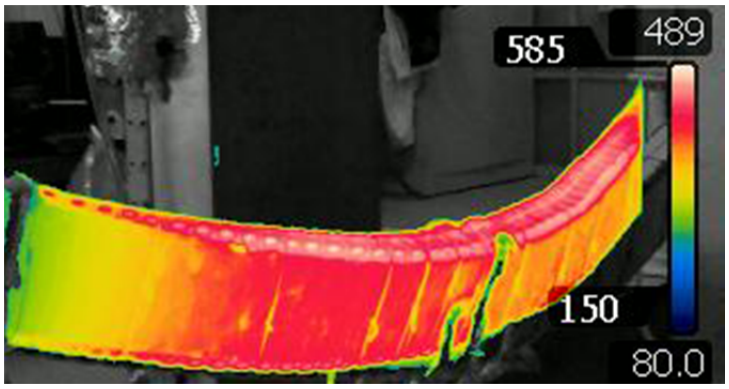
INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA
Escola Superior de Tecnologia e Gestão



Resistência a Temperaturas Elevadas de Vigas Parcialmente Embebidas com Betão

Carlos Alberto de Jesus Gonçalves

Relatório Final de Projeto apresentado à

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

Para obtenção do grau de Mestre em

Engenharia da Construção

Dezembro de 2012

INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Resistência a Temperaturas Elevadas de Vigas Parcialmente Embebidas com Betão

Carlos Alberto de Jesus Gonçalves

Relatório Final de Projeto apresentado à

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

Para obtenção do grau de Mestre em

Engenharia da Construção

Orientador:

Paulo Alexandre Gonçalves Piloto

Dezembro de 2012

AGRADECIMENTOS.

Em primeiro lugar queria agradecer aos meus pais, que me apoiaram e permitiram que tivesse condições para frequentar o mestrado de engenharia da construção e para a elaboração deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador Profº. Doutor Paulo Piloto, pelo apoio e conhecimentos transmitidos, e pela dedicação sempre demostrada ao longo desde trabalho.

Agradeço à Profª. Ana Ramos Gavilán e à Engª. Luísa Barreira a ajuda na realização dos ensaios experimentais. E também tenho que agradecer ao Profº. Doutor Rufino Amaro pela disponibilidade da máquina virtual indispensável para a execução das simulações numéricas necessárias para os vários métodos avançados de cálculo efetuados.

Agradeço também à ESTIG-IPB pelo uso das instalações e equipamentos.

Por último agradeço aos meus colegas e amigos do curso de mestrado em engenharia da construção, e ao corpo docente deste mestrado pelos conhecimentos transferidos ao longo o curso.

RESUMO.

Este trabalho foi desenvolvido para o preenchimento dos requisitos da obtenção do grau de mestre em Engenharia da Construção. A motivação para este trabalho está relacionada com a ausência do conhecimento sobre o comportamento a temperaturas elevadas de elementos de viga parcialmente embebidos com betão (PEB) e a necessidade de apresentação de formulações simplificadas para a análise de vigas PEB à flexão.

Foram realizados 27 ensaios à flexão na tipologia de 4 pontos, sendo que 9 ensaios foram realizados à temperatura ambiente e 18 a elevadas temperaturas. Das vigas ensaiadas à temperatura ambiente, 5 ensaios foram realizados com vigas parcialmente embebidas em betão PEB e 4 com o perfil metálico IPE100. Das vigas ensaiadas a elevadas temperaturas, todas PEB, 12 foram testadas para a um nível de temperatura de 400 °C considerando diferentes condições de ligação dos estribos com a alma do perfil, 3 a nível de temperatura de 200 °C e 3 a nível de temperatura de 600 °C.

A resistência à flexão diminui com a temperatura, como esperado. O modo de deformação correspondente ao estado limite último das nas vigas ensaiadas foi por encurvadura lateral torsional (LTB) em quase todos os ensaios, com a exceção dos ensaios realizados à temperatura de 600°C. Nestes casos o modo de deformação associado ao estado limite último parece ter ocorrido por formação de rótula plástica (PH).

Os ensaios realizados à temperatura ambiente permitem concluir que a resistência de vigas PEB é duas vezes superior ao valor da resistência das vigas metálicas, para o mesmo perfil metálico. A rigidez à flexão e à torção também é superior no caso destes elementos mistos.

Foram utilizadas metodologias numéricas para avaliar a estabilidade das vigas PEB, simulando as condições dos ensaios. Foram efetuadas também simulações para caracterizar a evolução do campo de temperaturas na secção a meio-vão, durante o aquecimento. O momento crítico, o modo de instabilidade e o momento resistente à flexão das vigas PEB, foram calculados através de métodos avançados de cálculo (Ansys).

Palavras-chave:

Vigas parcialmente embebidas (PEB), resistência a temperaturas elevadas, ensaios de flexão, estruturas mistas de aço e betão.

ABSTRACT.

This work was developed to fulfill the requirements of the master degree in Construction Engineering. The motivation for this work is related to the lack of knowledge about the behavior at elevated temperatures of Partially Encased Beam (PEB) and the need to develop simplified formulae for the bending analysis of PEB.

27 tests have been performed with the typology of four bending points, divided into 10 series. 9 tests were performed at room temperature and 18 were developed at elevated temperatures. For the tests developed at room temperature, 5 were performed with partially encased beams and 4 with the steel beam profile IPE100. From the set of PEB tested at elevated temperatures, 12 were tested for a temperature level of 400 ° C considering different shear conditions between the stirrups and the web of the profile, 3 were tested at 200 ° C and the last 3 PEB series was tested at the temperature of 600 °C.

The bending resistance decreases with temperature, as expected. The deformation mode shape of the corresponding ultimate limit state was identified by lateral torsional buckling (LTB) in nearly all the trials, with the exception of tests performed at a temperature of 600 ° C. In these cases the deformation mode shape appears to have occurred by the formation of a plastic hinge (PH).

The tests performed at room temperature showed that the bending resistance of partially encased beams is twice the resistance value of the bare steel beam, when using the same profile. The flexural and torsional stiffness is also higher for these elements mixed.

Numerical simulations were also used to evaluate the stability performance of PEB, simulating and validating the test conditions. Simulations were also performed to characterize the evolution of the temperature field at mid-span section during heating. The critical moment, the instability mode and the flexural resistance of PEB were calculated, using advanced calculation methods (Ansys).

Key words:

Partially Encased Beams (PEB), resistance at elevated temperatures, experimental bending tests, composite steel and concrete structures.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO. 1
1.1 Vigas parcialmente embebidas com betão. 1
1.2 Objetivos do estudo. 1
1.3 Motivação para o estudo. 1
1.4 Organização da tese. 2

2 ESTADO DA ARTE. 3
2.1 Investigação desenvolvida em pilares parcialmente embebidos. 3
2.2 Investigação desenvolvida em vigas parcialmente embebidas. 4

3 COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS. 6
3.1 Aço do perfil. 6
3.1.1 Propriedades mecânicas. 6
3.1.2.Propriedades térmicas. 7
3.2 Aço das armaduras do betão armado. 9
3.2.1 Propriedades mecânicas. 9
3.3 Betão. 11
3.3.1 Propriedades mecânicas. 11
3.3.2 Propriedades térmicas. 13

4 ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE VIGAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS COM BETÃO À FLEXÃO. . 16
4.1 Introdução. 16
4.2 Preparação das vigas para ensaio. 18
4.2.1 Ensaios à temperatura ambiente. 18
4.2.2 Ensaios a temperaturas elevadas. 20
4.3 Procedimentos de ensaios. 20
4.4 Evolução da temperatura na secção e no comprimento da viga. 23
4.4.1 Vigas série média. 23
4.4.2 Vigas série grande. 24
4.5 Ensaios de resistência à flexão. 26
4.5.1 Procedimento de cálculo do deslocamento do centro de massa através da medição dos deslocamentos. 26
4.5.2 Comparação dos resultados para as vigas da série média. 28
4.5.2.1 Comparação I - diferentes níveis de temperatura. 28
4.5.2.2 Comparação II - diferentes tipos de ligação dos estribos. 30
4.5.2.3 Comparação III - entre vigas PEB e em aço. 31
4.5.3 Comparação dos resultados para vigas da série grande. 35
4.5.3.1 Comparação IV - diferentes níveis de temperatura. 35
4.5.3.2 Comparação V - diferentes tipos de ligação dos estribos. 36
4.5.3.3 Comparação VI - entre vigas PEB e em aço. 38
4.6 Conclusões. 41

5 RESISTÊNCIA A TEMPERATURAS ELEVADAS DE VIGAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS COM BETÃO. 44
5.1 Ação do fogo. 44
5.1.1 Ação térmica. 44
5.1.1.1 Fluxo de calor. 44
5.1.1.2 Curva de incêndio natural. 45
5.1.1.3 Curvas nominais de incêndio. 46
5.1.2 Ação mecânica. 47
5.2 Método avançado de cálculo para determinação do campo de temperatura na secção. 48
5.2.1 Simulação do aquecimento a 600ºC. 49
5.2.2 Simulação do aquecimento a 400ºC. 51
5.2.3 Simulação do aquecimento a 200ºC. 52
5.2.4 Conclusões. 53
5.3 Método avançado de cálculo para determinação do momento crítico. 54
5.3.1 Vigas série média. 56

5.3.2 Vigas série grande. 57
5.4 Método analítico de cálculo do momento plástico. 58
5.5 Método avançado de cálculo para determinação da resistência à encurvadura lateral. 61
5.5.1 Vigas série média. 66
5.5.1.1 Simulação à temperatura ambiente. 66
5.5.1.2 Simulação a 200 °C 67
5.5.1.3 Simulação a 400 °C 68
5.5.2 Vigas série grande. 69
5.5.2.1 Simulação à temperatura ambiente. 69
5.5.2.2 Simulação a 400 °C 70
5.5.2.3 Simulação a 600 °C 71
5.5.3 Conclusões 72

6 CONCLUSÕES E TRABALHO FUTUROS. 73

REFERÊNCIAS 75

ANEXO A – MATERIAIS. 79
AÇO PERFIL (S275) 80
AÇO DAS ARMADURAS DE BETÃO ARMADO (S500 NR CLASSE B) 81
BETÃO (C20/25) 82

ANEXO B – FICHAS TÉCNICAS DOS ENSAIOS. 83
SÉRIE 1 (ENSAIO - B/2.4-01) 84
SÉRIE 1 (ENSAIO - B/2.4-02) 86
SÉRIE 1 (ENSAIO - B/2.4-03) 88
SÉRIE 2 (ENSAIO - B/2.4-04) 90
SÉRIE 2 (ENSAIO - B/2.4-05) 92
SÉRIE 2 (ENSAIO - B/2.4-06) 94
SÉRIE 3 (ENSAIO - B/2.4-07) 96
SÉRIE 3 (ENSAIO - B/2.4-08) 98
SÉRIE 3 (ENSAIO - B/2.4-09) 100
SÉRIE 4 (ENSAIO - B/2.4-10) 102
SÉRIE 4 (ENSAIO - B/2.4-11) 104
SÉRIE 4 (ENSAIO - B/2.4-12) 106
SÉRIE 5 (ENSAIO - B/2.4-11A) 108
SÉRIE 5 (ENSAIO - B/2.4-12A) 110
SÉRIE 6 (ENSAIO - B/3.9-01) 112
SÉRIE 6 (ENSAIO - B/3.9-02) 114
SÉRIE 6 (ENSAIO - B/3.9-03) 116
SÉRIE 7 (ENSAIO - B/3.9-04) 118
SÉRIE 7 (ENSAIO - B/3.9-05) 120
SÉRIE 7 (ENSAIO - B/3.9-06) 122
SÉRIE 8 (ENSAIO - B/3.9-07) 124
SÉRIE 8 (ENSAIO - B/3.9-08) 126
SÉRIE 8 (ENSAIO - B/3.9-09) 128
SÉRIE 9 (ENSAIO - B/3.9-11) 130
SÉRIE 9 (ENSAIO - B/3.9-12) 132
SÉRIE 10 (ENSAIO - B/3.9-11A) 134
SÉRIE 10 (ENSAIO - B/3.9-12A) 136

Índice de figuras

Figura 1 - Ensaio rotura à tração. 7
Figura 2 - Calor específico do aço. 8
Figura 3 - Condutividade térmica do aço. 9
Figura 4 - Ensaio rotura à tração. 10
Figura 5 - Ensaio de rotura à compressão. 13
Figura 6 - Calor específico do betão. 14
Figura 7 - Condutividade térmica do betão (limite superior). 15
Figura 8 - Massa volúmica do betão. 15
Figura 9 - Pórtico de reação para ensaio de vigas à flexão em 4 pontos. 17
Figura 10 - Posição dos transdutores de medição de deslocamentos. 17
Figura 11 - Instrumentação PEB com termopares a temperaturas elevadas. 18
Figura 12 - Instrumentação PEB com extensómetros a temperatura ambiente. 18
Figura 13 - Instrumentação IPE com extensómetros a temperatura ambiente. 18
Figura 14 - Soldadura de estribos. 19
Figura 15 - Soldadura de estribos. 19
Figura 16 - Extensometria no IPE. 19
Figura 17 - Extensometria no reforço. 19
Figura 18 - Betonagem das vigas. 19
Figura 19 - Vigas após betonagem. 19
Figura 20 - Medição das imperfeições geométricas. 20
Figura 21 - Preparação do perfil para soldadura de termopar. 20
Figura 22 - Termopares protegidos com massa térmica 20
Figura 23 - Interface bloco/cilindro hidráulico com película de “teflon”. 21
Figura 24 - Instrumentação de medição de deslocamentos. 21
Figura 25 - Fixação de resistência cerâmica. 22
Figura 26 - Manta de fibra cerâmica. 22
Figura 27 - Início do ensaio (B/3.9-11). 22
Figura 28 - Fim do ensaio (B/3.9-11). 22
Figura 29 - Evolução da temperatura série 1 23
Figura 30 - Evolução da temperatura série 2 24
Figura 31 - Evolução da temperatura série 3 24
Figura 32 - Evolução da temperatura série 6 25
Figura 33 - Evolução da temperatura série 7 25
Figura 34 - Evolução da temperatura série 8 26
Figura 35 - Determinação da posição sucessiva do centro de massa (YG, ZG). 27
Figura 36 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM da comparação I. 29
Figura 37 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM da comparação I. 29
Figura 38 - Rotação da secção SM da comparação I. 30
Figura 39 - Deslocamento vertical ZG da secção SM da comparação II. 30

Figura 40 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM da comparação II. 31
Figura 41 - Rotação da secção SM da comparação II. 31
Figura 42 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM da comparação III. 32
Figura 43 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM da comparação III. 32
Figura 44 - Rotação da secção SM da comparação III. 33
Figura 45 - Deformações na secção SM da comparação III. 33
Figura 46 - Deformações na secção SM da comparação III. 34
Figura 47 - Vigas da série média após ensaio. 34
Figura 48 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM da comparação IV. 35
Figura 49 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM da comparação IV. 36
Figura 50 - Rotação da secção SM da comparação IV. 36
Figura 51 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM da comparação V. 37
Figura 52 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM da comparação V. 37
Figura 53 - Rotação da secção SM da comparação V. 38
Figura 54 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM da comparação VI. 38
Figura 55 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM da comparação VI. 39
Figura 56 - Rotação da secção SM da comparação VI. 39
Figura 57 - Deformações na secção SM da comparação VI. 40
Figura 58 - Deformações na secção SM da comparação VI. 40
Figura 59 - Vigas da série grande após ensaio. 41
Figura 60 - Curva de incêndio natural típica. 46
Figura 61 - Curva de incêndio padrão (ISO834). 46
Figura 62 - Domínios de verificação da resistência. 48
Figura 63 - Elemento finito “PLANE55” [23]. 48
Figura 64 - Malha do modelo numérico. 49
Figura 65 - Modelo físico. 49
Figura 66 - Campo de temperatura para t=0 (s). 50
Figura 67 - Campo de temperatura para t=280 (s). 50
Figura 68 - Campo de temperatura para t=4549 (s). 50
Figura 69 - Campo de temperatura para t=7500 (s). 50
Figura 70 - Evolução de temperaturas no aço. 50
Figura 71 - Evolução de temperaturas no betão. 50
Figura 72 - Campo de temperatura para t=0 (s). 51
Figura 73 - Campo de temperatura para t=279 (s). 51
Figura 74 - Campo de temperatura para t=3801 (s). 51
Figura 75 - Campo de temperatura para t=5800 (s). 51
Figura 76 - Evolução de temperaturas no aço. 52
Figura 77 - Evolução de temperaturas no betão. 52
Figura 78 - Campo de temperatura para t=0 (s). 52
Figura 79 - Campo de temperatura para t=248 (s). 52

Figura 80 - Campo de temperatura para t=2090 (s). 53
Figura 81 - Campo de temperatura para t=3800 (s). 53
Figura 82 - Evolução de temperaturas no aço. 53
Figura 83 - Evolução de temperaturas no betão. 53
Figura 84 - Elemento finito "SOLID185", [27]. 55
Figura 85 - Malha do modelo numérico. 55
Figura 86 - Malha de elementos finitos. 56
Figura 87 - Malha do perfil com reforço e estribos. 56
Figura 88 - Malha do reforço e estribos. 56
Figura 89 - Encurvadura lateral torsional (LTB). 56
Figura 90 - LTB do perfil com reforço e estribos. 56
Figura 91 - LTB vista com a viga de topo. 56
Figura 92 - Malha de elementos finitos. 57
Figura 93 - Malha do perfil com reforço e estribos. 57
Figura 94 - Malha do reforço e estribos. 57
Figura 95 - Encurvadura lateral torsional (LTB). 57
Figura 96 - LTB do perfil com reforço e estribos. 57
Figura 97 - LTB vista com a viga de topo. 57
Figura 98 - Distribuição de tensões. 58
Figura 99 - Geometria da secção da viga. 59
Figura 100 - Curvas extensão-tensão real e de engenharia do aço do perfil. 61
Figura 101 - Curvas extensão-tensão reais do aço do perfil. 62
Figura 102 - Curva extensão-tensão do betão a 20ºC utilizada no Ansys. 62
Figura 103 - Curva tensão-extensão do betão a elevadas temperaturas. 63
Figura 104 - Curva tensão-extensão do betão a elevadas temperaturas utilizada no Ansys. 63
Figura 105 - Curva tensão-extensão do aço do reforço a elevadas temperaturas utilizada no Ansys. 64
Figura 106 - Elemento finito "SOLID65", [29]. 64
Figura 107 - Malha do modelo numérico. 65
Figura 108 - Eventos de carga. 66
Figura 109 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 67
Figura 110 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 67
Figura 111 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 68
Figura 112 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 68
Figura 113 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 69
Figura 114 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 69
Figura 115 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 70
Figura 116 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 70
Figura 117 - Deslocamento vertical ZG da secção SM. 71
Figura 118 - Deslocamento lateral YG da secção SM. 71
Figura 119 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 72

Figura 120 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 72

Índice de figuras - ANEXO A

Figura A 1 - Perfil IPE100. 80
Figura A 2 - Ensaio rotura à tracção. 80
Figura A 3 - Provete de ensaio. 80
Figura A 4 - Resultados ensaios. 80
Figura A 5 - Nervuras do varão aço S500 NR. 81
Figura A 6 - Provete de ensaio. 81
Figura A 7 - Ensaio rotura à tracção. 81
Figura A 8 - Resultados ensaios. 81
Figura A 9 - Agregados. 82
Figura A 10 - Curvas granulométricas dos agregados 82
Figura A 11 - Mistura dos componentes do betão 82
Figura A 12 - Ensaio rotura à compressão. 82

Índice de figuras - ANEXO B

Figura B 1 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 84
Figura B 2 - Secção da viga. 84
Figura B 3 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi. 84
Figura B 4 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 84
Figura B 5 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 84
Figura B 6 - Rotação da secção SM. 85
Figura B 7 - Aquecimento da Secção S2. 85
Figura B 8 - Evolução da distribuição de temperatura. 85
Figura B 9 - Termografia após remoção do isolamento. 85
Figura B 10 - Inicio da aplicação da carga. 85
Figura B 11 - Fim da aplicação da carga. 85
Figura B 12 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 86
Figura B 13 - Secção da viga. 86
Figura B 14 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi. 86
Figura B 15 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 86
Figura B 16 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 86
Figura B 17 - Rotação da secção SM. 87
Figura B 18 - Aquecimento da Secção S2. 87
Figura B 19 - Evolução da distribuição de temperatura. 87
Figura B 20 - Termografia antes de remover isolamento. 87
Figura B 21 - Inicio da aplicação da carga. 87
Figura B 22 - Fim da aplicação da carga. 87
Figura B 23 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 88

