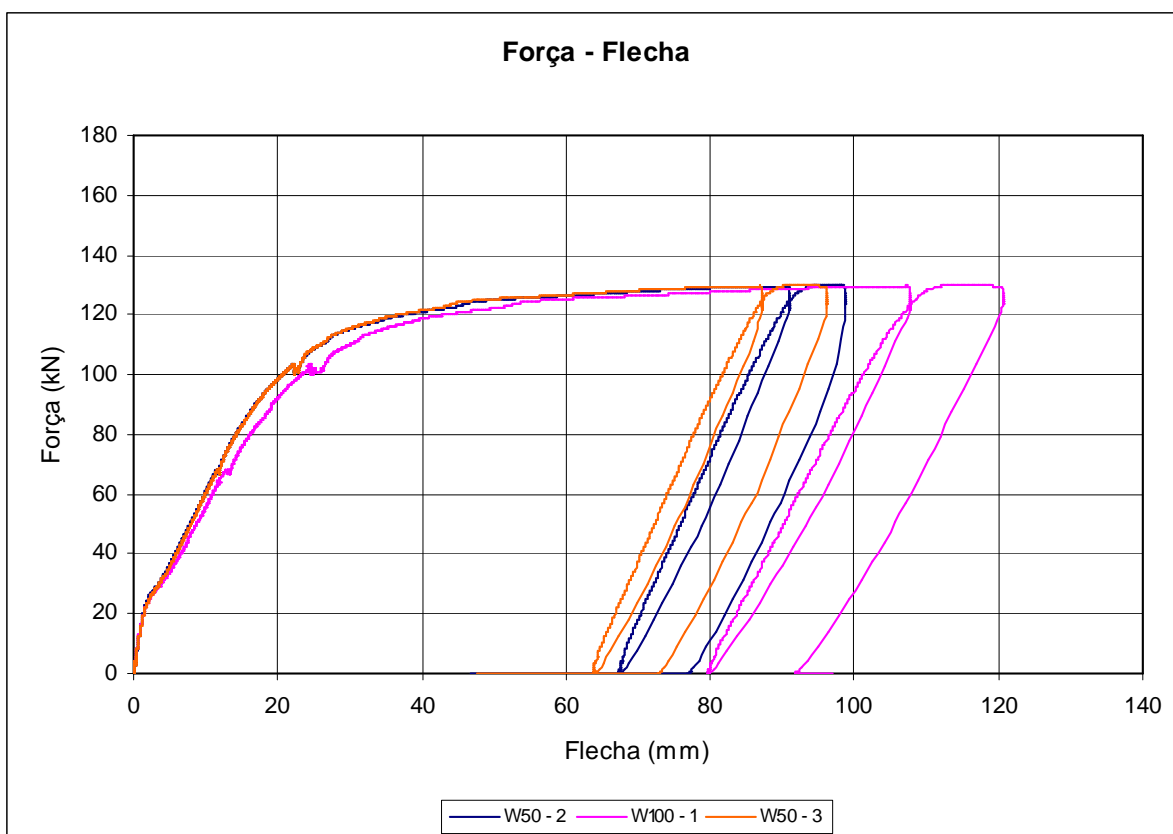


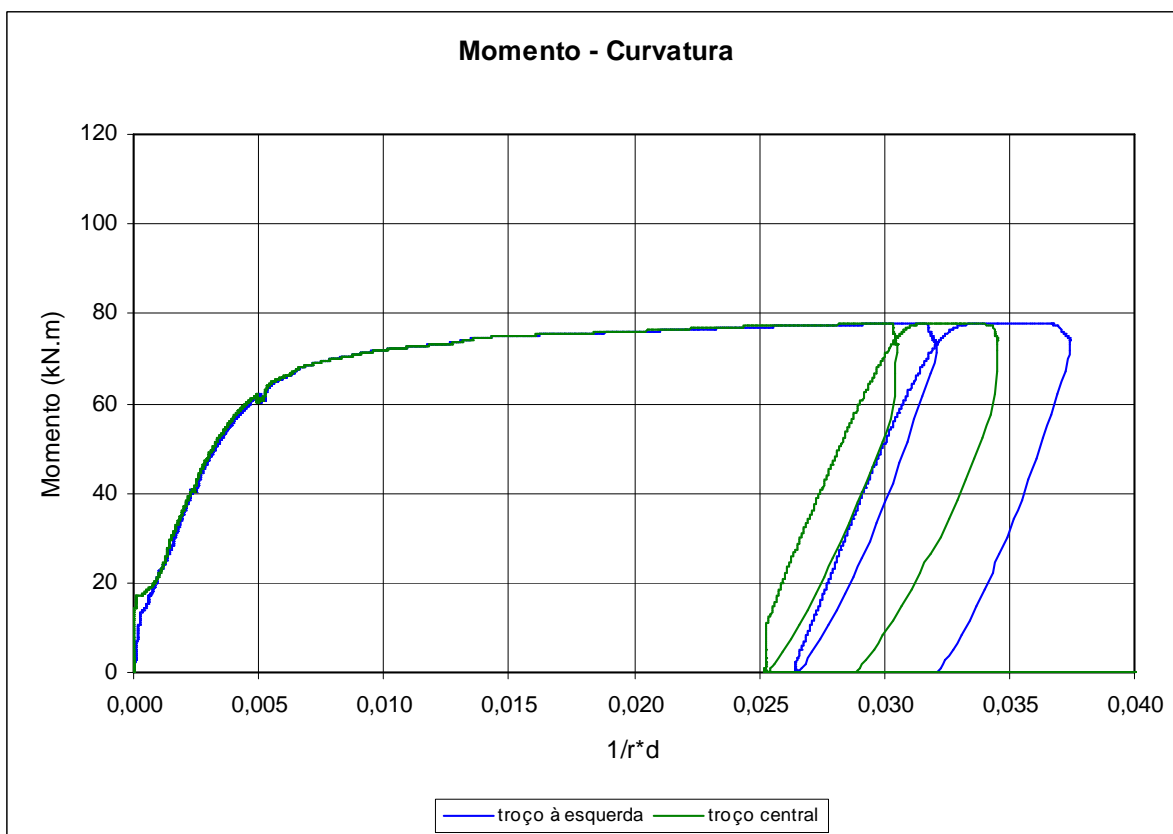
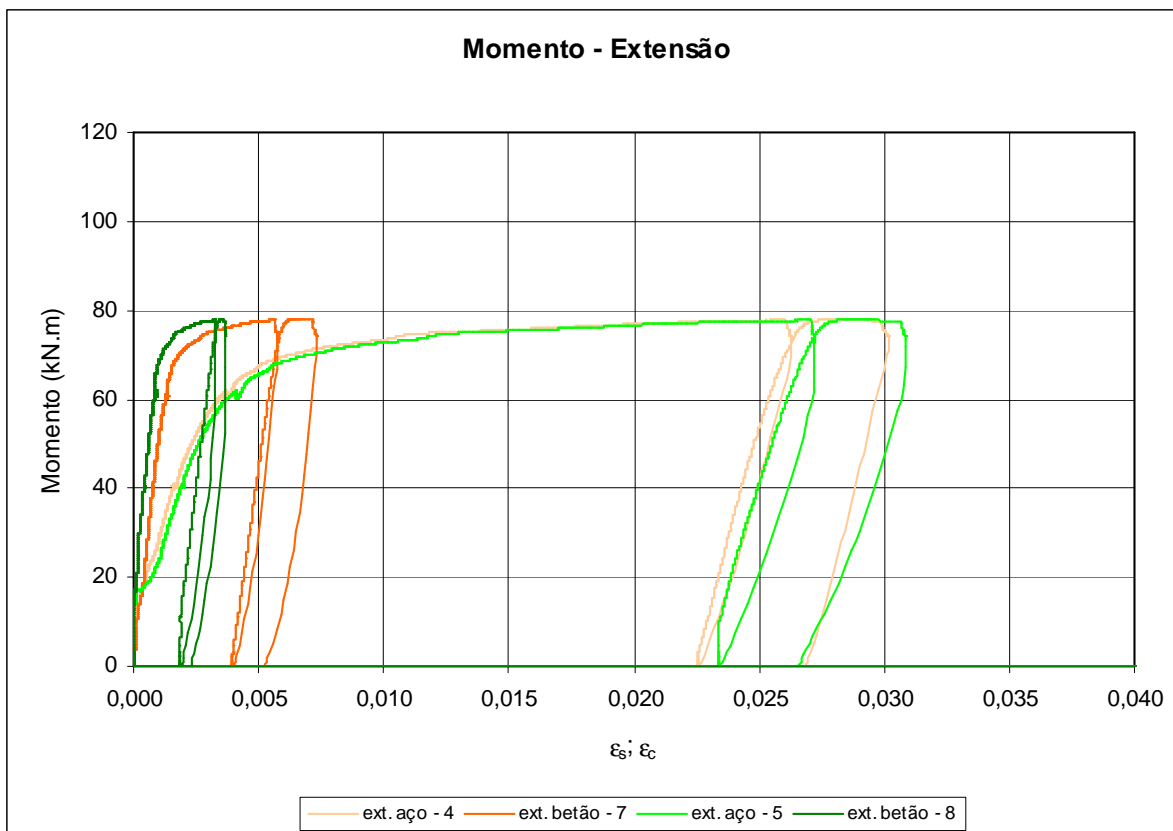
Viga AISI316_C35_d16