Figura B 24 - Secção da viga. 88
Figura B 25 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi. 88
Figura B 26 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 88
Figura B 27 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 88
Figura B 28 - Rotação da secção SM. 89
Figura B 29 - Aquecimento da Secção S2. 89
Figura B 30 - Evolução da distribuição de temperatura. 89
Figura B 31 - Termografia após remoção do isolamento. 89
Figura B 32 - Inicio da aplicação da carga. 89
Figura B 33 - Fim da aplicação da carga. 89
Figura B 34 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 90
Figura B 35 - Secção da viga. 90
Figura B 36 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi. 90
Figura B 37 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 90
Figura B 38 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 90
Figura B 39 - Rotação da secção SM. 91
Figura B 40 - Aquecimento da Secção S2. 91
Figura B 41 - Evolução da distribuição de temperatura. 91
Figura B 42 - Termografia após remoção do isolamento. 91
Figura B 43 - Inicio da aplicação da carga. 91
Figura B 44 - Fim da aplicação da carga. 91
Figura B 45 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 92
Figura B 46 - Secção da viga. 92
Figura B 47 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi. 92
Figura B 48 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 92
Figura B 49 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 92
Figura B 50 - Rotação da secção SM. 93
Figura B 51 - Aquecimento da Secção S2. 93
Figura B 52 - Evolução da distribuição de temperatura. 93
Figura B 53 - Termografia após remoção do isolamento. 93
Figura B 54 - Inicio da aplicação da carga. 93
Figura B 55 - Fim da aplicação da carga. 93
Figura B 56 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 94
Figura B 57 - Secção da viga. 94
Figura B 58 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi. 94
Figura B 59 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 94
Figura B 60 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 94
Figura B 61 - Rotação da secção SM. 95
Figura B 62 - Aquecimento da Secção S2. 95
Figura B 63 - Evolução da distribuição de temperatura. 95

Figura B 64 - Termografia após remoção do isolamento. 95
Figura B 65 - Inicio da aplicação da carga. 95
Figura B 66 - Fim da aplicação da carga. 95
Figura B 67 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 96
Figura B 68 - Secção da viga. 96
Figura B 69 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi. 96
Figura B 70 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 96
Figura B 71 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 96
Figura B 72 - Rotação da secção SM. 97
Figura B 73 - Aquecimento da Secção S2. 97
Figura B 74 - Evolução da distribuição de temperatura. 97
Figura B 75 - Termografia após remoção do isolamento. 97
Figura B 76 - Inicio da aplicação da carga. 97
Figura B 77 - Fim da aplicação da carga. 97
Figura B 78 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 98
Figura B 79 - Secção da viga. 98
Figura B 80 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi. 98
Figura B 81 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 98
Figura B 82 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 98
Figura B 83 - Rotação da secção SM. 99
Figura B 84 - Aquecimento da Secção S2. 99
Figura B 85 - Evolução da distribuição de temperatura. 99
Figura B 86 - Termografia após remoção do isolamento. 99
Figura B 87 - Inicio da aplicação da carga. 99
Figura B 88 - Fim da aplicação da carga. 99
Figura B 89 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 100
Figura B 90 - Secção da viga. 100
Figura B 91 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi. 100
Figura B 92 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 100
Figura B 93 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 100
Figura B 94 - Rotação da secção SM. 101
Figura B 95 - Aquecimento da Secção S2. 101
Figura B 96 - Evolução da distribuição de temperatura. 101
Figura B 97 - Termografia após remoção do isolamento. 101
Figura B 98 - Inicio da aplicação da carga. 101
Figura B 99 - Fim da aplicação da carga. 101
Figura B 100 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 102
Figura B 101 - Secção da viga. 102
Figura B 102 - Instrumentação da secção SM. 102
Figura B 103 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 102

Figura B 104 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 102
Figura B 105 - Rotação da secção SM. 103
Figura B 106 - Extensometria da Secção SM. 103
Figura B 107 - Colocação extensometria no IPE. 103
Figura B 108 - Colocação extensiometria no reforço. 103
Figura B 109 - Inicio da aplicação da carga. 103
Figura B 110 - Fim da aplicação da carga. 103
Figura B 111 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 104
Figura B 112 - Secção da viga. 104
Figura B 113 - Instrumentação da secção SM. 104
Figura B 114 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 104
Figura B 115 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 104
Figura B 116 - Rotação da secção SM. 105
Figura B 117 - Extensometria da Secção SM. 105
Figura B 118 - Extensometria no IPE. 105
Figura B 119 - Extensometria no reforço. 105
Figura B 120 - Inicio da aplicação da carga. 105
Figura B 121 - Fim da aplicação da carga. 105
Figura B 122 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 106
Figura B 123 - Secção da viga. 106
Figura B 124 - Instrumentação da secção SM. 106
Figura B 125 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 106
Figura B 126 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 106
Figura B 127 - Rotação da secção SM. 107
Figura B 128 - Extensometria da Secção SM. 107
Figura B 129 - Extensometria no IPE. 107
Figura B 130 - Extensometria no reforço. 107
Figura B 131 - Inicio da aplicação da carga. 107
Figura B 132 - Fim da aplicação da carga. 107
Figura B 133 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 108
Figura B 134 - Secção da viga. 108
Figura B 135 - Instrumentação da secção SM. 108
Figura B 136 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 108
Figura B 137 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 108
Figura B 138 - Rotação da secção SM. 109
Figura B 139 - Extensometria da Secção SM. 109
Figura B 140 - Extensometria. 109
Figura B 141 - Extensometria. 109
Figura B 142 - Inicio da aplicação da carga. 109
Figura B 143 - Fim da aplicação da carga. 109

Figura B 144 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 110
Figura B 145 - Secção da viga. 110
Figura B 146 - Instrumentação da secção SM. 110
Figura B 147 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 110
Figura B 148 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 110
Figura B 149 - Rotação da secção SM. 111
Figura B 150 - Extensometria da Secção SM. 111
Figura B 151 - Extensometria. 111
Figura B 152 - Extensometria. 111
Figura B 153 - Inicio da aplicação da carga. 111
Figura B 154 - Fim da aplicação da carga. 111
Figura B 155 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 112
Figura B 156 - Secção da viga. 112
Figura B 157 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi. 112
Figura B 158 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 112
Figura B 159 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 112
Figura B 160 - Rotação da secção SM. 113
Figura B 161 - Aquecimento da Secção S2. 113
Figura B 162 - Evolução da distribuição de temperatura. 113
Figura B 163 - Termografia antes de remover isolamento. 113
Figura B 164 - Inicio da aplicação da carga. 113
Figura B 165 - Fim da aplicação da carga. 113
Figura B 166 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 114
Figura B 167 - Secção da viga. 114
Figura B 168 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi. 114
Figura B 169 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 114
Figura B 170 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 114
Figura B 171 - Rotação da secção SM. 115
Figura B 172 - Aquecimento da Secção S2. 115
Figura B 173 - Evolução da distribuição de temperatura. 115
Figura B 174 - Termografia antes de remover isolamento. 115
Figura B 175 - Início da aplicação da carga. 115
Figura B 176 - Fim da aplicação da carga. 115
Figura B 177 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 116
Figura B 178 - Secção da viga. 116
Figura B 179 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi. 116
Figura B 180 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 116
Figura B 181 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 116
Figura B 182 - Rotação da secção SM. 117
Figura B 183 - Aquecimento da Secção S2. 117

Figura B 184 - Evolução da distribuição de temperatura. 117
Figura B 185 - Termografia após remoção do isolamento. 117
Figura B 186 - Inicio da aplicação da carga. 117
Figura B 187 - Final do ensaio. 117
Figura B 188 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 118
Figura B 189 - Secção da viga. 118
Figura B 190 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi. 118
Figura B 191 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 118
Figura B 192 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 118
Figura B 193 - Rotação da secção SM. 119
Figura B 194 - Aquecimento da Secção S2. 119
Figura B 195 - Evolução da distribuição de temperatura. 119
Figura B 196 - Termografia após remoção do isolamento. 119
Figura B 197 - Inicio da aplicação da carga. 119
Figura B 198 - Fim da aplicação da carga. 119
Figura B 199 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 120
Figura B 200 - Secção da viga. 120
Figura B 201 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi. 120
Figura B 202 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 120
Figura B 203 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 120
Figura B 204 - Rotação da secção SM. 121
Figura B 205 - Aquecimento da Secção S2. 121
Figura B 206 - Evolução da distribuição de temperatura. 121
Figura B 207 - Termografia após remoção do isolamento. 121
Figura B 208 - Inicio da aplicação da carga. 121
Figura B 209 - Fim da aplicação da carga. 121
Figura B 210 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 122
Figura B 211 - Secção da viga. 122
Figura B 212 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi. 122
Figura B 213 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 122
Figura B 214 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 122
Figura B 215 - Rotação da secção SM. 123
Figura B 216 - Aquecimento da Secção S2. 123
Figura B 217 - Evolução da distribuição de temperatura. 123
Figura B 218 - Termografia após remoção do isolamento. 123
Figura B 219 - Inicio da aplicação da carga. 123
Figura B 220 - Fim da aplicação da carga. 123
Figura B 221 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 124
Figura B 222 - Secção da viga. 124
Figura B 223 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi. 124

Figura B 224 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 124
Figura B 225 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 124
Figura B 226 - Rotação da secção SM. 125
Figura B 227 - Aquecimento da Secção S2. 125
Figura B 228 - Evolução da distribuição de temperatura. 125
Figura B 229 - Termografia após remoção do isolamento. 125
Figura B 230 - Inicio da aplicação da carga. 125
Figura B 231 - Fim da aplicação da carga. 125
Figura B 232 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 126
Figura B 233 - Secção da viga. 126
Figura B 234 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi. 126
Figura B 235 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 126
Figura B 236 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 126
Figura B 237 - Rotação da secção SM. 127
Figura B 238 - Aquecimento da Secção S2. 127
Figura B 239 - Evolução da distribuição de temperatura. 127
Figura B 240 - Termografia após remoção do isolamento. 127
Figura B 241 - Inicio da aplicação da carga. 127
Figura B 242 - Fim da aplicação da carga. 127
Figura B 243 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 128
Figura B 244 - Secção da viga. 128
Figura B 245 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi. 128
Figura B 246 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 128
Figura B 247 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 128
Figura B 248 - Rotação da secção SM. 129
Figura B 249 - Aquecimento da Secção S2. 129
Figura B 250 - Evolução da distribuição de temperatura. 129
Figura B 251 - Termografia após remoção do isolamento. 129
Figura B 252 - Inicio da aplicação da carga. 129
Figura B 253 - Fim da aplicação da carga. 129
Figura B 254 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 130
Figura B 255 - Secção da viga. 130
Figura B 256 - Instrumentação da secção SM. 130
Figura B 257 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 130
Figura B 258 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 130
Figura B 259 - Rotação da secção SM. 131
Figura B 260 - Extensometria da Secção SM. 131
Figura B 261 - Extensometria no IPE. 131
Figura B 262 - Extensometria no reforço. 131
Figura B 263 - Inicio da aplicação da carga. 131

Figura B 264 - Fim da aplicação da carga. 131
Figura B 265 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 132
Figura B 266 - Secção da viga. 132
Figura B 267 - Instrumentação da secção SM. 132
Figura B 268 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 132
Figura B 269 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 132
Figura B 270 - Rotação da secção SM. 133
Figura B 271 - Extensometria da Secção SM. 133
Figura B 272 - Extensometria no IPE. 133
Figura B 273 - Extensometria no reforço. 133
Figura B 274 - Inicio da aplicação da carga. 133
Figura B 275 - Fim da aplicação da carga. 133
Figura B 276 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 134
Figura B 277 - Secção da viga. 134
Figura B 278 - Instrumentação da secção SM. 134
Figura B 279 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 134
Figura B 280 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 134
Figura B 281 - Rotação da secção SM. 135
Figura B 282 - Aquecimento da Secção S2. 135
Figura B 283 - Extensometria. 135
Figura B 284 - Extensometria. 135
Figura B 285 - Inicio da aplicação da carga. 135
Figura B 286 - Fim da aplicação da carga. 135
Figura B 287 - Flexão em quatro pontos. Secções principais. 136
Figura B 288 - Secção da viga. 136
Figura B 289 - Instrumentação da secção SC/SMi. 136
Figura B 290 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM. 136
Figura B 291 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM. 136
Figura B 292 - Rotação da secção SM. 137
Figura B 293 - Extensometria da Secção SM. 137
Figura B 294 - Extensometria. 137
Figura B 295 - Extensometria. 137
Figura B 296 - Inicio da aplicação da carga. 137
Figura B 297 - Fim da aplicação da carga. 137

Índice de tabelas

Tabela 1 - Fatores de redução para a relação tensões-extensões do aço carbono a temperaturas elevadas. 6
Tabela 2 - Resultados experimentais das características mecânicas do aço do perfil. 7
Tabela 3 - Características nominais do aço S500. 9
Tabela 4 - Coeficientes de redução (Classe N) das propriedades mecânicas do aço laminado a quente para betão armado a temperaturas elevadas. 10
Tabela 5 - Resultados experimentais das características mecânicas do aço das armaduras de betão armado. 10
Tabela 6 - Composição do betão. 11
Tabela 7 - Características nominais do betão C20/25. 11
Tabela 8 - Coeficientes de redução das propriedades mecânicas do betão a temperaturas elevadas. 12
Tabela 9 - Ensaio rotura à compressão. 13
Tabela 10 - Séries de ensaios. 16
Tabela 11 - Comparação de séries de ensaios. 18
Tabela 12 - Posição das medições das imperfeições geométricas. 19
Tabela 13 - Resultados pontuais dos ensaios de flexão. 42
Tabela 14 - Momento plástico PEB e IPE a vários níveis de temperatura. 60
Tabela 15 - Incrementos de carga. 65

Índice de tabelas - ANEXO A

Tabela A 1 - Dimensões do IPE100. 80
Tabela A 2 - Características nomimais de resistência. 80
Tabela A 3 - Resultados ensaios de rotura à tracção. 80
Tabela A 4 - Características nomimais de resistência. 81
Tabela A 5 - Resultados ensaios de rotura à tracção. 81
Tabela A 6 - Composição do betão. 82
Tabela A 7 - Características nominais do betão C20/25. 82
Tabela A 8 - Ensaio rotura à compressão. 82

Índice de tabelas - ANEXO B

Tabela B 1 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 84
Tabela B 2 - Características da viga. 84
Tabela B 3 - Imperfeições laterais. 84
Tabela B 4 - Eventos de carga. 84
Tabela B 5 - Observações / Comentários. 85
Tabela B 6 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 86
Tabela B 7 - Características da viga. 86
Tabela B 8 - Imperfeições laterais. 86
Tabela B 9 - Eventos de carga. 86
Tabela B 10 - Observações / Comentários. 87

Tabela B 11 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 88
Tabela B 12 - Características da viga. 88
Tabela B 13 - Imperfeições laterais 88
Tabela B 14 - Eventos de carga. 88
Tabela B 15 - Observações / Comentários. 89
Tabela B 16 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 90
Tabela B 17 - Características da viga. 90
Tabela B 18 - Imperfeições laterais 90
Tabela B 19 - Eventos de carga. 90
Tabela B 20 - Observações / Comentários. 91
Tabela B 21 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 92
Tabela B 22 - Características da viga. 92
Tabela B 23 - Imperfeições laterais 92
Tabela B 24 - Eventos de carga. 92
Tabela B 25 - Observações / Comentários. 93
Tabela B 26 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 94
Tabela B 27 - Características da viga. 94
Tabela B 28 - Imperfeições laterais 94
Tabela B 29 - Eventos de carga. 94
Tabela B 30 - Observações / Comentários. 95
Tabela B 31 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 96
Tabela B 32 - Características da viga. 96
Tabela B 33 - Imperfeições laterais 96
Tabela B 34 - Eventos de carga. 96
Tabela B 35 - Observações / Comentários. 97
Tabela B 36 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 98
Tabela B 37 - Características da viga. 98
Tabela B 38 - Imperfeições laterais 98
Tabela B 39 - Eventos de carga. 98
Tabela B 40 - Observações / Comentários. 99
Tabela B 41 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 100
Tabela B 42 - Características da viga. 100
Tabela B 43 - Imperfeições laterais 100
Tabela B 44 - Eventos de carga. 100
Tabela B 45 - Observações / Comentários. 101
Tabela B 46 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 102
Tabela B 47 - Características da viga. 102
Tabela B 48 - Imperfeições laterais 102
Tabela B 49 - Eventos de carga. 102
Tabela B 50 - Observações / Comentários. 103

Tabela B 51 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 104
Tabela B 52 - Características da viga. 104
Tabela B 53 - Imperfeições laterais 104
Tabela B 54 - Eventos de Carga. 104
Tabela B 55 - Observações / Comentários. 105
Tabela B 56 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 106
Tabela B 57 - Características da viga. 106
Tabela B 58 - Imperfeições laterais 106
Tabela B 59 - Eventos de Carga. 106
Tabela B 60 - Observações / Comentários. 107
Tabela B 61 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 108
Tabela B 62 - Características da viga. 108
Tabela B 63 - Imperfeições laterais 108
Tabela B 64 - Eventos de Carga. 108
Tabela B 65 - Observações / Comentários. 109
Tabela B 66 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 110
Tabela B 67 - Características da viga. 110
Tabela B 68 - Imperfeições laterais 110
Tabela B 69 - Eventos de Carga. 110
Tabela B 70 - Observações / Comentários. 111
Tabela B 71 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 112
Tabela B 72 - Características da viga. 112
Tabela B 73 - Imperfeições laterais 112
Tabela B 74 - Eventos de carga 112
Tabela B 75 - Observações / Comentários 113
Tabela B 76 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 114
Tabela B 77 - Características da viga. 114
Tabela B 78 - Imperfeições laterais 114
Tabela B 79 - Eventos de carga 114
Tabela B 80 - Observações / Comentários. 115
Tabela B 81 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 116
Tabela B 82 - Características da viga. 116
Tabela B 83 - Imperfeições laterais 116
Tabela B 84 - Eventos de carga 116
Tabela B 85 - Observações / Comentários. 117
Tabela B 86 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 118
Tabela B 87 - Características da viga. 118
Tabela B 88 - Imperfeições laterais 118
Tabela B 89 - Eventos de carga 118
Tabela B 90 - Observações / Comentários. 119

Tabela B 91 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 120
Tabela B 92 - Características da viga. 120
Tabela B 93 - Imperfeições laterais 120
Tabela B 94 - Eventos de carga. 120
Tabela B 95 - Observações / Comentários. 121
Tabela B 96 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 122
Tabela B 97 - Características da viga. 122
Tabela B 98 - Imperfeições laterais 122
Tabela B 99 - Eventos de carga. 122
Tabela B 100 - Observações / Comentários. 123
Tabela B 101 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 124
Tabela B 102 - Características da viga. 124
Tabela B 103 - Imperfeições laterais 124
Tabela B 104 - Eventos de carga. 124
Tabela B 105 - Observações / Comentários. 125
Tabela B 106 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 126
Tabela B 107 - Características da viga. 126
Tabela B 108 - Imperfeições laterais 126
Tabela B 109 - Eventos de carga. 126
Tabela B 110 - Observações / Comentários. 127
Tabela B 111 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 128
Tabela B 112 - Características da viga. 128
Tabela B 113 - Imperfeições laterais 128
Tabela B 114 - Eventos de carga. 128
Tabela B 115 - Observações / Comentários. 129
Tabela B 116 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 130
Tabela B 117 - Características da viga. 130
Tabela B 118 - Imperfeições laterais 130
Tabela B 119 - Eventos de carga. 130
Tabela B 120 - Observações / Comentários. 131
Tabela B 121 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 132
Tabela B 122 - Características da viga. 132
Tabela B 123 - Imperfeições lateriais. 132
Tabela B 124 - Eventos de carga. 132
Tabela B 125 - Observações / Comentários. 133
Tabela B 126 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 134
Tabela B 127 - Características da viga. 134
Tabela B 128 - Imperfeições laterais 134
Tabela B 129 - Eventos de carga. 134
Tabela B 130 - Observações / Comentários. 135

Tabela B 131 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios). 136
Tabela B 132 - Características da viga. 136
Tabela B 133 - Imperfeições laterais 136
Tabela B 134 - Eventos de carga 136
Tabela B 135 - Observações / Comentários. 137

1 INTRODUÇÃO.

1.1 Vigas parcialmente embebidas com betão.

As vigas parcialmente embebidas com betão (PEB) são elementos constituídos por perfis metálicos, habitualmente em forma de I ou H, revestidos com betão reforçado entre os banzos. Também podem ser construídos por elementos chapas soldada.