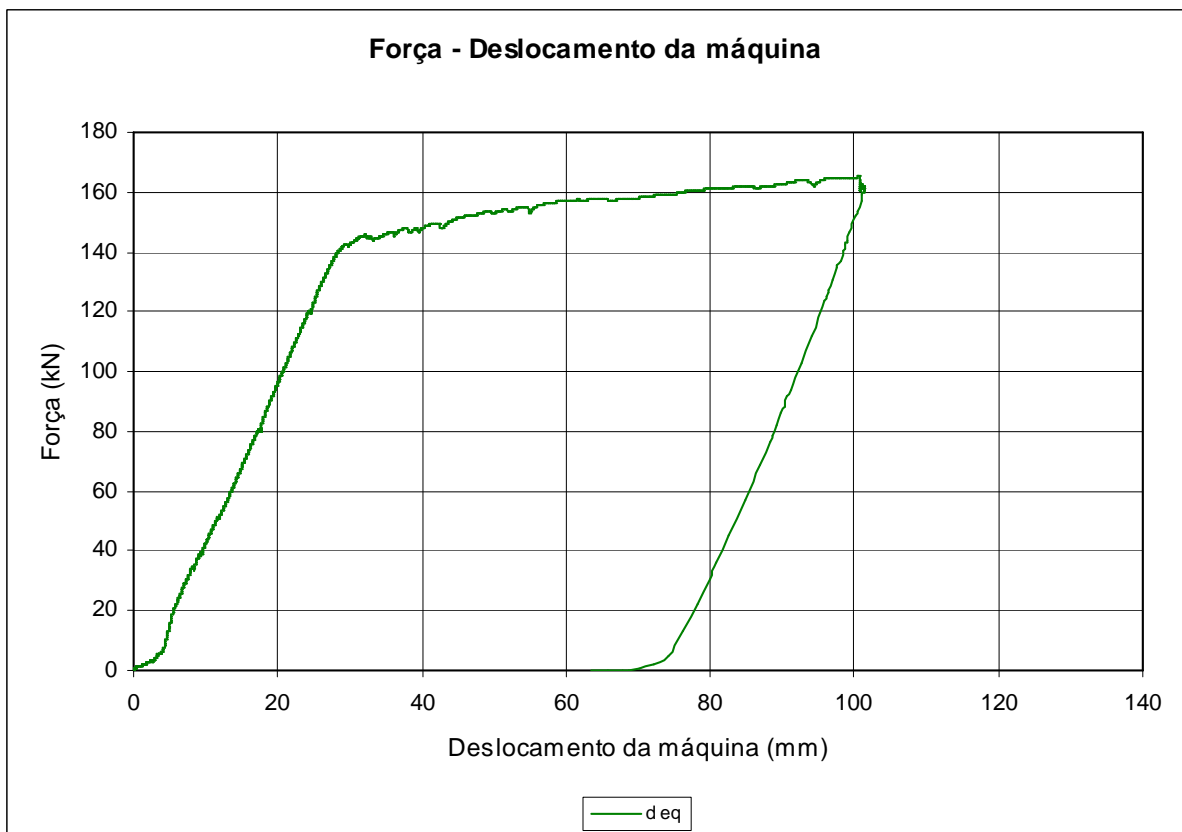
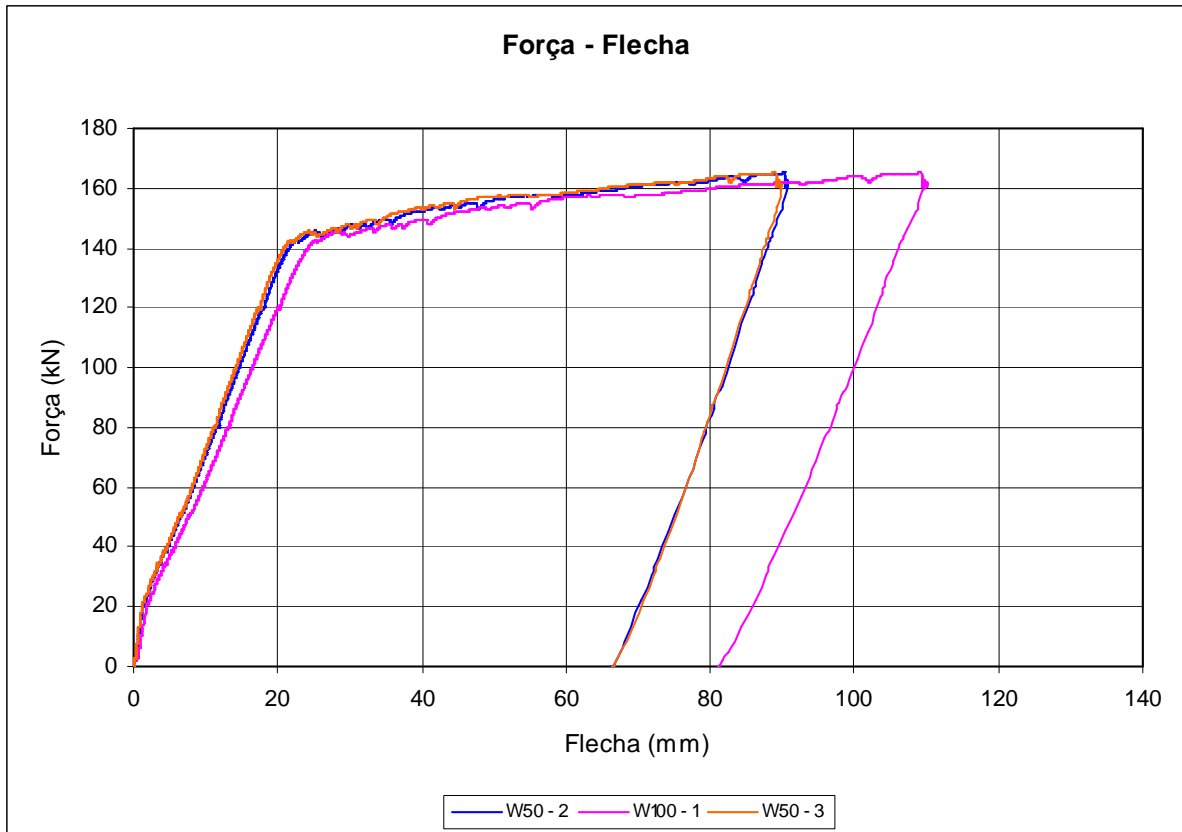