As secções podem ser compostas com pernos de ligação, com reforço de varões de aço e com estribos, podendo estes ser soldados (W) ou não (NW) à alma do perfil.

A secção mista deve funcionar em conjunto, de forma a tirar o máximo partido dos dois materiais. Os estribos posicionados ao longo da viga têm como finalidade aumentar a resistência ao corte, servindo também para confinar o betão.

A solução mista permite o aumento da rigidez à flexão e torção, sem aumento da dimensão da secção.

O betão reforçado é responsável pelo aumento da resistência ao fogo das PEB, em comparação com a secção metálica isolada.

1.2 Objetivos do estudo.

O objetivo principal do estudo é testar o comportamento das vigas PEB à flexão para níveis de temperatura elevados (200 ºC,400 °C e 600 °C).

O estudo pretende ainda comparar o comportamento de vigas metálicas de perfil IPE 100 com a solução mista com o mesmo perfil, parcialmente embebidas com betão (PEB), à temperatura ambiente. Também é testada a ligação soldada e não soldada dos estribos à alma.

1.3 Motivação para o estudo.

Os elementos de viga parcialmente embebidos com betão (PEB) têm sido extensivamente testados à temperatura ambiente por diferentes investigadores, contudo o seu comportamento a elevadas temperaturas não se encontra tão divulgado.

O método de cálculo para o projeto ao fogo, de acordo com a norma europeia EN1994-1-2 [1], é válido para vigas mistas, com base em dois métodos de cálculo:

- Método de valores tabelados (considerando condições de apoio simples e exposição ao fogo padrão) com base na prescrição da geometria (dimensões mínimas da secção reta) para um determinado valor de resistência ao fogo e nível de carga.
- Método de cálculo simplificado (considerando condições de apoio simples e aquecimento padrão por três lados). O efeito do fogo nas propriedades dos materiais é tomado em consideração, quer através da redução das dimensões da secção dos materiais ou através da redução das propriedades mecânicas dos materiais.

O segundo método pode ser aplicado nas vigas parcialmente embebidas com betão (PEB), calculando a resistência ao fogo no domínio de carga, não considerando a resistência mecânica da laje de betão armado.

A avaliação da temperatura da secção transversal é mais complexa para as PEB do que para vigas metálicas isoladas. Os banzos da viga de aço são expostos ao fogo, enquanto as outras partes são protegidas pelo betão colocado entre os banzos. O betão embebido e o aço do reforço contribuem para a resistência ao fogo. Devido a estas considerações, não é possível estimar as temperaturas dos elementos individuais da secção recorrendo a métodos de cálculo simplificado. Esta situação impossibilita a comparação com a temperatura crítica geral.

Os resultados deste programa experimental devem servir para calibrar e validar modelos de cálculo avançados e novas propostas de modelos de cálculo simplificados.

Pretende se ainda estudar o comportamento termomecânico destes elementos, em especial o modo de deformação associado ao estado limite último.

1.4 Organização da tese.

A tese está dividida em seis capítulos. O capítulo 1 contém uma introdução, com a descrição das vigas parcialmente embebidas com betão. São também apresentados os objetivos e a motivação para o estudo.

No capítulo 2 é apresentado o estado da arte com referência aos principais documentos científicos sobre estudo das vigas parcialmente embebidas PEB e das colunas parcialmente embebidas com betão (PEC).

O terceiro capítulo trata o comportamento mecânico e térmico dos materiais, aço e betão, a temperaturas elevadas, apresentando a variação das propriedades com a temperatura.

O quarto capítulo descreve a ação do fogo, fazendo se referência aos fenómenos de transferência de calor. Neste capítulo é apresentado o método avançado de cálculo para a determinação do campo de temperatura na secção a meio-vão, o método avançado de cálculo

para determinação do momento crítico, o método analítico de cálculo do momento plástico e o método avançado de cálculo para determinação da resistência à flexão (encurvadura lateral torsional).

No quinto capítulo faz-se a descrição dos ensaios experimentais à flexão, desde a preparação das vigas, descrevendo os ensaios de resistência e apresentando os resultados obtidos.

O capítulo sexto serve para apresentar as conclusões e para apresentar o trabalho futuro a desenvolver.

2 ESTADO DA ARTE.

2.1 Investigação desenvolvida em pilares parcialmente embebidos.

Em 1994 Hunaiti e Fattah [2] testaram 19 pilares parcialmente embebidos com betão com carga axial excêntrica constante. Concluíram que os pilares mantiveram um comportamento compósito.

Em 1995, Plumier et al. [3], desenvolveram 12 ensaios para teste das ligações entre vigas e colunas parcialmente embebidas com betão. Estes autores concluíram que o comportamento dos elementos não dependia do tipo de ligação (soldada, aparafusada) nem da dimensão da espessura da alma. A cedência destes pórticos verificou-se nos elementos de viga e a presença do betão condicionou o modo de instabilidade dos banzos dos elementos de viga.

Em 2006, Brent Pricket e Robert Driver [4] elaboraram um projeto de investigação para estudar o comportamento de colunas parcialmente embebidas com betão de alto desempenho. Efetuaram onze ensaios com colunas de dimensão 400 ×400 ×2000 mm. Sete destas colunas foram ensaiadas com carga concêntrica, dos quais dois utilizaram betão de desempenho normal, três utilizaram betão de alto desempenho e dois utilizaram betão de alto desempenho reforçado com fibras de aço. Os restantes quatro ensaios utilizaram betão de alto desempenho com aplicações de cargas excêntricas, variando a excentricidade e a orientação das colunas. Nos ensaios com carga concêntrica o modo de rotura foi semelhante, ocorrendo esmagamento do betão com encurvadura dos banzos do perfil de aço. Com o início da encurvadura local ocorrendo antes da carga última. Nas colunas com betão de alto desempenho a rotura deu-se de maneira súbita em comparação com as colunas com betão normal. Nas colunas com betão de alto desempenho reforçado com fibras de aço, o comportamento na rotura foi mais dúctil, influência da introdução das fibras de aço.

Nas colunas sujeitas a carga excêntricas o comportamento foi semelhante, ocorrendo esmagamento do betão e encurvadura dos banzos do perfil de aço e com formação de rótula plástica. No entanto o modo de rotura efetivo foi diferente, dependendo do eixo onde ocorreu flexão. Quando ocorreu flexão no sentido do eixo mais forte, atingiram-se as tensões últimas no aço, enquanto submetidas à flexão no sentido do eixo fraco, atingiram-se as tensões últimas no betão. Este comportamento é justificado pelo confinamento das fibras betão pelos banzos do perfil, quando submetida à flexão na direção do eixo mais forte.

Em 2011. António J.P. Moura Correia, João Paulo C. Rodrigues [5], realizaram 12 ensaios em colunas parcialmente embebidas com betão de classe de resistência C25/30 e com agregados calcários. Seis ensaios foram realizadas com a secção composta com perfil metálico HEA160, com reforço de 4 varões de aço de diâmetro 16 mm e estribos com diâmetro 6 mm afastados de 150 mm. Os restantes 6 ensaios foram realizados com perfil metálico HEA200, com reforço de 4 varões de aço de diâmetro 20 mm e estribos com diâmetro 8 mm afastados de 150 mm. Os estribos foram soldados a alma do perfil metálico. A temperatura dos elementos foi registada com a colocação de vários termopares em diferentes secções.

2.2 Investigação desenvolvida em vigas parcialmente embebidas.

Em 1993, Kindmann et al. [6], realizaram 13 ensaios de flexão em quatro pontos em elementos de viga de secção HEAA400, de comprimento total 4,2 metros, com e sem influência de ligação mecânica com a laje. Nesta investigação foi demostrada a importância do reforço do betão armado no momento resistente à flexão. Esta investigação permitiu a adaptação de novas regras de projeto da pré-norma do Eurocódigo 4 para este tipo de elemento.

Em 1994, Hosser et al. [7], realizaram ensaios de resistência ao fogo em 4 elementos de viga mistos, parcialmente embebidos com betão, com secção em perfil de aço HE 300 AA com betão entre os banzos, utilizando reforço de 2 varões de 25 mm e estribos de 8 mm de diâmetro. Este estudo permitiu desenvolver um modelo de cálculo para determinar a largura efetiva da laje.

Em 1995, Plumier et al. [3], desenvolveram 12 ensaios para teste das ligações entre vigas e colunas parcialmente embebidas com betão. Estes autores concluíram que o comportamento dos elementos não dependia do tipo de ligação (soldada, aparafusada) nem da

dimensão da espessura da alma. A cedência destes pórticos verificou-se nos elementos de viga e a presença do betão condicionou o modo de instabilidade dos banzos dos elementos de viga.

Em 2000, Lindner and Budassis [8], efetuaram 22 ensaios à temperatura ambiente, com duas secções metálicas distintas, uma com perfil IPE220 e outra com perfil IPE270, com um comprimento de 6,30 m. A carga foi aplicada a meio-vão utilizando um ensaio de flexão em 3 pontos. Os autores apresentaram uma nova proposta de dimensionamento do elemento à encurvadura lateral torsional, tendo em consideração a rigidez à torção do betão.

Em 2002, Maquoi et al. [9], efetuaram três ensaios com elementos de grande dimensão. Um ensaio foi realizado com perfil IPE 500, outro com a viga IPE500 parcialmente embebida com betão com varões de reforço e conectores e outro mas condições anteriores mas sem conectores. Foram responsáveis pelo estudo de resistência à encurvadura lateral destes elementos de viga parcialmente embebidos, apresentando novas propostas para o dimensionamento à flexão. O momento crítico e o momento resistente à encurvadura lateral torsional foram revistos e melhorados.

Em 2002, Assi et al. [10], desenvolveram um estudo teórico e experimental sobre a capacidade resistente última de elementos de viga parcialmente embebidos com betão. Para tal realizaram 12 ensaios para testar diferentes qualidades de betão, concluindo que a utilização de betão de densidade normal proporciona valores de resistência à flexão pouco superiores quando comparado com a utilização de betão leve.

Em 2004, Kodaira et al. [11], efetuaram 8 ensaios de resistência ao fogo em vigas parcialmente embebidas com betão. Os autores demonstraram que o reforço é eficiente nestas condições. Os ensaios foram parcialmente validados com simulação numérica.

Em 2008, Elghazouli and Treadway [12], realizaram 10 ensaios à escala real sobre este tipo de elementos para avaliação do desempenho inelástico. Os investigadores apresentam um estudo sobre a influência do endurecimento do aço por deformação, do confinamento do betão e a extensão dos elementos com secção plastificada na capacidade resistente destes elementos.

Em 2009, Nardin and El Debs [13], analisaram o comportamento de 3 elementos mistos com secção parcialmente embebida com betão, avaliando diferentes posições relativas dos conectores. Os resultados experimentais confirmam o funcionamento misto deste tipo de secções e o aumento da resistência à flexão.

3 COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS.

3.1 Aço do perfil.

3.1.1 Propriedades mecânicas.

A caracterização da resistência nominal do aço do perfil é definida, nas normas europeias, para a temperatura ambiente no Eurocódigo EN1993-1-1 [14] e para ação do fogo no Eurocódigo EN1993-1-2 [15]. Segundo o ponto 3.2.1 do EN1993-1-1 [14] os valores de f_y e f_u podem ser obtidos diretamente do quadro 3.1 do referido ponto , sendo que para o aço S275 com t<40 mm os valores são f_y=275 MPa e f_u = 430 MPa. Sendo o módulo de elasticidade E de 210 GPa e o módulo de elasticidade transversal G com valor de 81 GPa e coeficiente de Poisson υ=0,3.

Para altas temperaturas, segundo o ponto 3.2.1 do EN 1993-1-2 [15] definem-se fatores de redução das características mecânicas do aço para ter em consideração o efeito das temperaturas elevadas. Na Tabela 1 são apresentados os fatores de redução para o limite de proporcionalidade $k_{p,\theta}$, para o limite de elasticidade $k_{y,\theta}$ e para o módulo de elasticidade $k_{E,\theta}$.

Tabela 1 - Fatores de redução para a relação tensões-extensões do aço carbono a temperaturas elevadas.

Temperatura do aço θ_a [ºC]	Fatores de redução à temperatura θ_a referidos ao valor de f_y ou E_a a 20 °C		
	$k_{y,\theta}=\frac{f_{y,\theta}}{f_y}$	$k_{p,\theta}=\frac{f_{p,\theta}}{f_y}$	$k_{E,\theta}=\frac{E_{a,\theta}}{E_a}$
20	1,000	1,000	1,000
100	1,000	1,000	1,000
200	1,000	0,807	0,900
300	1,000	0,613	0,800
400	1,000	0,420	0,700
500	0,780	0,360	0,600
600	0,470	0,180	0,310
700	0,230	0,075	0,130
800	0,110	0,050	0,090
900	0,060	0,0375	0,0675
1000	0,040	0,0250	0,0450
1100	0,020	0,0125	0,0225
1200	0,000	0,0000	0,000

$k_{y,\theta}$ - Fator de redução para a tensão de cedência efetiva, $k_{p,\theta}$ - Fator de redução para a tensão limite de proporcionalidade, $k_{E,\theta}$ - Fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico.

Para a caracterização experimental do aço do perfil foram realizados três ensaios ver Figura 1, segundo a norma ISO 6892-1:2009 [16]. Os provetes utilizados foram obtidos da alma do perfil IPE100 e foram obtidos os resultados apresentados na

Tabela 2.



Figura 1 - Ensaio rotura à tração.

Tabela 2 - Resultados experimentais das características mecânicas do aço do perfil.

Ensaio nº	E [GPa]	$R_{p.0,2\%}$ [MPa]	ReH [MPa]	ReL [MPa]	Rm [MPa]	At [%]
PI1	198,606	292,989	295,848	296,741	426,061	41,834
PI2	200,433	304,256	305,329	301,038	431,612	41,378
PI3	194,664	304,969	306,222	304,789	436,082	41,540
Média	197,901	300,738	302,466	300,856	431,252	41,584
Desv. Padrão	2,948	6,720	5,749	4,028	5,020	0,231

E- Módulo de Elasticidade, $R_{p.0.2\%}$ - Tensão aos 0,2% de extensão, ReH- Tensão de cedência máxima, ReL- Tensão de cedência mínima, Rm- Tensão de rotura, At- Extensão total no momento da rotura.

O valor de tensão de cedência f_y é determinado pelo valor da tensão de cedência máximo ReH. Este valor está de acordo com a classificação do fornecedor S275.

3.1.2.Propriedades térmicas.

Nesta secção são apresentadas as propriedades térmicas com direta influência no comportamento deste material em condições de extrema temperatura.

O calor específico do aço segundo o Eurocódigo EN1993-1-2 [15] deverá ser determinado pelas seguintes expressões.

- para $20\ ^\circ C \le \theta_a < 600\ ^\circ C$:

$$c_a = 425 + 7,73\times10^{-1}\theta_a - 1,69\times10^{-3}\theta_a^2 + 2,22\times10^{-6}\theta_a^3 \ \left[J/kgK\right] \quad (1)$$

- para $600\ ^\circ C \le \theta_a < 735\ ^\circ C$:

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738-\theta_a} \ \left[J/kgK\right] \quad (2)$$

- para $735\ ^\circ C \le \theta_a < 900\ ^\circ C$:

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \ \left[J/kgK\right] \quad (3)$$

- para $900\ ^{o}C \le \theta_a < 1200\ ^{o}C$:

$$c_a = 650\ \left[J / kgK\right] \tag{4}$$

A transformação alotrópica do aço (criação de fase gama) resulta de um processo endotérmico, traduzido num aumento significativo do calor específico. Esta variação será responsável por um atraso na evolução de temperatura do perfil em aço. Este efeito não se encontra evidenciado nos capítulos 4 e 5, pelo facto da temperatura máxima de ensaio ser inferior aquela em que se verifica o fenómeno.

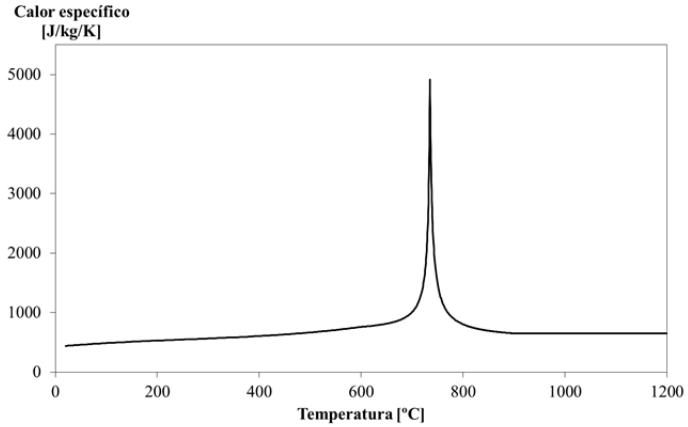


Figura 2 - Calor específico do aço.

A condutividade térmica determinada a partir do ponto 3.4.1.3 do Eurocódigo EN1993-1-2 [15] segue as seguintes expressões.

- para $20\ ^{o}C \le \theta_a < 800\ ^{o}C$:

$$\lambda_a = 54 - 3{,}33 \times 10^{-2}\theta_a\ \left[W / mK\right] \tag{5}$$

- para $800\ ^{o}C \le \theta_a < 1200\ ^{o}C$:

$$\lambda_a = 27{,}3\ \left[W / mK\right] \tag{6}$$

De acordo com este documento, o material diminui o valor de condutividade com o aumento de temperatura, até ao limite de 800ºC. A partir desse valor, a condutividade pode ser considerada constante e independente da temperatura ($27{,}3\ \left[W / mK\right]$).

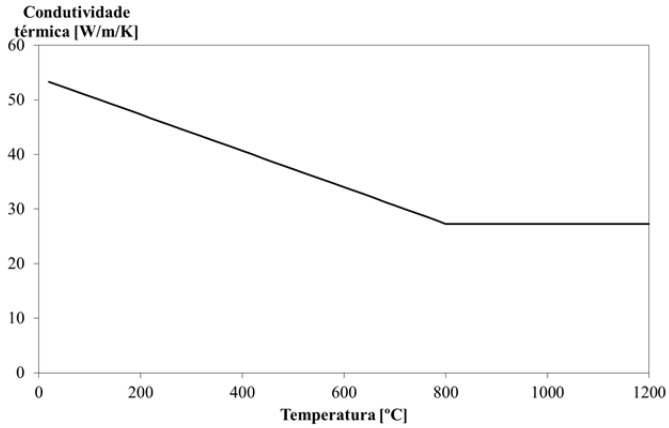


Figura 3 - Condutividade térmica do aço.

3.2 Aço das armaduras do betão armado.

3.2.1 Propriedades mecânicas.

O aço das armaduras do betão armado (S500 NR Classe B) tem a sua caracterização nominal de resistência descrita no Eurocódigo EN1992-1-1 [17]. Na Tabela 3 são apresentadas as propriedades nominais deste material.

Tabela 3 - Características nominais do aço S500.

E [GPa]	f_y [MPa]	k	f_u=k.f_y [MPa]
200	500	1,08	540

Para altas temperaturas segundo o Eurocódido EN 1992-1-2 [18], definem-se fatores de redução das características mecânicas ver Tabela 4. Estes fatores relacionam o valor da propriedade à temperatura do ensaio com o valor da propriedade à temperatura ambiente, tanto para o valor máximo da tensão $f_{sy,\theta}$, como para o valor de tensão limite de proporcionalidade $f_{sp,\theta}$ e para o valor do módulo de elasticidade $E_{s,\theta}$.

Tabela 4 - Coeficientes de redução (Classe N) das propriedades mecânicas do aço laminado a quente para betão armado a temperaturas elevadas.