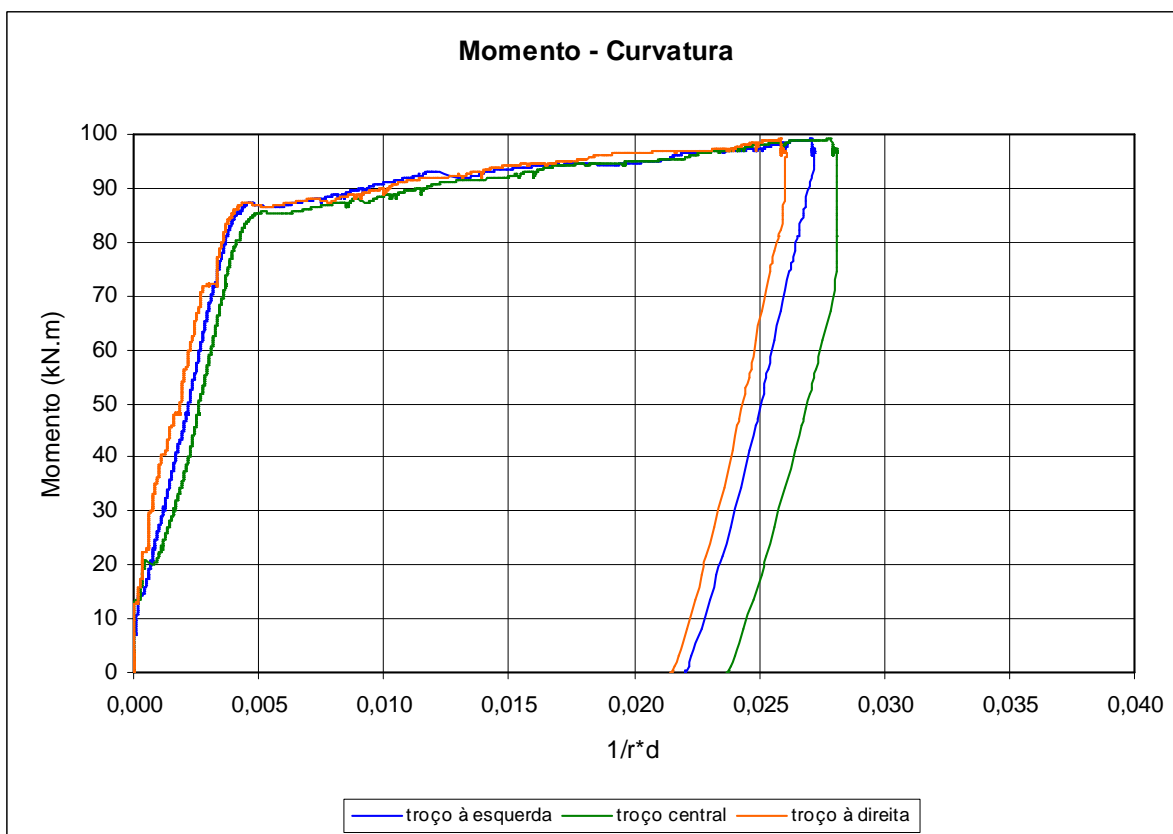
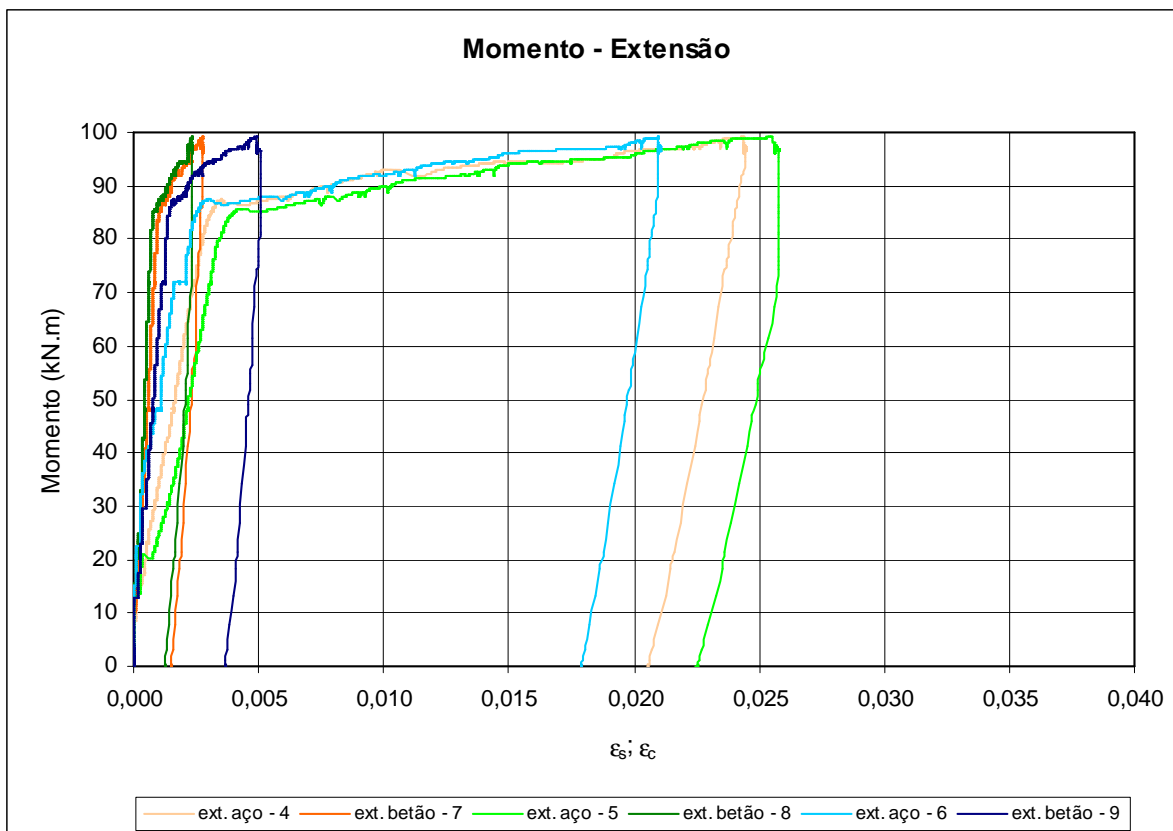
Viga HSS3_C35_d14