Temperatura do aço θ_a [°C]	$\frac{f_{sy,\theta}}{f_{yk}}$	$\frac{f_{sp,\theta}}{f_{yk}}$	$\frac{E_{s,\theta}}{E_s}$
20	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00
200	1,00	0,81	0,90
300	1,00	0,61	0,80
400	1,00	0,42	0,70
500	0,78	0,36	0,60
600	0,47	0,18	0,31
700	0,23	0,07	0,13
800	0,11	0,05	0,09
900	0,06	0,04	0,07
1000	0,04	0,02	0,04
1100	0,02	0,01	0,02
1200	0,00	0,00	0,00

Para a caracterização experimental foram efetuados dois ensaios com provetes com o aço de diâmetro 8 mm segundo a norma a ISO 6892-1:2009 [16], ver Figura 4. Obtendo-se os resultados da tabela seguinte.

Tabela 5 - Resultados experimentais das características mecânicas do aço das armaduras de betão armado.

Ensaio nº	E [GPa]	$R_{p0,2\%}$ [MPa]	ReH [MPa]	ReL [MPa]	Rm [MPa]	At [%]
PR1	201,184	528,514	539,416	524,893	638,112	25,650
PR2	205,403	521,472	523,600	516,757	615,035	24,660
Média	203,294	524,993	531,508	520,825	626,574	25,155
Desv. Padrão	2,110	3,521	7,908	4,068	11,539	0,495

E - Módulo de Elasticidade, $R_{p0,2\%}$ - Tensão aos 0,2% de extensão, ReH - Tensão de cedência máxima, ReL - Tensão de cedência mínima, Rm - Tensão de rotura, At - Extensão total no momento da rotura.

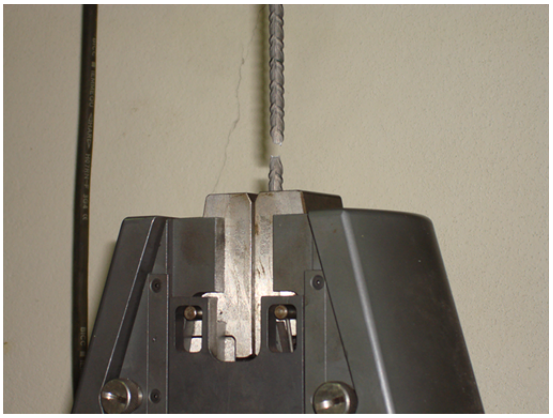


Figura 4 - Ensaio rotura à tração.

3.3 Betão.

A composição do betão foi efetuada segundo a norma EN NP 206-1:2007 [19], utilizando o método de Faury. A análise granulométrica dos agregados utilizados foi obtida através do método de peneiração segundo a norma EN NP 933-1:1997 [20], encontrando-se as curvas granulométricas no anexo A - materiais. O cimento utilizado foi o Portland de Calcário CEM II/B-L 32,5N. Obtendo-se para o betão de classe de resistência C20/25 as seguintes quantidades dos componentes por 1 m^3 de betão.

Tabela 6 - Composição do betão.

Componentes por [m3] betão				
Areia 0/4 [kg]	Brita 4/6 [kg]	Água [l]	Cimento [kg]	Água / Cimento [%]
1322,7	451,1	198	466,7	45

3.3.1 Propriedades mecânicas.

A caracterização da resistência nominal do betão, para a temperatura ambiente, está definida no Eurocódigo EN1992-1-1 [17]. No Eurocódigo EN1992-1-2 [18] define as propriedades para temperaturas elevadas.

A resistência do betão à temperatura ambiente é definida no ponto 3.1.2 do Eurocódigo EN1992-1-1 [17] e são apresentadas na tabela seguinte as propriedades de resistência do betão com classe de resistência C20/25.

Tabela 7 - Características nominais do betão C20/25.

f_{ck} [MPa]	$f_{ck,cube}$ [MPa]	f_{cm} [MPa]	f_{ctm} [MPa]	E_{cm} [GPa]	ε_{c1} [‰]	ε_{cu1} [‰]
20	25	28	2,2	30	2,0	3,5

f_{ck} - Valor característico da resistência à compressão em provetes cilíndricos, $f_{ck,cube}$ - Valor característico da resistência à compressão em provetes cúbicos, f_{cm} - Tensão média de rotura à compressão, f_{ctm} - Tensão média de rotura à tração, E_{cm} - Valor médio do módulo de Elasticidade, ε_{c1} - Extensão correspondente à tensão máxima, ε_{cu1} - Extensão correspondente à tensão última.

Para altas temperaturas, segundo o Eurocódido EN 1992-1-2 [18], definem-se fatores de redução das características mecânicas do betão para ter em conta o efeito das temperaturas elevadas, ver Tabela 8.

Tabela 8 - Coeficientes de redução das propriedades mecânicas do betão a temperaturas elevadas.

Temperatura do betão $\theta\,[^{\circ}C]$	Agregados siliciosos		
	$\frac{f_{c,\theta}}{f_{ck}}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$
20	1,00	0,0025	0,0200
100	1,00	0,0040	0,0225
200	0,95	0,0055	0,0250
300	0,85	0,0070	0,0275
400	0,75	0,0100	0,0300
500	0,60	0,0150	0,0325
600	0,45	0,0250	0,0350
700	0,30	0,0250	0,0375
800	0,15	0,0250	0,0400
900	0,08	0,0250	0,0425
1000	0,04	0,0250	0,0450
1100	0,01	0,0250	0,0475
1200	0,00	-	-

f_{ck} - valor característico da resistência à compressão à temperatura ambiente; $f_{c,\theta}$ - valor característico da resistência à compressão a temperatura elevadas; $\varepsilon_{c1,\theta}$ - valor da deformação correspondente ao valor máximo da resistência; $\varepsilon_{cu1,\theta}$ - valor da deformação máxima à compressão.

A redução do valor de resistência à tração do betão a temperaturas elevadas $f_{ck,t(\theta)}$ é obtida pelo coeficiente $k_{c,t(\theta)}$, segundo a expressão seguinte.

$$f_{ck,t(\theta)} = k_{c,t(\theta)}\, f_{ck,t} \tag{7}$$

Os valores de $k_{c,t(\theta)}$ a utilizar encontram-se nas duas expressões seguintes.

Para $20\ ^{\circ}C \le \theta \le 100\ ^{\circ}C$

$$k_{c,t(\theta)} = 1,0 \tag{8}$$

Para $100\ ^{\circ}C < \theta \le 600\ ^{\circ}C$

$$k_{c,t(\theta)} = 1,0 - 1,0\left(\theta - 100\right)/500 \tag{9}$$

Foram efetuados ensaios de rotura à compressão no betão, ver Figura 5, em provetes cúbicos e cilíndricos segundo a norma EN NP 206-1:2007 [19]. Na tabela seguinte serão apresentados os resultados dos ensaios em função do número de dias de cura.



Figura 5 - Ensaio de rotura à compressão.

Tabela 9 - Ensaio rotura à compressão.

Provete (tipo)	Cura [dias]	Peso [kg]	Máxima força [kN]	Tensão última [MPa]	Área [mm^2]
1 (cubo)	36	7,50	540,98	24,04	22500
2 (cubo)	36	7,50	540,44	24,02	22500
3 (cubo)	36	7,50	534,73	23,77	22500
4 (cubo)	36	7,50	542,09	24,09	22500
Média				23,98	
Desv. padrão				0,12	
1 (cubo)	29	7,40	502,15	22,32	22500
2 (cubo)	29	7,35	495,96	22,04	22500
3 (cubo)	29	7,40	449,96	20,00	22500
Média				21,45	
Desv. padrão				1,03	
1 (cilindro)	29	11,35	358,20	20,27	17671
2 (cilindro)	29	11,30	367,07	20,77	17671
3 (cilindro)	29	11,25	354,33	20,05	17671
Média				20,36	
Desv. padrão				0,30	

3.3.2 Propriedades térmicas.

O calor específico do betão segundo o Eurocódigo EN1992-1-2 [18] deverá ser determinado pelas seguintes expressões para teor de água ($u = 0$ %).

- para $20\ ^\circ C \le \theta < 100\ ^\circ C$:

$$c_p(\theta) = 900\ \left[J/kgK\right] \tag{10}$$

- para $100\ ^\circ C \le \theta < 200\ ^\circ C$:

$$c_p(\theta) = 900 + (\theta - 100)\ \left[J/kgK\right] \tag{11}$$

- para $200\ ^\circ C \le \theta < 400\ ^\circ C$:

$$c_p(\theta) = 1000 + (\theta - 200)/2\ \left[J/kgK\right] \tag{12}$$

- para $400\ ^\circ C \le \theta < 1200\ ^\circ C$:

$$c_p(\theta) = 1100\ \left[J/kgK\right] \tag{13}$$

Quando o teor de água não é explicitamente considerado no método de cálculo, a função indicada para o calor específico do betão com agregados siliciosos ou calcários poderá ser modelada por um valor constante, "Cp.peak", situado entre 100 °C e 115 °C e decrescente linearmente entre 115 °C e 200 °C.

$$c_{p.peak} = 900 \ \left[J / kg / K \right] \ , \ u = 0\% \tag{14}$$

$$c_{p.peak} = 1470 \ \left[J / kg / K \right] \ , \ u = 1{,}5\% \tag{15}$$

$$c_{p.peak} = 2020 \ \left[J / kg / K \right] \ , \ u = 3\% \tag{16}$$

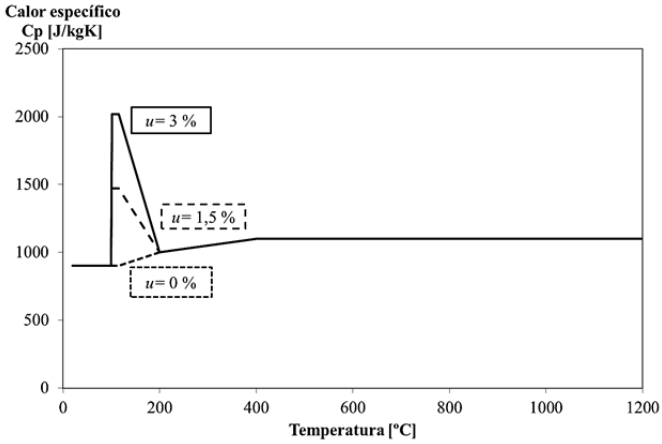


Figura 6 - Calor específico do betão.

Este modelo permite acomodar o efeito de vaporização das moléculas de água (humidade).

A condutividade térmica é determinada a partir do Eurocódigo EN1992-1-2 [18], seguindo a seguinte expressão.

- para $20 \ ºC \le \theta < 1200 \ ºC$:

$$\lambda_c = 2 - 0{,}2451\left(\theta / 100\right) + 0{,}0107\left(\theta / 100\right)^2 \ \left[W / mK \right] \tag{17}$$

A expressão (17) descreve o comportamento do limite superior da condutividade. O documento em referência também apresenta uma fórmula para o limite inferior em função da temperatura do material (θ).

Na Figura 7 está representada a variação da condutividade com a temperatura.

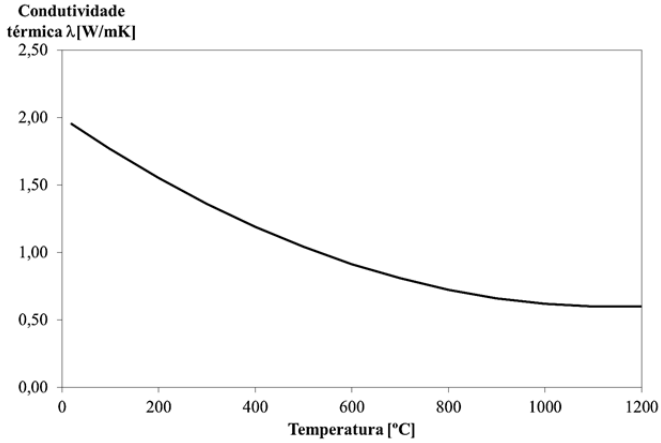


Figura 7 - Condutividade térmica do betão (limite superior).

A massa volúmica do betão vária com a temperatura, influenciada pela perda de água. No Eurocódigo EN1992-1-2 [18] são definidas as expressões que se seguem.

- para $20\ ^\circ C \le \theta < 115\ ^\circ C$:

$$\rho(\theta) = \rho(20\ ^\circ C) \tag{18}$$

- para $115\ ^\circ C < \theta \le 200\ ^\circ C$:

$$\rho(\theta) = \rho(20\ ^\circ C) \times (1 - 0,02(\theta - 115)/85) \tag{19}$$

- para $200\ ^\circ C < \theta \le 400\ ^\circ C$:

$$\rho(\theta) = \rho(20\ ^\circ C) \times (0,98 - 0,03(\theta - 200)/200) \tag{20}$$

- para $400\ ^\circ C < \theta \le 1200\ ^\circ C$:

$$\rho(\theta) = \rho(20\ ^\circ C) \times (0,95 - 0,07(\theta - 400)/800) \tag{21}$$

Na Figura 8 está representada a variação desta propriedade com a temperatura.

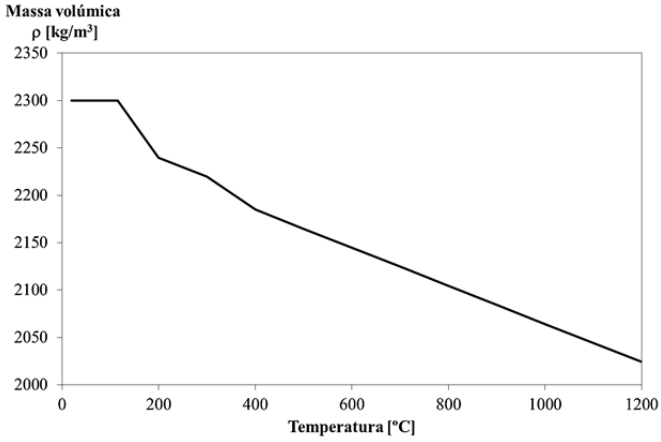


Figura 8 - Massa volúmica do betão.

4 ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE VIGAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS COM BETÃO À FLEXÃO.

4.1 Introdução.

Todas as vigas foram submetidas a ensaios de flexão em quatros pontos. Foram utilizados dois apoios de forquilha separados por "Ls" e dois pontos de carga separados por "Lc". Foram utilizados dois comprimentos diferentes, para a mesma secção do perfil laminado, quatro níveis de temperatura e duas condições de adesão dos estribos com a alma do perfil (W - soldado e NW - não soldado). As vigas foram agrupadas em dois grandes grupos (vigas médias e vigas grandes). A série média utilizou um comprimento entre apoios "Ls" de 2,4 m e a série grande utilizou um comprimento "Ls" de 3,9 m.

As vigas foram agrupadas em 10 séries, sujeitas às condições de ensaio definidas na Tabela 10, utilizando uma repetibilidade de três amostras, com exceção das séries 9 e 10. Na mesma tabela estão indicadas as vigas correspondentes às 10 séries, bem como as suas características e condições de ensaio.

Tabela 10 - Séries de ensaios.

Séries	Viga	Comprimento Ls [m]	Estribos [W/NW]	Temp. [ºC]	Max. Imp [mm]	Max. Imp. Rel.
1	B/2.4-01	2,4	W	400	2	L/1250
	B/2.4-02				2	L/1250
	B/2.4-03				2	L/1250
2	B/2.4-04	2,4	W	200	1	L/2500
	B/2.4-05				2	L/1250
	B/2.4-06				1	L/2500
3	B/2.4-07	2,4	NW	400	1	L/2500
	B/2.4-08				1	L/2500
	B/2.4-09				1	L/2500
4	B/2.4-10	2,4	W	Ambiente	2	L/1250
	B/2.4-11				0,5	L/5000
	B/2.4-12				3	L/833
5	B/2.4-11A	2,4	-	Ambiente	1	L/2500
	B/2.4-12A				2	L/1250
6	B/3.9-01	3,9	W	400	2	L/2000
	B/3.9-02				5	L/800
	B/3.9-03				3	L/1333
7	B/3.9-04	3,9	W	600	2	L/2000
	B/3.9-05				2	L/2000
	B/3.9-06				5	L/800
8	B/3.9-07	3,9	NW	400	5	L/800
	B/3.9-08				5	L/800
	B/3.9-09				2	L/2000
9	B/3.9-11	3,9	W	Ambiente	2	L/2000
	B/3.9-12				5	L/800
10	B/3.9-11A	3,9	-	Ambiente	1	L/4000
	B/3.9-12A				3	L/1333

Nos ensaios realizados à temperatura ambiente, foram efetuadas medições de deformação nos pontos fundamentais para caracterização do estado de plasticidade. Foram ainda medidos dois deslocamentos laterais e um deslocamento transversal na secção S2, ver Figura 10. Com esta informação foram calculados os deslocamentos laterais e verticais do centróide da secção, assim como a rotação da secção. Foram efetuadas medições de força nos quatro pontos que caracterizam este tipo de ensaio (carga e reação). Foi decidido utilizar o valor médio das cargas medidas nos cilindros hidráulicos ("load"), ver Figura 9.

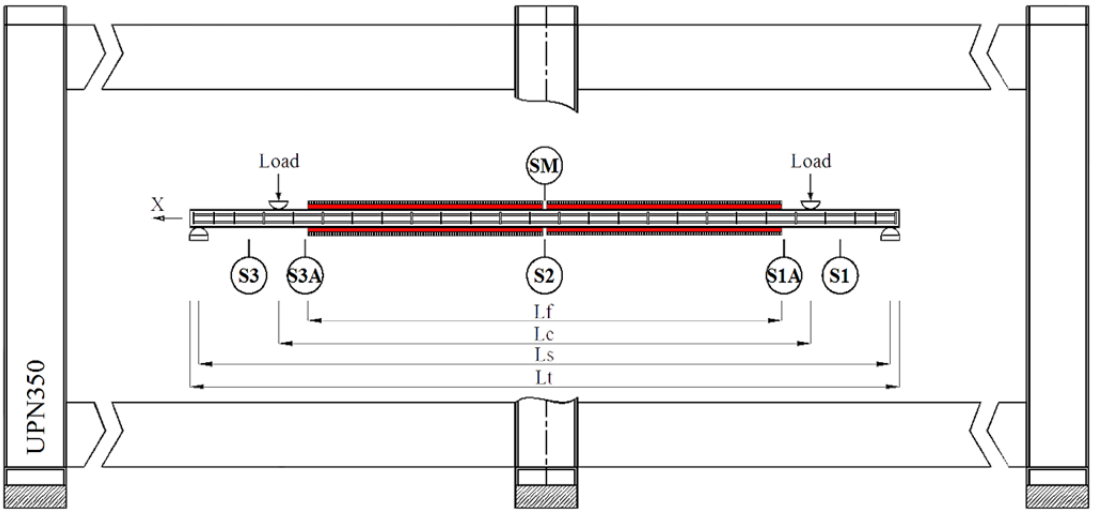


Figura 9 - Pórtico de reação para ensaio de vigas à flexão em 4 pontos.

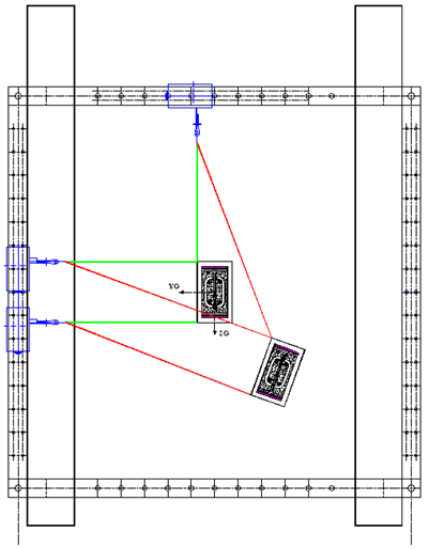


Figura 10 - Posição dos transdutores de medição de deslocamentos.

Nos ensaios realizados a temperaturas elevadas, não foram medidas as deformações. Para além das medições atrás referidas, foram medidas as temperaturas em pontos característicos da secção e em várias secções (S1A, S2, S3, e S3A), ver Figura 11.

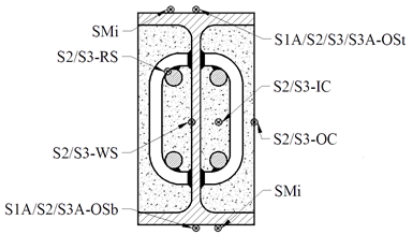


Figura 11 - Instrumentação PEB com termopares a temperaturas elevadas.

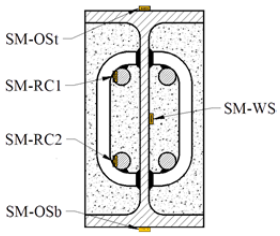


Figura 12 - Instrumentação PEB com extensómetros a temperatura ambiente.

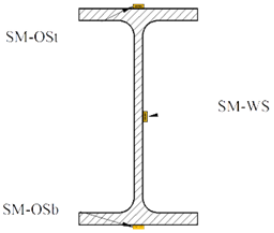


Figura 13 - Instrumentação IPE com extensómetros a temperatura ambiente.

As comparações que se propuseram efetuar foram entre séries com diferentes níveis de temperatura para PEB, com a mesma temperatura mas diferente condições de adesão e para ensaios a temperatura ambiente para diferentes secções (PEB, IPE). Foram efetuadas 6 tipos diferentes de comparação, ver Tabela 11.

Tabela 11 - Comparação de séries de ensaios.

Comparação	Séries	Comprimento Ls [m]	Variações
I	1, 2 e 4	2,4	Temperatura (400/200/Ambiente) °C
II	1 e 3		Estribos (W ou NW)
III	4 e 5		Secção (PEB ou IPE)
IV	6, 7 e 9	3,9	Temperatura (400/600/Ambiente) °C
V	6 e 8		Estribos (W ou NW)
VI	9 e 10		Secção (PEB ou IPE)

Todos os resultados individuais de cada ensaio encontram-se no anexo B - Fichas técnicas dos ensaios.

4.2 Preparação das vigas para ensaio.

4.2.1 Ensaios à temperatura ambiente.

A preparação das vigas começou com o corte das vigas em serrote mecânico no comprimento "Lt" de 2,5 m e de 4,0 m. De seguida procedeu-se a montagem dos estribos, previamente fabricados, nas vigas PEB. Foi utilizado um processo de soldadura MAG dos estribos à alma do perfil IPE, ver Figura 14. Colocaram-se os extensómetros nos pontos definidos da secção S2, utilizando uma proteção de verniz e de uma massa especial contra humidade, ver Figura 16 e Figura 17.

Procedeu-se à betonagem no laboratório em duas fases, primeiro de um dos lados do espaço entre os banzos do IPE e posteriormente procedeu-se à betonagem do lado oposto, com um intervalo de 7 dias, ver Figura 18 e Figura 19. Os ensaios foram realizados após 60 dias da primeira betonagem.

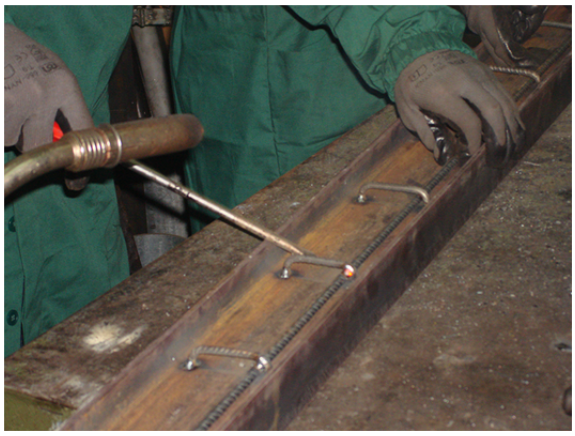


Figura 14 - Soldadura de estribos.

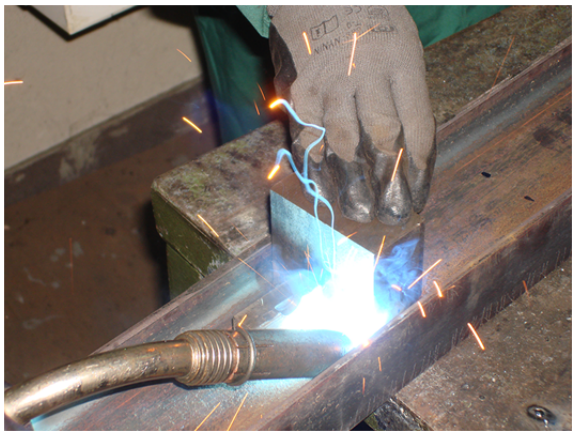


Figura 15 - Soldadura de estribos.

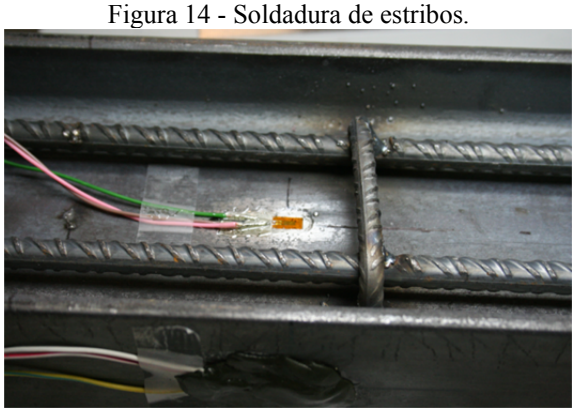


Figura 16 - Extensometria no IPE.

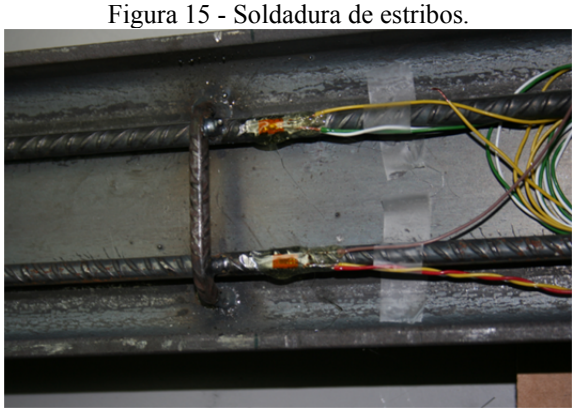


Figura 17 - Extensometria no reforço.



Figura 18 - Betonagem das vigas.



Figura 19 - Vigas após betonagem.

Antes do ensaio foi efetuada a limpeza do betão e sujidade no banzo do perfil IPE. Depois foram efetuadas medições das imperfeições geométricas utilizando o método do feixe laser, ver Figura 20. Os dados das imperfeições geométricas de todas as vigas ensaiadas encontram se no anexo B - Fichas técnicas dos ensaios. Para as vigas médias foram efetuadas 7 medições e para as vigas grandes foram efetuadas 9 medições, de acordo com as posições representadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Posição das medições das imperfeições geométricas.

Posição (X) [m]	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9
Série média (Ls 2,4 m)	0,05	0,5	1,0	1,25	1,5	2,0	2,45	-	-
Série grande (Ls 3,9 m)	0,05	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	3,95



Figura 20 - Medição das imperfeições geométricas.

4.2.2 Ensaios a temperaturas elevadas.

A preparação das vigas para os ensaios a temperaturas elevadas efetuou-se de maneira similar às vigas para os ensaios à temperatura ambiente. Repetindo os mesmos passos, com exceção da colocação dos extensómetros. Os banzos do perfil foram limpos e as imperfeições geométricas foram medidas. Foi colocada a viga no pórtico de reação e foram colocados os termopares do tipo "K" em pontos característicos de várias secções (S1A, S2, S3A e S3), ver Figura 11 e Figura 9. Os termopares foram soldados ao perfil e às anilhas em aço embebidas na superfície do betão.

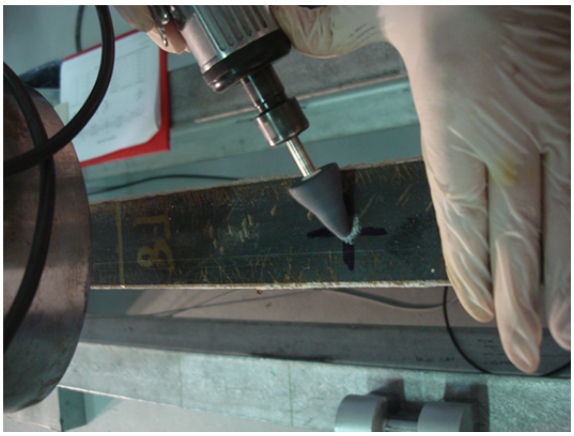


Figura 21 - Preparação do perfil para soldadura de termopar.

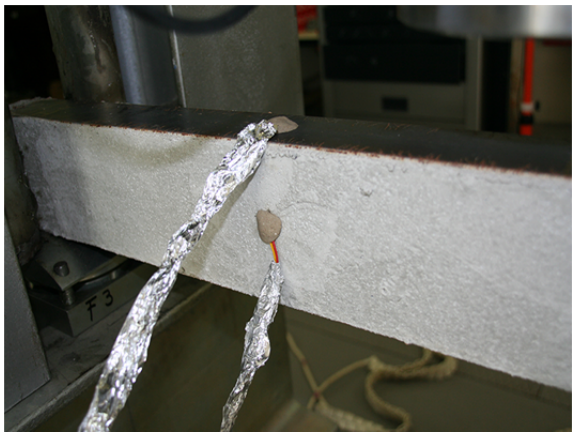


Figura 22 - Termopares protegidos com massa térmica

4.3 Procedimentos de ensaios.

Colocou-se a viga na posição correta em cima dos apoios no pórtico de ensaio, depois de verificado que os sensores das células dos apoios estavam soltos e registavam uma carga nula. Nos ensaios à temperatura ambiente procedeu-se a instalação do sistema para

monitorização dos deslocamentos horizontais e um vertical, ligou-se os extensómetros ao computador de aquisição de dados. Foram verificados então se os dispositivos de medição estavam operacionais.

Foi sincronizado a hora de aquisição dos computadores para os vários sensores, foram montados os blocos metálicos para transmissão das forças dos cilindros hidráulicos à viga, colocando uma película de Politetrafluoretileno (PTFE). Esta película tem como objectivo de diminuir o atrito entre as interfaces bloco e do cilindro hidráulico e portanto não restringir o deslocamento lateral. Vulgarmente conhecido pela marca comercial "teflon", sendo o material com o terceiro mais baixo coeficiente de atrito de todos os materiais sólidos conhecidos [30]. O ensaio foi efetuado com pequenos incrementos da carga, de forma quase estática, registando a evolução das quantidades medidas ate ao final do ensaio.

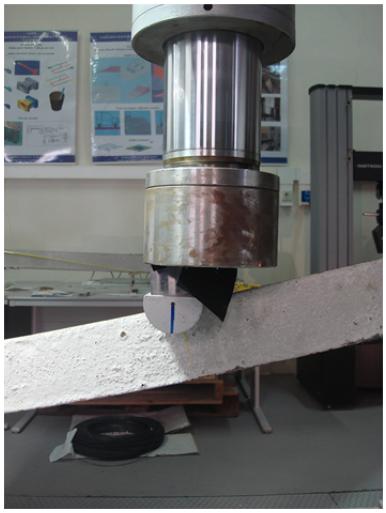


Figura 23 - Interface bloco/cilindro hidráulico com película de "teflon".

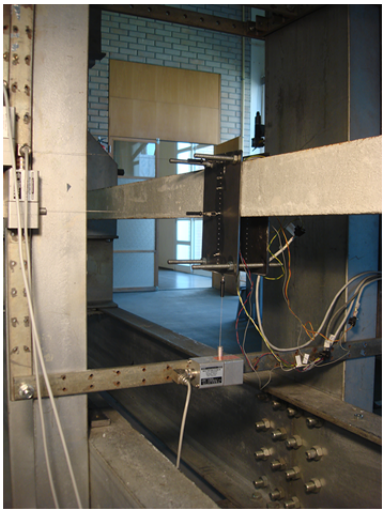


Figura 24 - Instrumentação de medição de deslocamentos.

Nos ensaios a temperaturas elevadas foi colocada a manta de fibra cerâmica para garantir a taxa de aquecimento e o regime estacionário (temperatura constante). Este isolamento foi fixado através de arame queimado, foram instalados os transdutores de deslocamento para monitorização dos deslocamentos horizontais e vertical, ligou-se os termopares ao sistema de aquisição de dados (MGCplus).



Figura 25 - Fixação de resistência cerâmica.

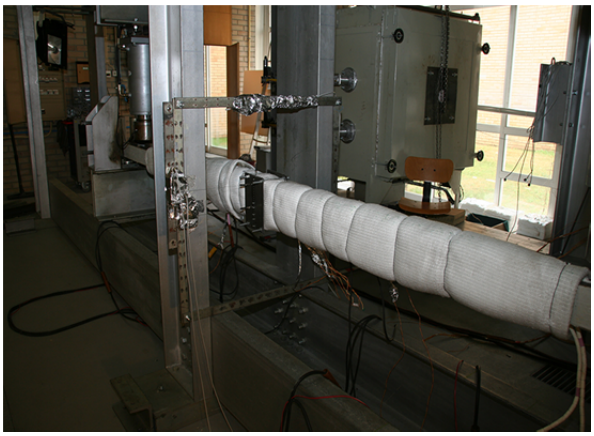


Figura 26 - Manta de fibra cerâmica.

O Aquecimento foi produzido com uma taxa de 800 °C por hora. Foi utilizado um sistema de aquecimento elétrico, com resistências cerâmicas que funcionam por efeito de joule, ver Figura 25. O sistema de aquecimento (HTC) possui 70 KVA de potência máxima. O aquecimento foi controlado por o HTC, no caso das vigas da série média, através de 2 termopares, no topo (M1) e na base (M2) da secção média e no caso das vigas da série grande, através de 4 termopares, em duas secções a ¼ e a ¾ do comprimento de aquecimento "Lf", no topo (M1 e M2) e na base (M3 e M4).

Os suportes foram ajustados e carga foi aplicada de forma incremental quase estática, após a estabilização da temperatura (60, 90 e 120 minutos para nível de temperatura de 200°C, 400°C e 600°C, respectivamente) depois do início do aquecimento. Os ensaios foram dados por concluídos quando se verificaram deslocamentos muito grandes.

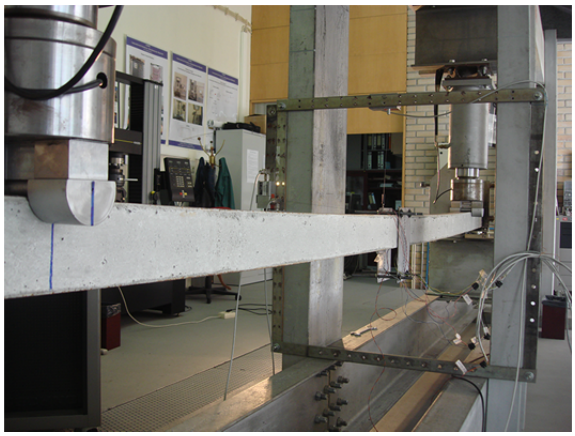


Figura 27 - Início do ensaio (B/3.9-11).

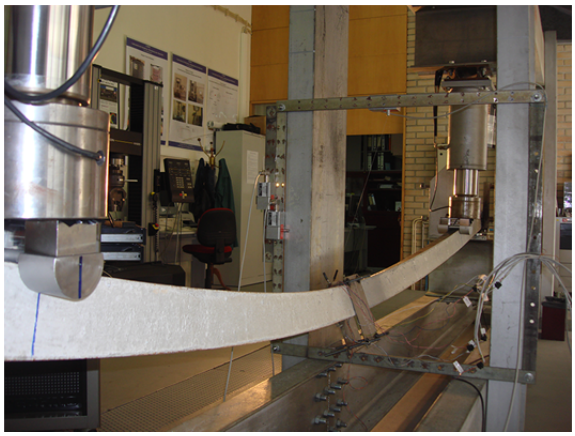


Figura 28 - Fim do ensaio (B/3.9-11).

4.4 Evolução da temperatura na secção e no comprimento da viga.

A distribuição da temperatura não é constante ao longo da viga, devido às perdas de calor por condução do interior para o exterior e também por inexistência de isolamento térmico nas extremidades da viga.

Nas secções seguintes, é representada as distribuições de temperatura para três instantes de tempo, correspondendo a duas fases do processo (estágio 1 - transiente, estágio 2 - regime permanente). A evolução de temperatura nos termopares pode ser consultada no anexo B - fichas técnicas dos ensaios.

4.4.1 Vigas série média.

Na série 1, ver Figura 29, no ensaio B/2.4-01 o computador que registra as temperaturas, bloqueou na fase inicial do ensaio. No instante compreendido entre 1100 e 1800 segundos o ensaio B/2.4-03 registou um atraso no aquecimento, mas aos 5600 segundos estabilizou próximo dos 400°C, como pretendido. O gradiente existente nas extremidades da viga está relacionado com o comprimento de aquecimento "Lf", com o deficiente isolamento nas extremidades e com a condução de calor na direção longitudinal.

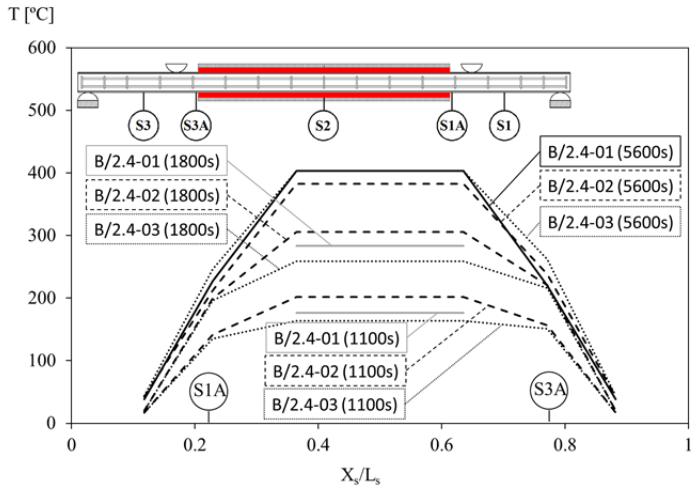


Figura 29 - Evolução da temperatura série 1.

Na série 2, ver Figura 30, nos instantes 700 e 1000 segundos a evolução da temperatura foi semelhante para os 3 ensaios, mas no instante 3600 segundos as temperaturas dos 3 ensaios demonstram ser muito próximas dos 200 °C como pretendido. O gradiente de temperatura pode ser explicado pelas mesmas razões apresentadas para os resultados da série 1.

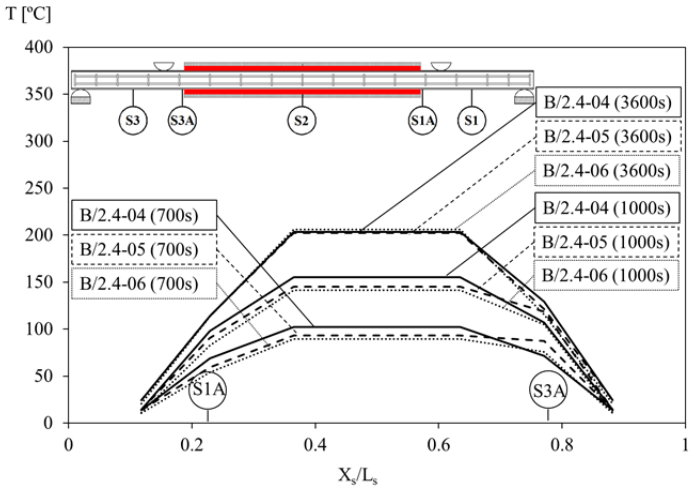


Figura 30 - Evolução da temperatura série 2.

Na evolução das temperaturas na série 3, ver Figura 31, verificou-se um atraso significativo de aquecimento no ensaio B/2.4-07 nos instantes compreendidos entre de 1100 e 1800 segundos. Conseguindo se atingir o nível de temperatura pretendido aos 5600 segundos.

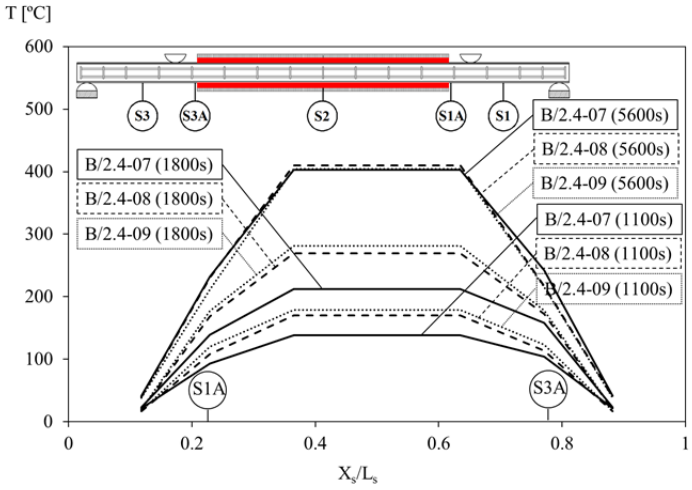


Figura 31 - Evolução da temperatura série 3.