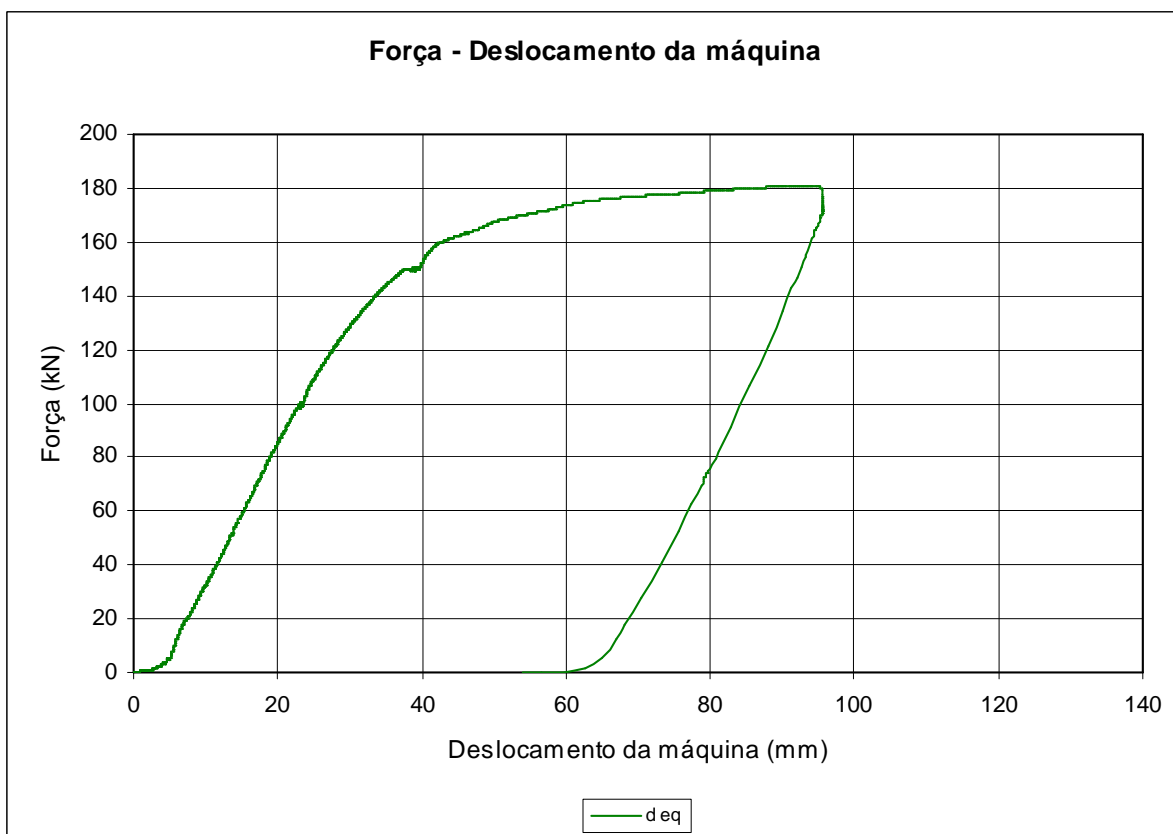
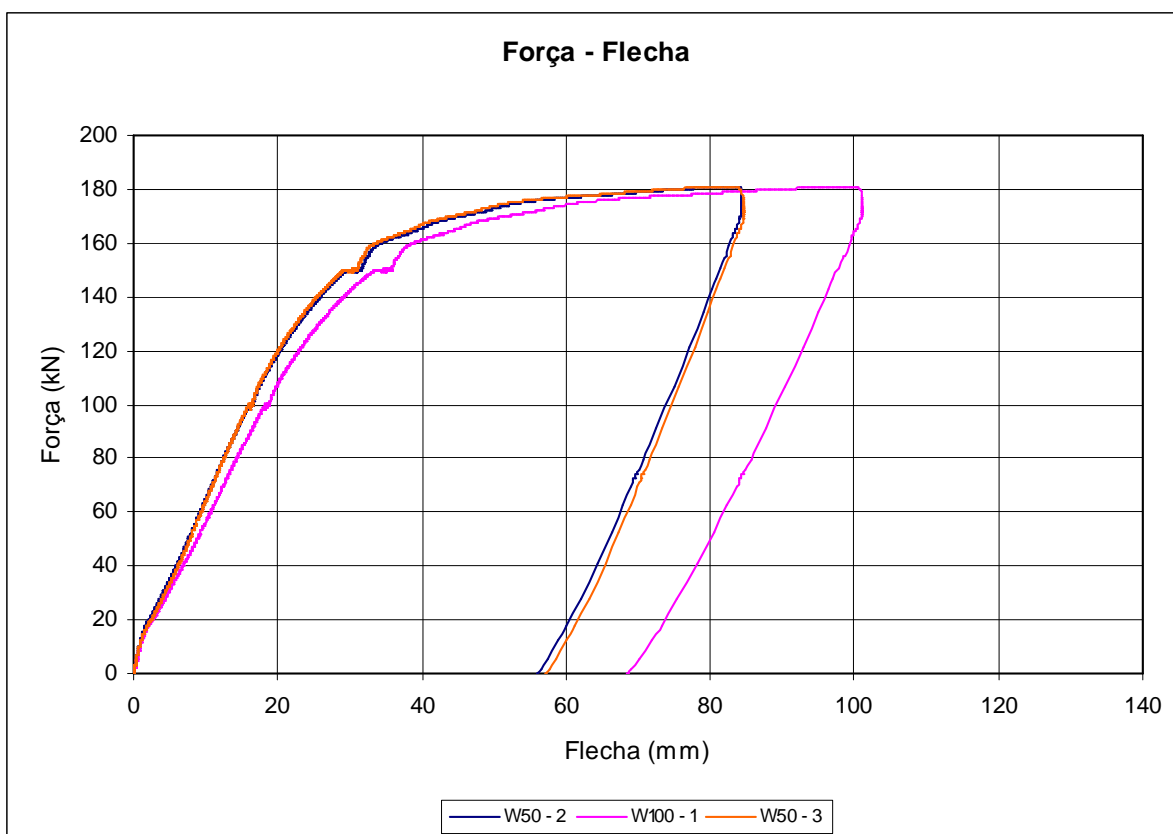