4.4.2 Vigas série grande.

A evolução da temperatura na série 6, ver Figura 32, deu-se com alguma diferença no aquecimento nas extremidades da viga, pressupõem-se que ocorreu devido à utilização de 2 pares de resistências cerâmicas controladas independentemente. No ensaio B/3.9-03 foi registado um nível de temperatura mais elevado que nos outros 2 ensaios da série para o período de tempo compreendido entre 1100 e 1800 s. No instante de 5600 segundos, a temperatura dos 3 ensaios manteve-se aproximadamente igual e no nível pretendido (400 °C).

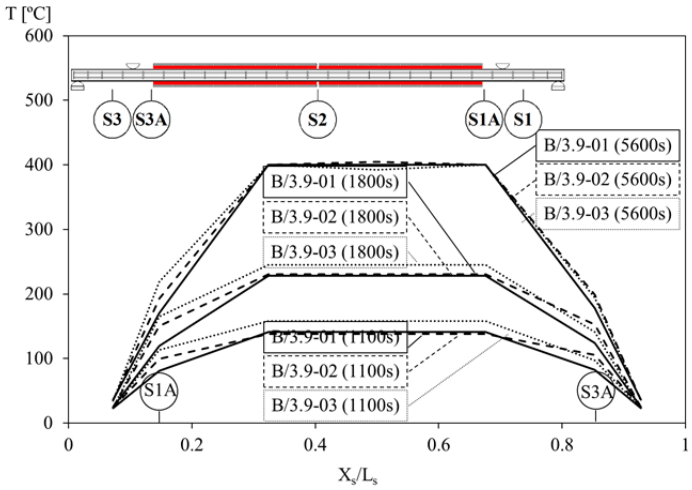


Figura 32 - Evolução da temperatura série 6.

Na série 7, ver Figura 33, a evolução da temperatura no ensaio B/3.9-05 foi mais rápida relativamente aos outros ensaios desta série. Nos instantes de tempo compreendidos entre 1600 e 2300 segundos a temperatura geral da viga era superior. No instante 7200 segundos verifica-se a mesma tendência, com uma temperatura ligeiramente superior aos outros 2 ensaios.

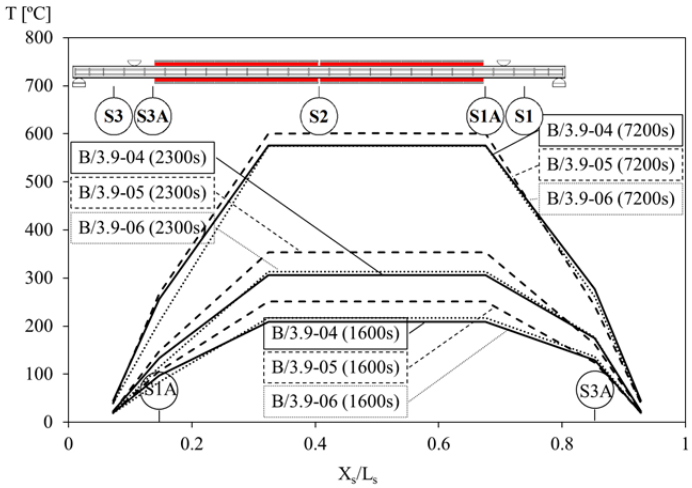


Figura 33 - Evolução da temperatura série 7.

Na série 8, ver Figura 34, ocorreu um atraso significativo no aquecimento da viga B/3.9-08, registando no instante 1800 segundos uma diferença de aproximadamente 60ºC relativamente à temperatura atingida pelos outros 2 ensaios. No instante de tempo de 5600 segundos a diferença de temperaturas tornou-se residual. No ensaio B/3.9-09 foi verificado um aumento de temperatura relativamente ao valor definido para o estágio do regime permanente.

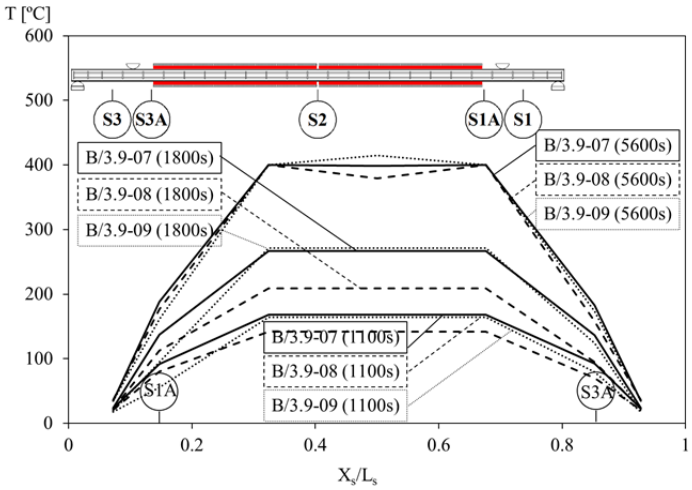


Figura 34 - Evolução da temperatura série 8.

4.5 Ensaios de resistência à flexão.

Neste capítulo serão apresentados os resultados do comportamento mecânico das vigas. Serão apresentados três tipos de gráficos para avaliar o comportamento do deslocamento transversal, do deslocamento lateral e o comportamento da rotação da secção. Estes valores estão definidos para o centro de gravidade da secção, com base nas medições efetuadas para transdutores D1,D2 e D4. Estes deslocamentos foram convertidos com base nas relações geométricas definidas na Figura 35.

4.5.1 Procedimento de cálculo do deslocamento do centro de massa através da medição dos deslocamentos.

Para o cálculo dos deslocamentos transversal e lateral do centro de massa da secção "SM" da viga parcialmente embebida com betão, utilizou-se os valores dos deslocamentos medidos através dos transdutores. O movimento da secção da viga está representado na Figura 35.

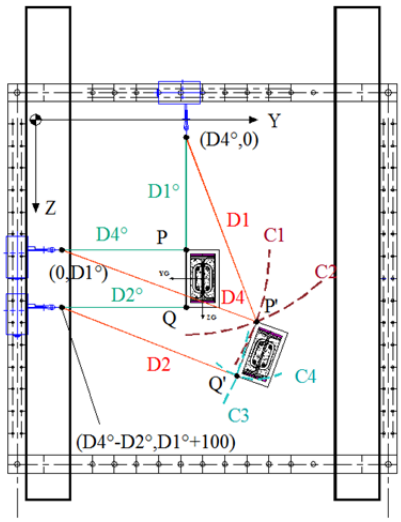


Figura 35 - Determinação da posição sucessiva do centro de massa (YG, ZG).

Nesta figura estão representadas as posições iniciais dos transdutores de deslocamentos (D1º, D2º e D4º). As posições finais dos mesmos pontos, correspondentes ao incremento de carga estão representadas pelas posições (D1, D2 e D4). As leituras dos transdutores serão dadas pelas diferenças entre a posição sucessivas da secção e a posição inicial, ver equação seguinte.

$$d_i = D_i - D_i^0 \tag{22}$$

Pretende-se determinar o movimento da secção, em particular do ponto centro de massa, durante o procedimento incremental.

A equação da circunferência C1 é dada pela equação seguinte.

$$D_4^2 = \left(y_P - 0\right)^2 + \left(z_P - D_1^0\right)^2 \tag{23}$$

A equação da circunferência C2 é definida pela equação seguinte.

$$D_1^2 = \left(y_P - D_4^0\right)^2 + \left(z_P - 0\right)^2 \tag{24}$$

Estas duas equações permitem a determinação da posição do ponto P'. Esta solução resulta numa equação do segundo grau, cuja solução deve ser cuidadosamente escolhida, uma vez que a intersecção das duas curvas é realizada em dois pontos distintos. A equação que permite a determinação do ponto P' será dada pela equação seguinte.

$$a_P.y_P^2 + b_P.y_P + c_P = 0 \tag{25}$$

A posição do ponto Q' deverá ser efetuada de forma semelhante, utilizando o método de intersecção das curvas C3 e C4. Este método obriga que sejam definidas as equações para as duas curvas e a resolução em simultâneo das equações.

A equação da circunferência C3 é dada pela equação seguinte.

$$100^2 = \left(y_Q - y_P\right)^2 + \left(z_Q - z_P\right)^2 \tag{26}$$

A equação da circunferência C4, é definida pela equação seguinte.

$$D_2^2 = \left(y_Q - \left(D_4^0 - D_2^0\right)\right)^2 + \left(z_Q - \left(D_1^0 + 100\right)\right)^2 \tag{27}$$

A equação que permite a determinação do ponto Q' será dada pela equação seguinte.

$$a_Q.y_Q^2 + b_Q.y_Q + c_Q = 0 \tag{28}$$

4.5.2 Comparação dos resultados para as vigas da série média.

4.5.2.1 Comparação I - diferentes níveis de temperatura.

Neste capítulo serão analisados os ensaios das séries 1,2 e 4, correspondentes ao conjunto de vigas médias (Ls=2,4 m). Esta comparação pretende avaliar o efeito dos três níveis de temperatura, 400 °C, 200 °C e ambiente. Os ensaios correspondentes a estes níveis de temperatura são: série 1, série 2 e série 4, respetivamente. O deslocamento transversal segue um comportamento linear em relação à carga, numa primeira fase. Depois dá-se início à plastificação da secção com a introdução de um comportamento não linear material e geométrico (grandes deslocamentos), ver Figura 36.

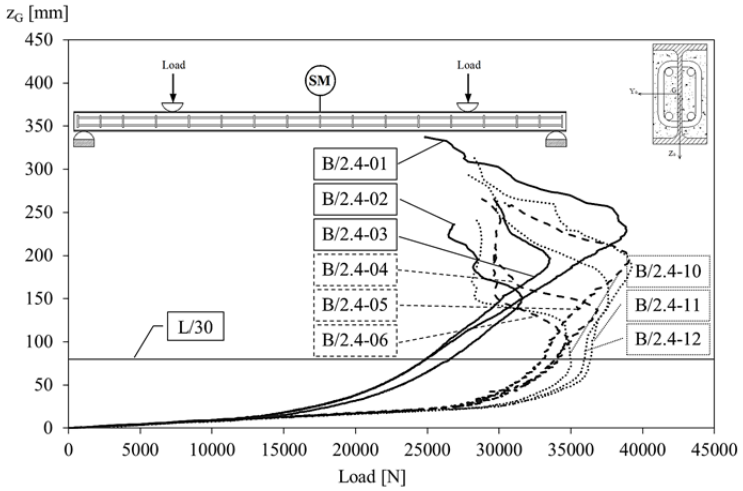


Figura 36 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM da comparação I.

Na Figura 37 estão representados os deslocamentos laterais da secção central.

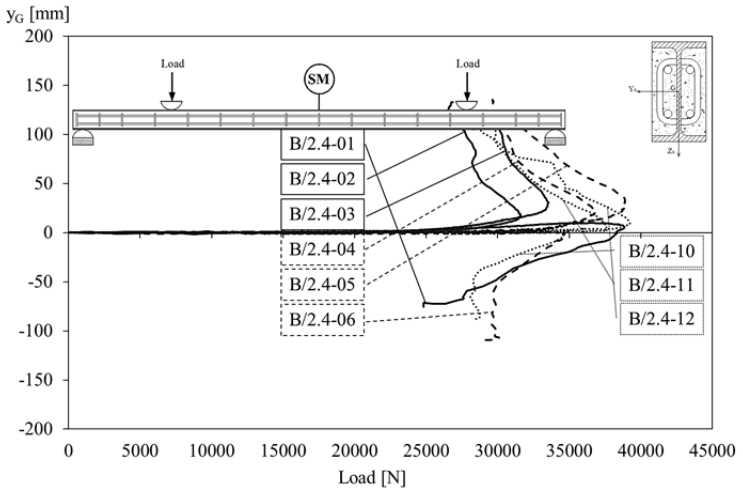


Figura 37 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM da comparação I.

Na Figura 38 é apresentada a rotação da secção para cada ensaio. Na fase inicial do ensaio a rotação é nula. Depois de se iniciar o deslocamento lateral, a rotação da secção também se verifica.

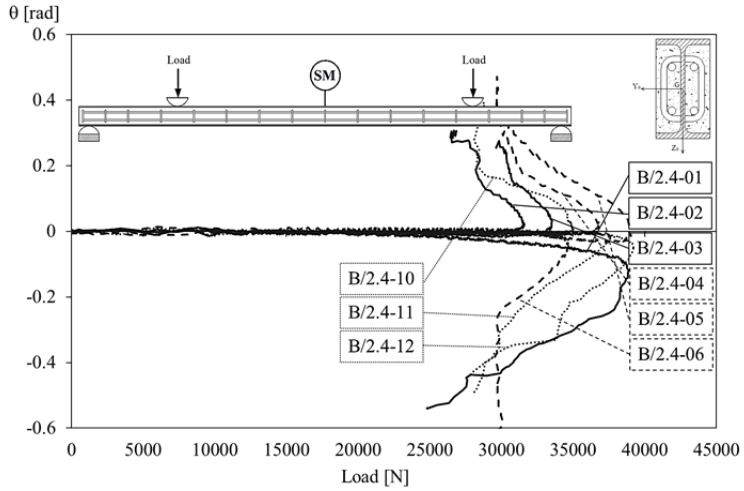


Figura 38 - Rotação da secção SM da comparação I.

4.5.2.2 Comparação II - diferentes tipos de ligação dos estribos.

Neste capítulo serão analisados os ensaios os ensaios das séries 1 e 3, correspondentes ao conjunto das vigas médias (Ls=2,4 m). Esta comparação pretende avaliar o tipo de ligação dos estribos com a alma do perfil. Na série 1, os estribos foram soldados (W) através de um processo MAG e também parcialmente soldados ao reforço longitudinal. Os estribos da série 3 foram simplesmente apoiados (NW) na alma. A ligação destes com os reforços também foi efetuada com arame queimado. Não se verificam diferenças significativas no comportamento das vigas, nem uma tendência significativa para uma maior resistência de um dos grupos.

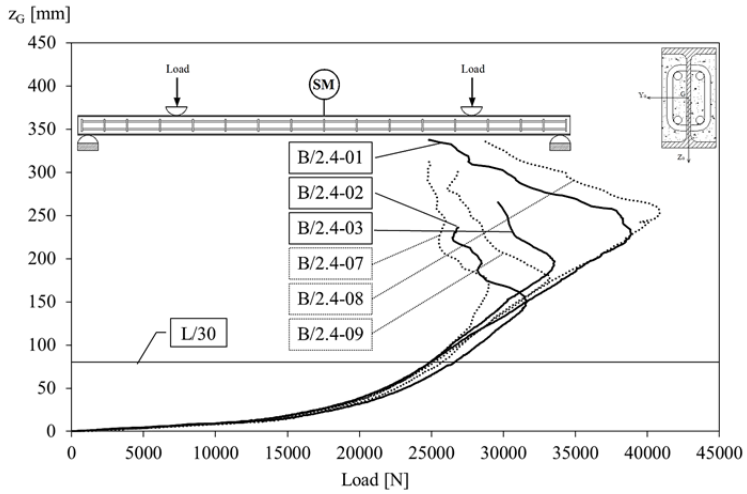


Figura 39 - Deslocamento vertical ZG da secção SM da comparação II.

Na Figura 40 está representado o deslocamento lateral. O comportamento é semelhante para ambos os grupos.

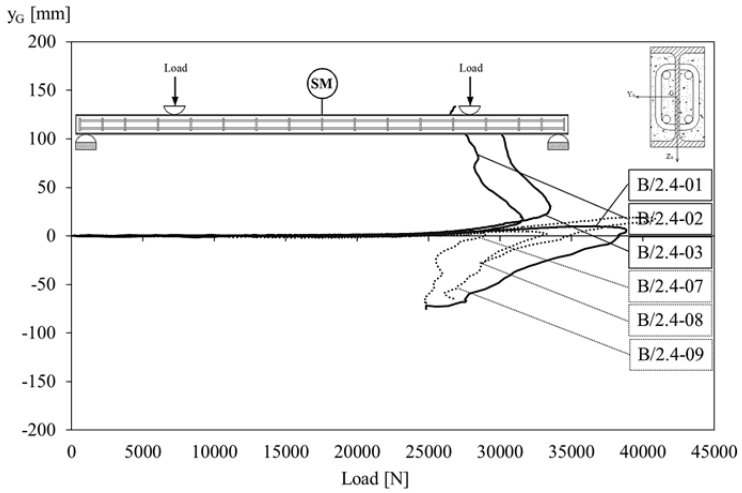


Figura 40 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM da comparação II.

Na Figura 41 está representada a rotação da secção. Neste caso os resultados parecem evidenciar que a secção com estribos soldados (W) possui menor rotação, em comparação com a série dos estribos não soldados (NW).

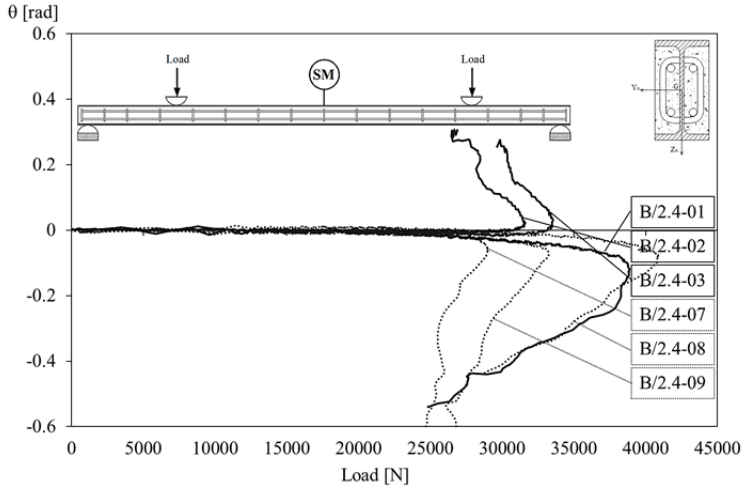


Figura 41 - Rotação da secção SM da comparação II.

4.5.2.3 Comparação III - entre vigas PEB e em aço.

Neste capítulo é apresentada a comparação dos ensaios das séries 4 e 5, também correspondentes do conjunto das vigas médias (Ls=2,4 m). Pretende-se comparar o comportamento das vigas mistas parcialmente embebidas com betão (PEB), em relação às vigas metálicas que utilizam o mesmo tipo de perfil. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente, tendo sido registada a evolução dos deslocamentos da secção média "SM", a rotação e as deformações da mesma secção.

Na Figura 42 está representado o comportamento do deslocamento transversal. Os ensaios da séria correspondente às vigas mistas PEB apresentam uma maior resistência e uma

rigidez inicial também superior (parte linear). Depois de se atingir o limite de proporcionalidade, as vigas metálicas diminuem bruscamente o valor da capacidade portante, enquanto as vigas PEB apresentam um aumento contínuo desta capacidade. O critério correspondente a L/30 permite concluir que as capacidades das vigas parcialmente embebidas possuem uma resistência muito superior (dobro em relação à secção metálica).

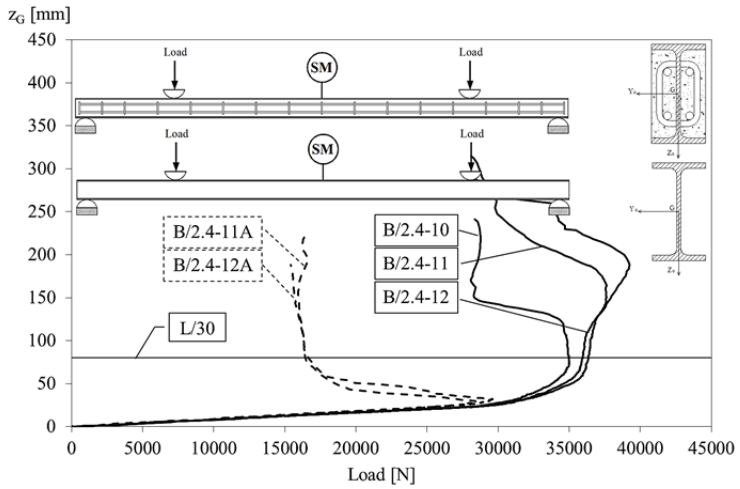


Figura 42 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM da comparação III.