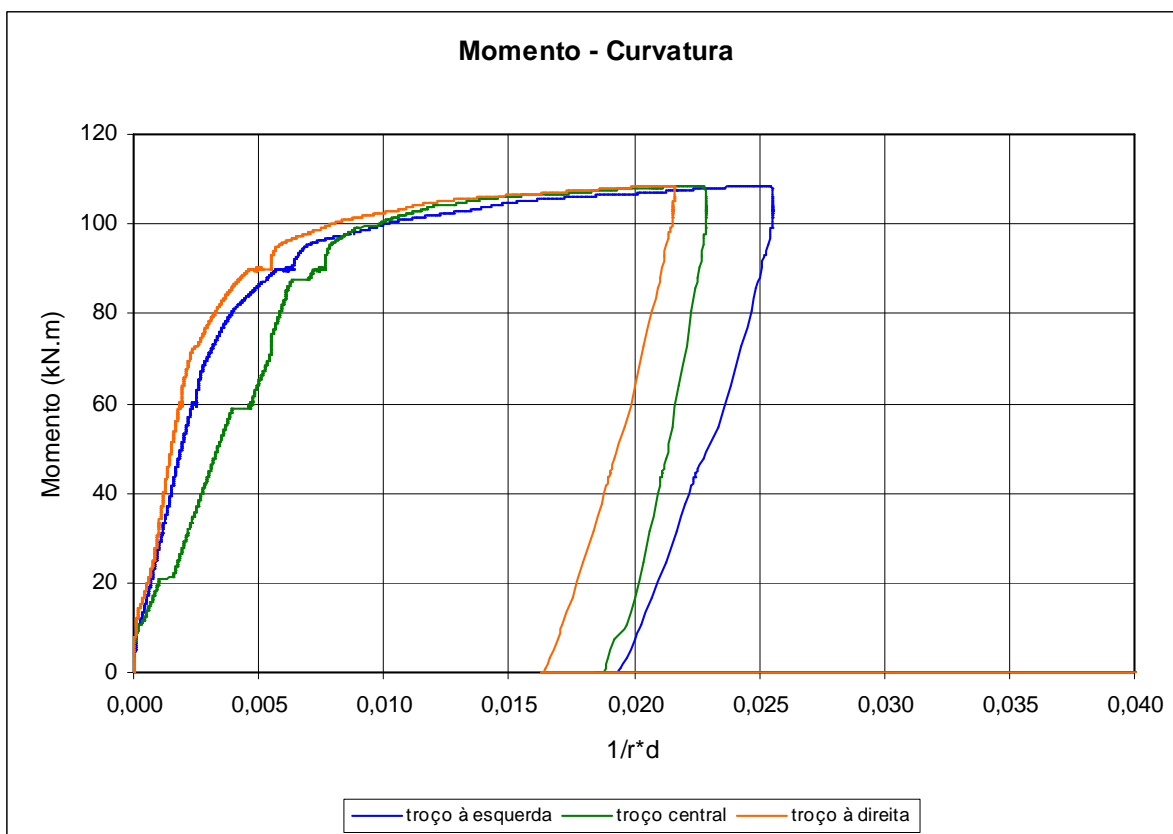
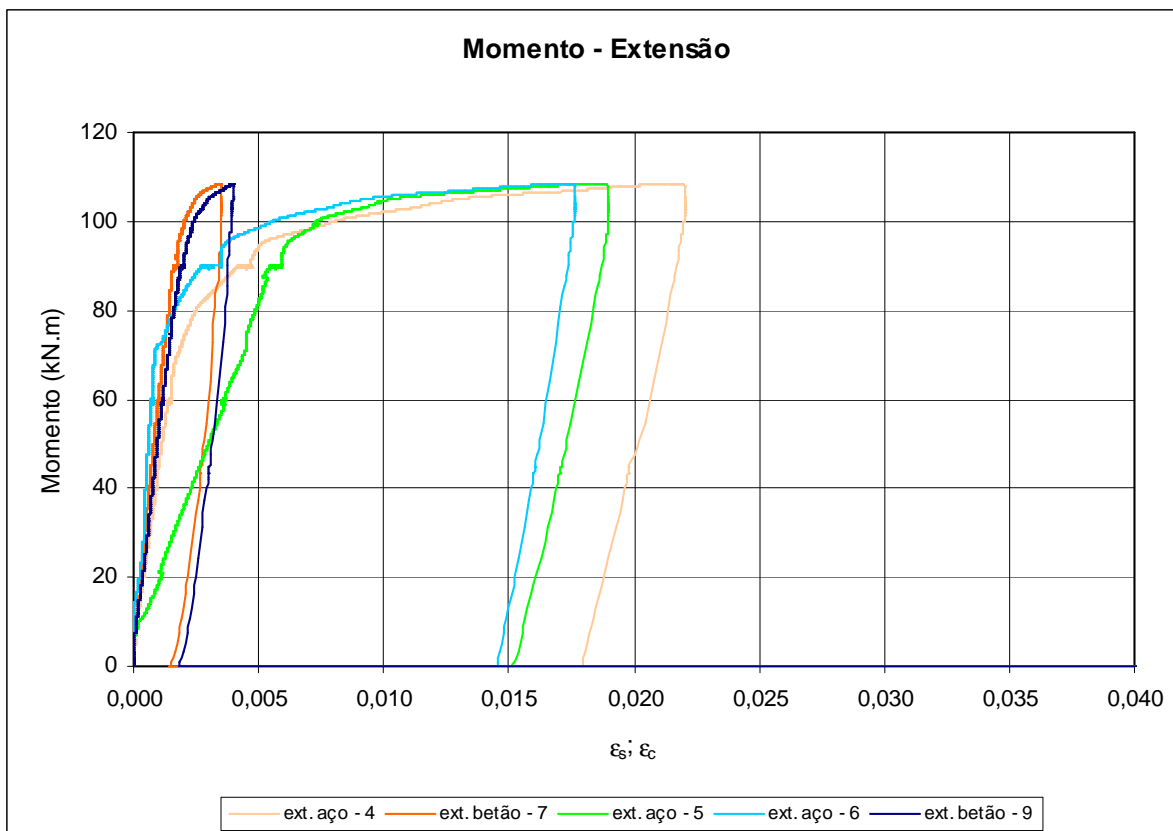
Viga A500_C60_d16





Viga AISI316_C60_d16





Viga HSS3_C60_d14