Na Figura 43 está representado o deslocamento lateral. O comportamento de ambas as séries é semelhante.

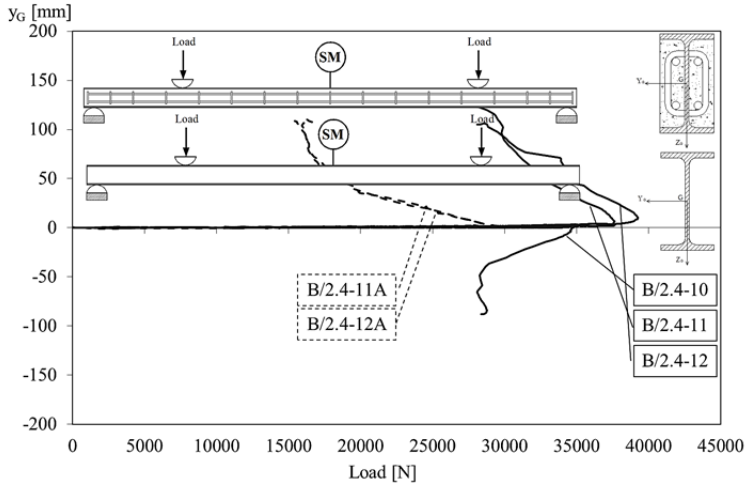


Figura 43 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM da comparação III.

Na Figura 44 está representada a rotação da secção, sendo evidente que as vigas metálicas sofrem maior rotação em comparação com as vigas PEB.

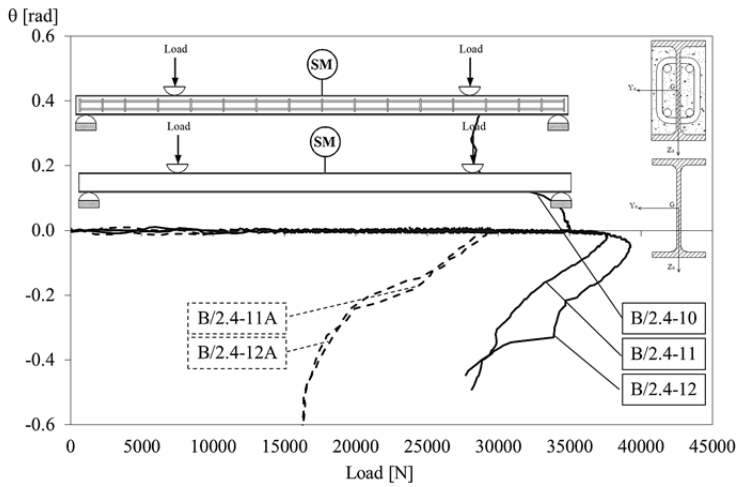


Figura 44 - Rotação da secção SM da comparação III.

Na Figura 45 e Figura 46 estão representadas as evoluções das deformações em pontos característicos de ambos os tipos de viga. As deformações medidas nas vigas PEB tem um comportamento monótono crescente (traço contínuo), enquanto as deformações medidas na viga metálica sofrem uma diminuição na parte final do ensaio. Também se verifica que a forma de deformação correspondente ao estado limite último, encurvadura lateral torsional (LTB), se deu com plastificação do aço do perfil, em ambas as vigas.

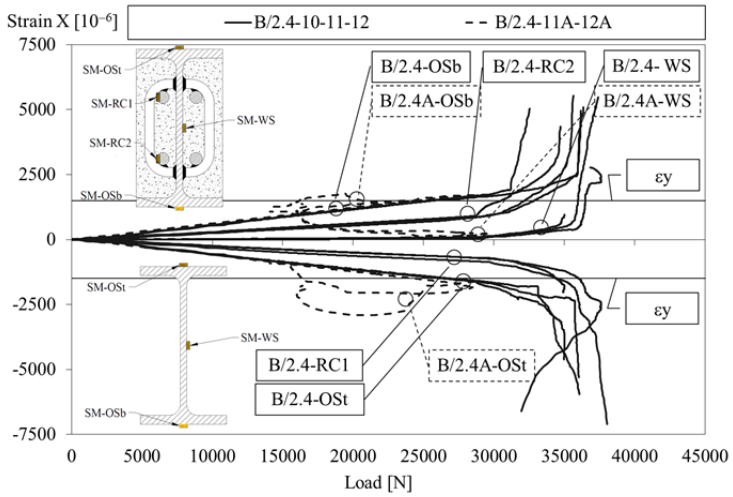


Figura 45 - Deformações na secção SM da comparação III.

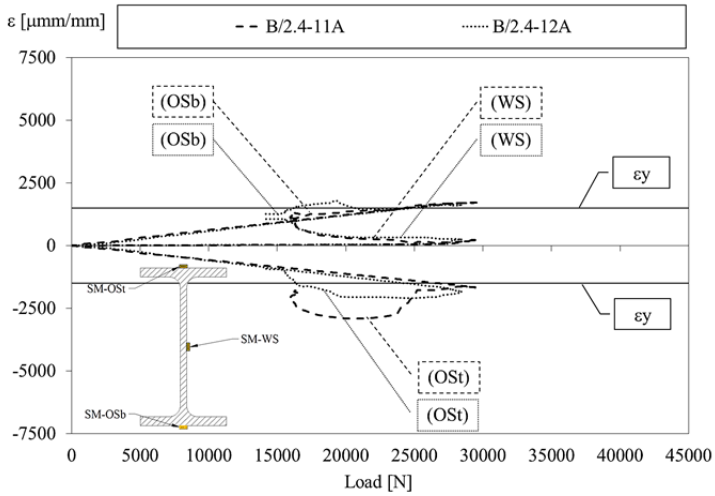


Figura 46 - Deformações na secção SM da comparação III.

Na Figura 47, é apresentado o estado de fissuração das vigas da série média. A maioria das fissuras estão localizadas na secção média, tendo ocorridas por tração na zona do banzo inferior. Nas secções mais próximas dos pontos de carga, as fissuras apresenta uma evolução diferente, em forma de "y" invertido.

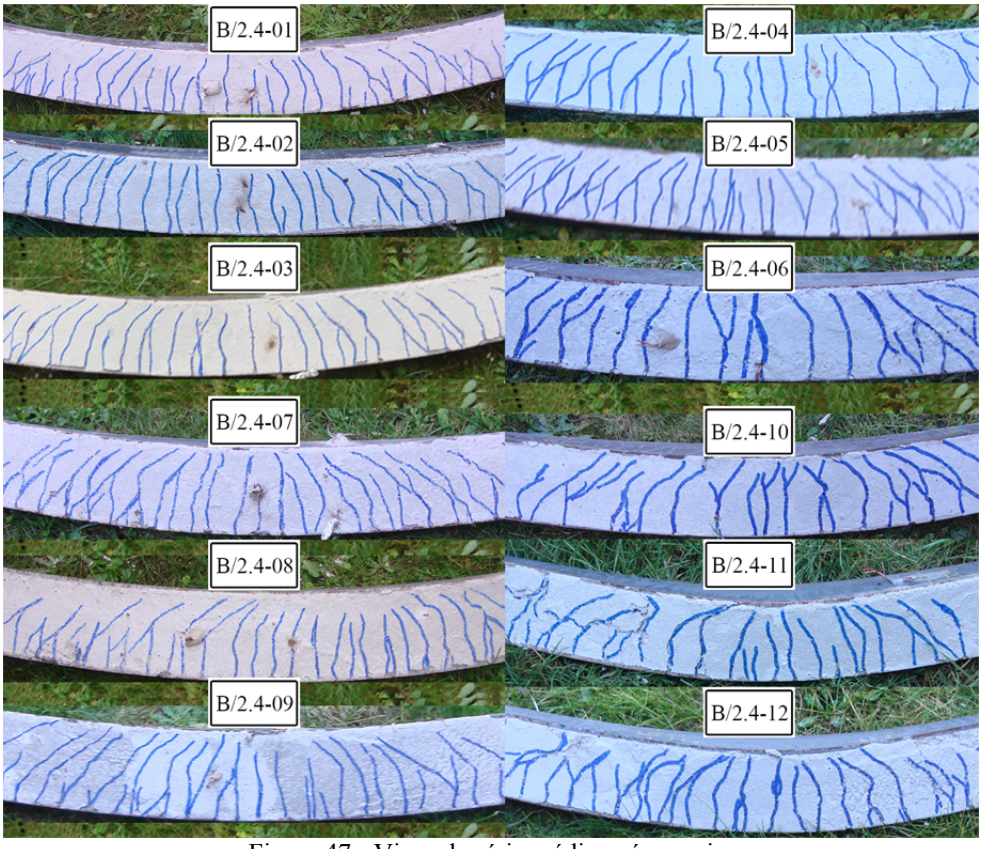


Figura 47 - Vigas da série média após ensaio.

4.5.3 Comparação dos resultados para vigas da série grande.

4.5.3.1 Comparação IV - diferentes níveis de temperatura.

Neste capítulo serão analisados os resultados das séries 6, 7 e 9, correspondentes ao conjunto das vidas grandes (Ls=3,9 m). Esta comparação pretende avaliar o efeito dos três níveis de temperatura, 400 °C, 600 °C e temperatura ambiente, respetivamente.

Na Figura 48 está representado o deslocamento transversal da viga em função da carga aplicada em cada cilindro. O comportamento linear do início verifica-se até atingir o valor inicial da plastificação (F_p). Depois o elemento dá início a um processo de plastificação dos materiais e simultaneamente a um processo de fissuração do betão. O deslocamento tem um comportamento monótono crescente com curvas coincidentes para as mesmas condições de ensaio.

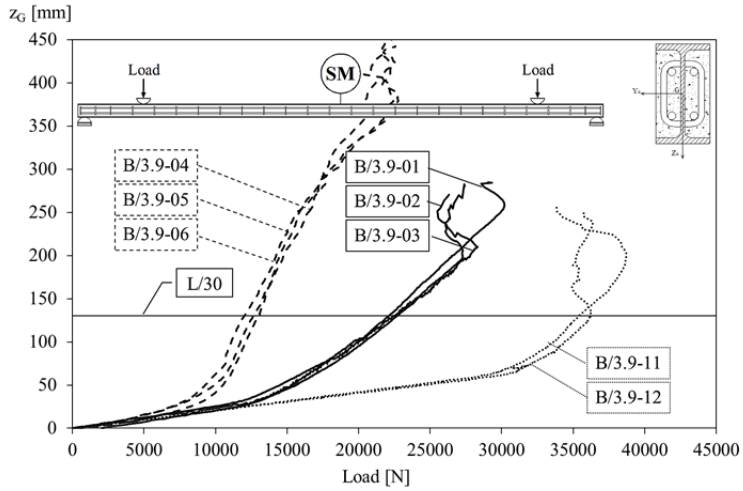


Figura 48 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM da comparação IV.

Na Figura 49 são apresentados os resultados do deslocamento lateral. As vigas submetidas a 600 °C sofrem um movimento lateral com pequeníssima rotação da secção, enquanto as vigas submetidas a 400 ºC e à temperatura ambiente atingem o estado limite último com uma deformação correspondente à encurvadura lateral torsional, ver Figura 50.

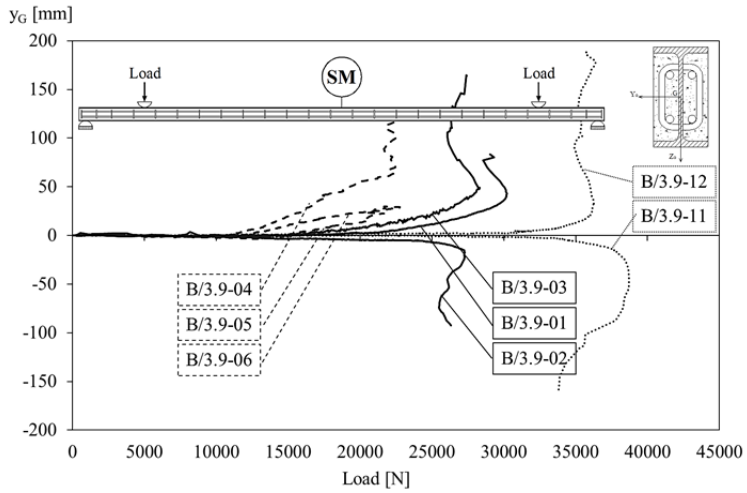


Figura 49 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM da comparação IV.

Na Figura 50 está representada a variação da rotação da secção.

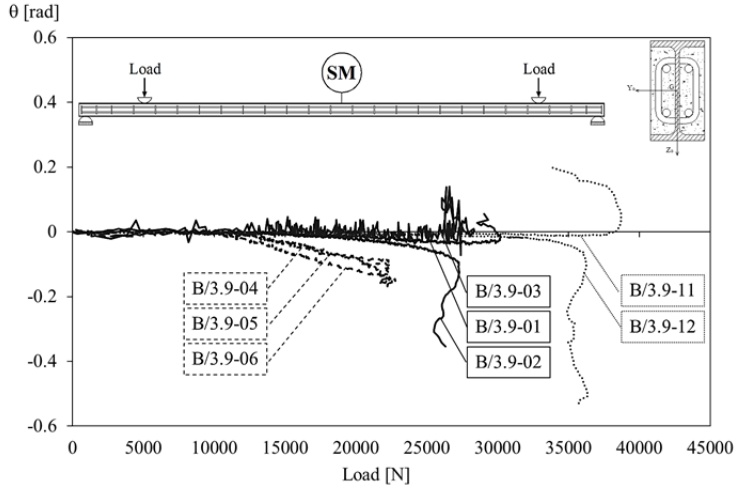


Figura 50 - Rotação da secção SM da comparação IV.

4.5.3.2 Comparação V - diferentes tipos de ligação dos estribos.

Neste capítulo serão analisados os resultados das séries 6 e 8, correspondente ao estudo do efeito da ligação dos estribos à alma do perfil. Na série 6, os estribos foram soldados à alma (W) e aos reforços longitudinais. Na série 8, os estribos não estão soldados (NW) à alma, mas encontram-se ligados ao reforço através de ligação corrente de arame queimado.

Na Figura 51 estão representados os resultados relacionados com o deslocamento transversal. O comportamento linear inicial verifica-se até se atingir o limite de proporcionalidade (F_p), seguindo-se uma fase não linear de extensão de plasticidade ao elemento acompanhada por fissuração (F_y). As cargas dos ensaios correspondentes ao critério

(L/30) são muito semelhantes. As cargas últimas (F_u) são bastantes distintas, verificando-se uma tendência de maior resistência para as vigas com estribos soldados (W).

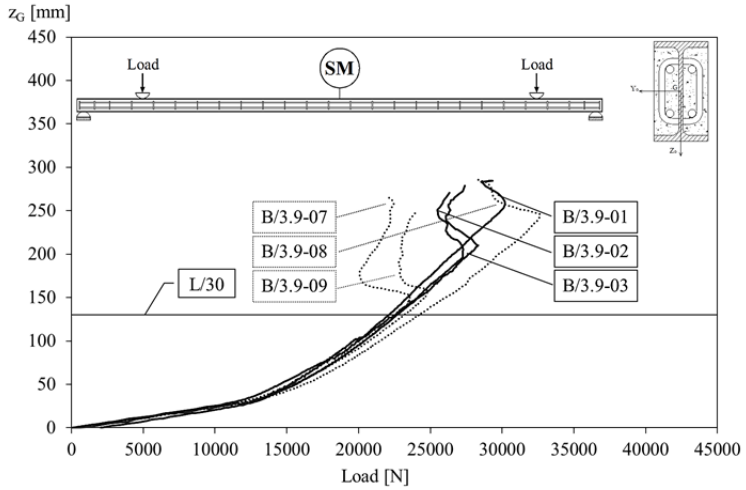


Figura 51 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM da comparação V.

Na Figura 52, está representado o comportamento do deslocamento lateral.

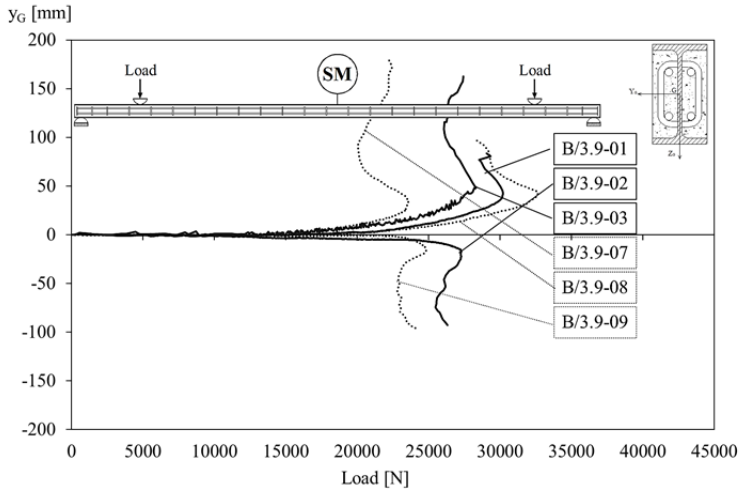


Figura 52 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM da comparação V.

Na Figura 53 está representada a variação da rotação da secção. Não se observam grandes diferenças no comportamento entre as vigas soldadas (W) e não soldadas (NW). Todas as vigas atingiram o estado limite com uma forma de deformada correspondente a encurvadura lateral torsional.

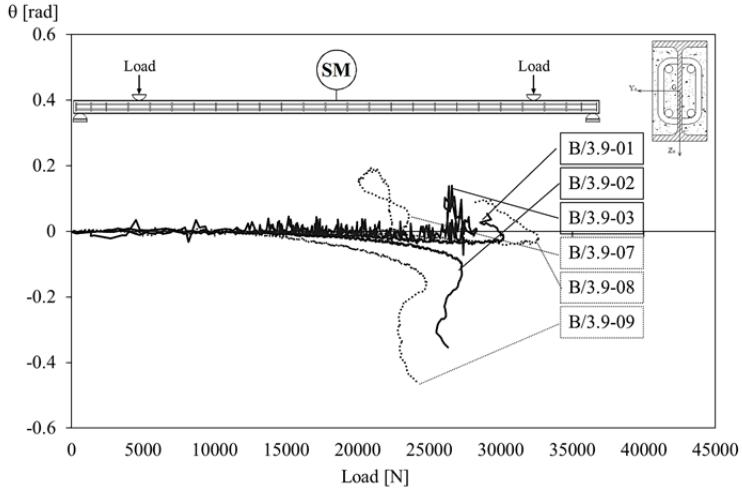


Figura 53 - Rotação da secção SM da comparação V.

4.5.3.3 Comparação VI - entre vigas PEB e em aço.

Neste capítulo é apresentado a comparação dos ensaios das séries 9 e 10, correspondentes ao conjunto de vigas grandes (Ls=3,9 m). Nestes resultados é possível observar que as vigas PEB apresentam maior rigidez à flexão e que o valor de resistência última é também muito superior. Se for utilizado o critério da carga associado ao deslocamento (L/30), verifica-se que a resistência à flexão é aproximadamente o dobro, ver Figura 54. O comportamento do deslocamento transversal é muito semelhante ao comportamento das vigas médias. Em ambos os casos foi atingido o estado de deformação correspondente ao modo de encurvadura lateral torsional.

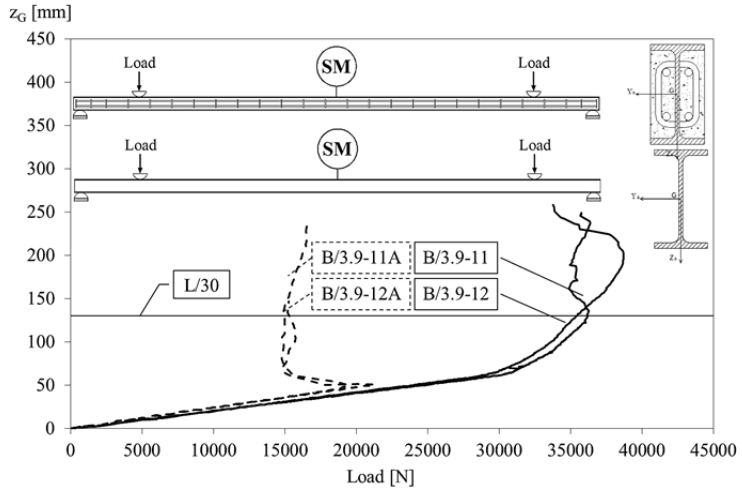


Figura 54 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM da comparação VI.

Na Figura 55 está representado o comportamento do deslocamento lateral, confirmando o fenómeno de instabilidade.

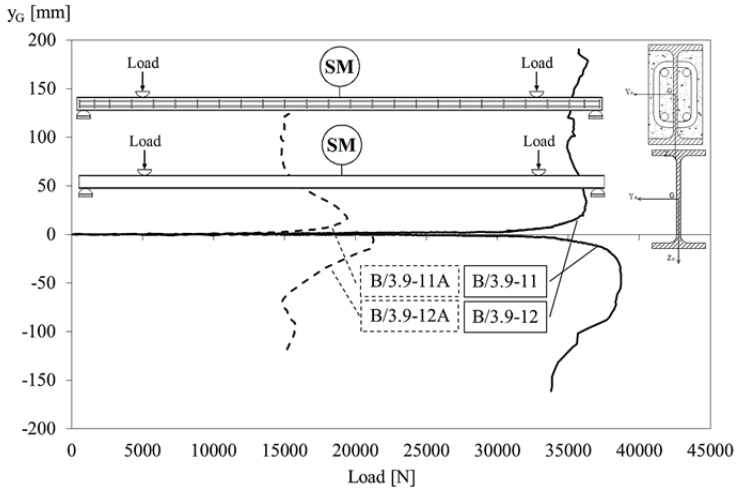


Figura 55 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM da comparação VI.

No gráfico da Figura 56 pode ser observada a rotação da secção. Em ambos os casos são atingidos valores grandes.

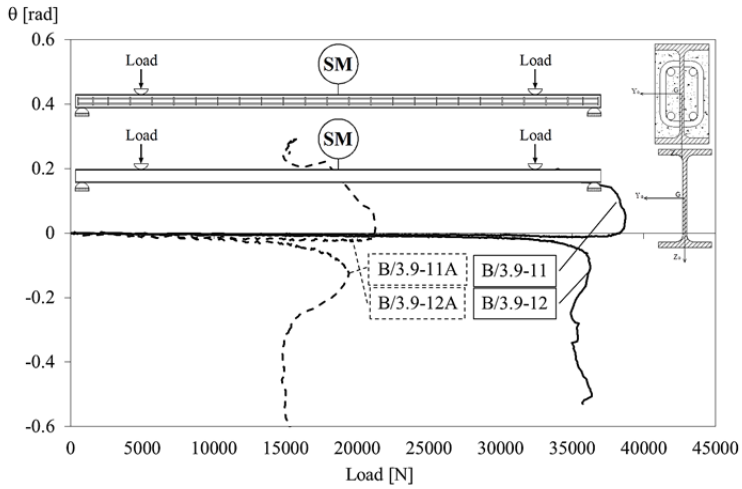


Figura 56 - Rotação da secção SM da comparação VI.

Nestas séries é possível fazer a comparação da deformação em alguns pontos da secção central. Neste gráfico da figura seguinte está representada a deformação correspondente à cedência do material do perfil (ε_y). As vigas metálicas atingem o estado limite de encurvadura lateral torsional no domínio elástico, enquanto as vigas PEB sofrem plastificação em alguns pontos.

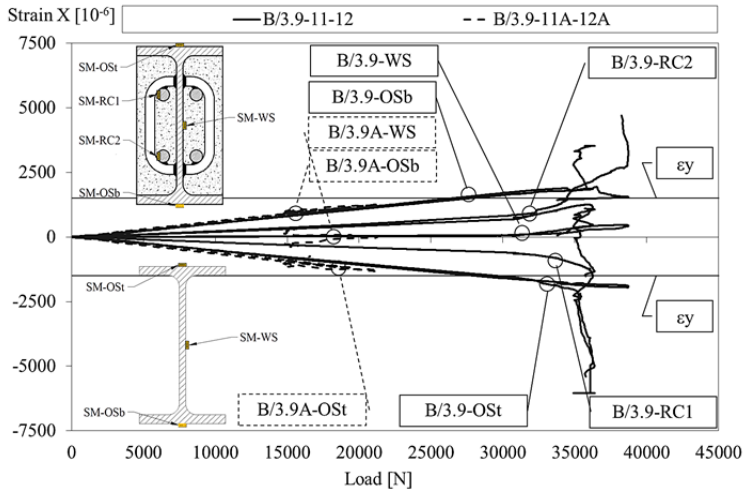


Figura 57 - Deformações na secção SM da comparação VI.

No gráfico da Figura 58 está representada a evolução da deformação para o caso da viga metálica. Neste gráfico confirma-se com clareza o que já foi referido atrás.

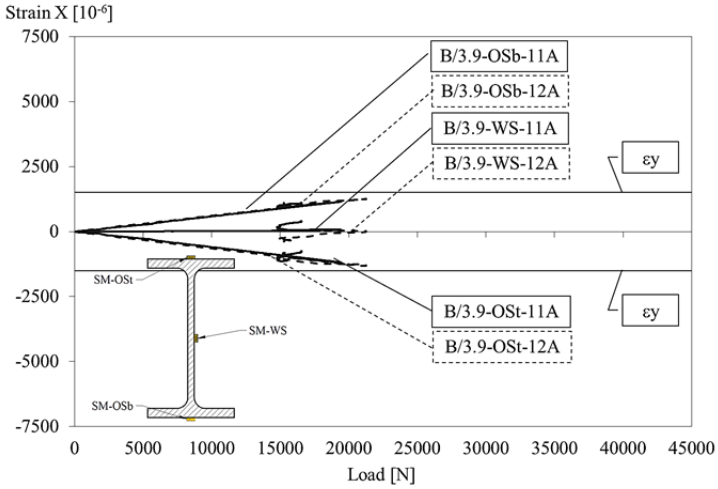


Figura 58 - Deformações na secção SM da comparação VI.

Na Figura 59 está representado o estado final de fissuração das vigas grandes. As fissuras são evidentes junto ao banzo inferior, com formação por tração. Nas zonas mais afastadas da secção central, observa-se uma tendência para fissuras na direção oblíqua.

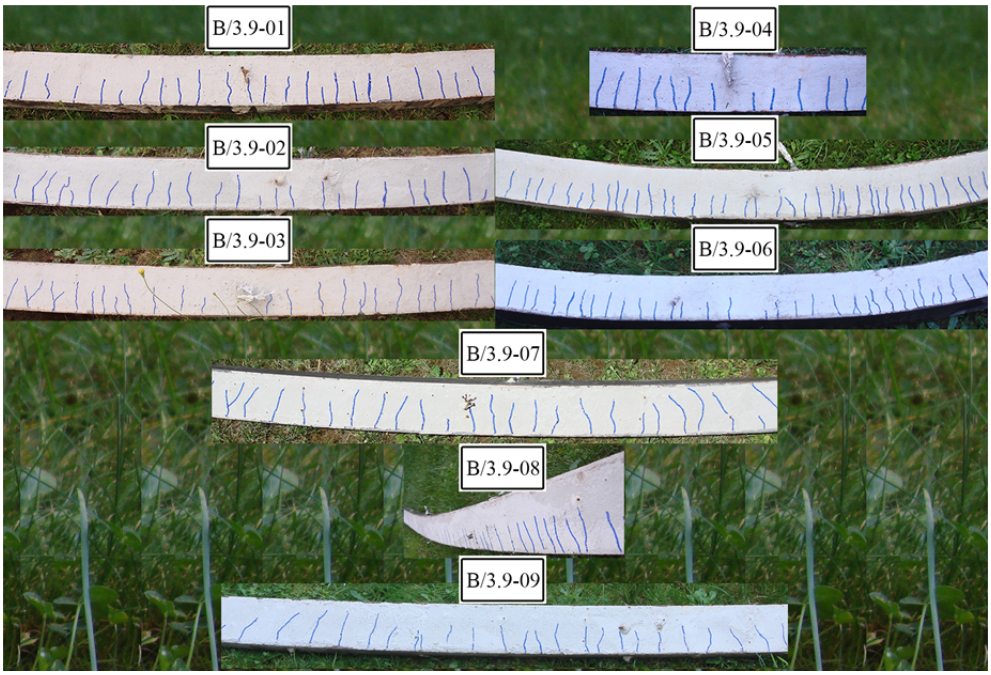


Figura 59 - Vigas da série grande após ensaio.

4.6 Conclusões.

A resistência à flexão diminui com a temperatura como esperado. O modo de deformação correspondente ao estado limite foi verificado por encurvadura lateral torsional (LTB) na maior partes dos ensaios, com a exceção dos ensaios das vigas da série 7, para o nível de temperatura de 600°C. Nestes casos o modo de deformação correspondente parece ter ocorrido por formação de rótula plástica (PH).

A diminuição da resistência à flexão de vigas parcialmente embebidas com betão em condições extremas de temperaturas elevadas é dominada principalmente pelo comportamento do aço do perfil a essas temperaturas.

Os ensaios realizados à temperatura ambiente permitem concluir que a resistência de vigas PEB é duas vezes superior ao valor da resistência das vigas metálicas, para o mesmo perfil metálico. A rigidez à flexão e à torção também é superior no caso destes elementos mistos.

A Tabela 13 apresenta resultados pontuais dos eventos principais de força em cada ensaio, tais como: F_p-força limite de proporcionalidade, F_y-força que resulta da interseção de duas linhas obtidas pelas curvas tangentes da parte linear e da parte não linear do deslocamento transversal, $F_{L/30}$- força correspondente ao critério de deslocamento de L/30, F_u-força máxima verificada no ensaio e F_{Mpl}-força correspondente ao momento plástico da secção definida nas expressões (44) e (45).

Tabela 13 - Resultados pontuais dos ensaios de flexão.

Séries	Viga	Ls [m]	Estribos [W/NW]	Temp. [ºC]	F_{Mpl} [N]	F_p [N]	F_y [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
1	B/2.4-01	2,4	W	400	32191	11910	18890	24932	38864
	B/2.4-02					13627	21760	26583	31533
	B/2.4-03					12540	19920	24878	33568
2	B/2.4-04	2,4	W	200	32877	24770	31430	34060	36875
	B/2.4-05					26030	30350	32953	39042
	B/2.4-06					26580	31380	33930	34712
3	B/2.4-07	2,4	NW	400	32191	13050	20610	24898	29000
	B/2.4-08					12960	19270	25135	40861
	B/2.4-09					11920	20850	25722	33246
4	B/2.4-10	2,4	W	Amb.	32968	27050	33470	34966	35015
	B/2.4-11					25960	35410	36360	37624
	B/2.4-12					26600	34600	35962	39246
5	B/2.4-11A	2,4	-	Amb.	26271	-	27500	-	29627
	B/2.4-12A					-	27200	-	28477
6	B/3.9-01	3,9	W	400	32191	11190	16370	22126	30204
	B/3.9-02					11920	16360	22715	27290
	B/3.9-03					11700	14850	22573	28337
7	B/3.9-04	3,9	W	600	15086	4110	9620	12641	22456
	B/3.9-05					4360	9750	12996	21662
	B/3.9-06					4090	9110	12025	22770
8	B/3.9-07	3,9	NW	400	32191	11170	15000	22665	23591
	B/3.9-08					13160	15600	24237	32642
	B/3.9-09					10720	15100	23207	24816
9	B/3.9-11	3,9	W	Amb.	32968	26500	31600	35428	38718
	B/3.9-12					29020	32100	36161	36380
10	B/3.9-11A	3,9	-	Amb.	26271	-	-	-	19436
	B/3.9-12A					-	-	-	21272

Da análise da tabela é possível concluir que o efeito do tipo de ligação dos estribos não é muito significativo, verificando-se uma pequena tendência para que as vigas PEB NW possuam menor resistência à flexão.

A comparação do valor do momento plástico da secção com os eventos de carga dos ensaios da série 7 permitem concluir que o modo de deformação correspondente ao estado limite último deve ter ocorrido com formação de rótula plástica.

A diminuição da resistência à flexão não é diretamente proporcional ao aumento da temperatura. Um aumento do nível de temperatura de 200 ºC para 400 ºC origina uma redução de 24%, quando se utiliza o critério FL/30 no caso das vigas da série média. Um aumento do nível de temperatura, desde as condições de ambiente corrente para 400ºC e para 600ºC, provoca uma redução da resistência em 37% e 64 %, prospectivamente.

Os resultados dos ensaios realizados em vigas metálicas à temperatura ambiente permitem concluir que o modo de deformação correspondente ao estado limite de estabilidade ocorreu com plastificação do perfil, no caso da série média. No caso dos ensaios

correspondentes à série grande, o modo de deformação correspondente ao estado limite foi o mesmo, mas sem ocorrência de plastificação do perfil.

5 RESISTÊNCIA A TEMPERATURAS ELEVADAS DE VIGAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS COM BETÃO.

5.1 Ação do fogo.

O fogo resulta de uma rápida oxidação de um material combustível, libertando calor, luz e produtos de reação, tais como o dióxido de carbono e a água.

A ação do fogo em estruturas é definida no Eurocódigo EN1991-1-2 [21]. O cálculo estrutural em relação à ação do fogo envolve a aplicação de ações para análise de temperaturas e de ações para análise mecânica. As ações sobre as estruturas decorrentes da exposição ao fogo são classificadas como ações de acidente.

5.1.1 Ação térmica.

5.1.1.1 Fluxo de calor.

Segundo o Eurocódigo EN1991-1-2 [21] as ações térmicas são definidas pelo fluxo de calor efetivo $\dot{h}_{net}\ \left[W/m^2\right]$ na superfície do elemento. E dividido em duas componentes, uma devido à convecção e a outra devido à radiação. O valor de cálculo do fluxo de calor é dado por a seguinte expressão.

$$\dot{h}_{net,d} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}\ \left[W/m^2\right] \tag{29}$$

A componente do fluxo de calor por convecção é determinada pela expressão seguinte.

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c\left(\theta_g - \theta_m\right)\ \left[W/m^2\right] \tag{30}$$

Onde α_c representa o coeficiente de transferência de calor por convecção em $\left[W/m^2K\right]$, θ_g é a temperatura do gás na vizinhança do elemento exposto ao fogo em $\left[^{\circ}C\right]$ e θ_m representa a temperatura da superfície do elemento exposto ao fogo em $\left[^{\circ}C\right]$.

O valor do coeficiente de convecção α_c deve ser considerado igual a 9,25 e 50 para os casos de superfície não exposta, superfície exposta com curva ISO834 e superfície exposta com hidrocarbonetos.

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \times \varepsilon_f \times \varepsilon_m \times \sigma \left[\left(\theta_r + 273 \right)^4 - \left(\theta_m + 273 \right)^4 \right] \left[W / m^2 \right] \quad (31)$$

Onde Φ representa o fator de forma, ε_f é a emissividade do fogo, ε_m é a emissividade da superfície do elemento, σ é a constante de Stephan Boltzmann que tem como valor $5,67 \times 10^{-8} \left[W / m^2 K^4 \right]$, θ_r é a temperatura de radiação efetiva do ambiente de incêndio em $[^{\circ}C]$, θ_m é a temperatura da superfície do elemento em $[^{\circ}C]$.

No caso dos materiais envolvidos, considera-se que $\varepsilon_m = 0,7$ para o caso do aço e do betão. O valor da emissividade das chamas deve ser igual a $(\varepsilon_f = 1)$. Chama-se a atenção para o facto de alguns comportamentos podem apresentar valores inferiores $(\varepsilon_f = 0,8)$ (caso do forno de resistência).

O fator de forma Φ representa o quociente entre a quantidade de energia que chega a superfície do material que recebe a radiação e a quantidade de energia irradiada pela envolvente do compartimento de incêndio. Este fator pode ser tomado igual à unidade, quando não for especificado em particular. Pode ser considerado um valor inferior no caso de se considerar o efeito de "sombra".

5.1.1.2 Curva de incêndio natural.

A curva de incêndio natural típica, segundo [22], possui quatro fases. A fase inicial ou fase de ignição, mantem as temperaturas baixas, não tendo influência no comportamento estrutural. A fase de propagação é caracterizada pelo espalhamento do fogo a todo o compartimento por radiação ou por contacto direto. Nesta fase ocorre o fenómeno de "flashover", correspondendo à inflamação súbita dos gases, caracterizado por temperaturas da cobertura entre 450 °C e os 600 °C. A partir deste instante as temperaturas sobem rapidamente, dando inicio à fase de desenvolvimento pleno do incêndio. Ocorre a combustão do material combustível, mantendo-se as temperaturas constantes. A fase de extinção ou de arrefecimento tem uma diminuição progressiva das temperaturas, seja por falta de combustível ou por intervenção externa.

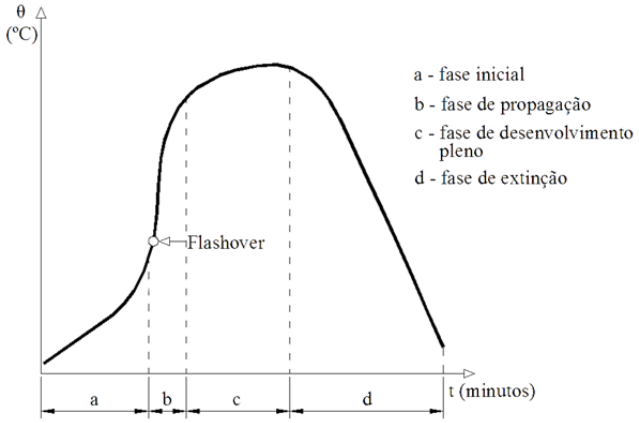


Figura 60 - Curva de incêndio natural típica.

5.1.1.3 Curvas nominais de incêndio.

A evolução das temperaturas dentro de compartimentos pode ser determinada a partir de curvas nominais de incêndio. No Eurocódigo EN1991-1-2 [21] são mencionadas a curva de incêndio padrão, a curva incêndio para elementos exteriores e a curva de incêndio de hidrocarbonetos.

A curva de incêndio padrão, vulgarmente designada por curva ISO834 é definida por a seguinte expressão.

$$\theta_g = 20 + 345\log_{10}\left(8t + 1\right) \tag{32}$$

Onde θ_g é a temperatura dos gases no compartimento de incêndio em [°C] e t o tempo em [min].

A curva de incêndio padrão tem a evolução no tempo demostrada na figura seguinte.

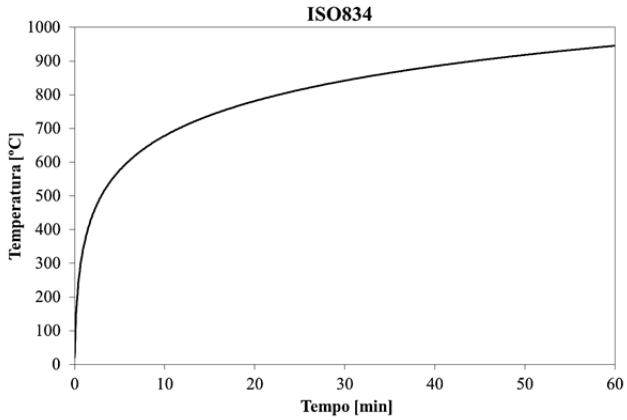


Figura 61 - Curva de incêndio padrão (ISO834).

5.1.2 Ação mecânica.

A verificação da resistência ao fogo pode ser feita em três domínios [22], do tempo, da resistência e da temperatura.

No domínio tempo:

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ} \tag{33}$$

No domínio da resistência:

$$E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t}\text{, no instante } t_{fi,requ} \tag{34}$$

No domínio da temperatura:

$$\theta_d \leq \theta_{cr,d}\text{, no instante } t_{fi,requ} \tag{35}$$

Em que:

$t_{fi,d}$ - é o valor de cálculo da resistência ao fogo ;

$t_{fi,requ}$ - é a resistência ao fogo requerida regularmente;

θ_d - é o valor de cálculo da temperatura do elemento;

$\theta_{cr,d}$ - é o valor de cálculo da temperatura crítica do elemento.

A Figura 62 representa a relação entre os vários domínios. A temperatura do elemento deve ser inferior à sua temperatura crítica. Nessas condições também o efeito das ações é inferior à resistência do elemento. O tempo de resistência exigido pelo regulamento tem que ser inferior ao valor de cálculo da resistência ao fogo.

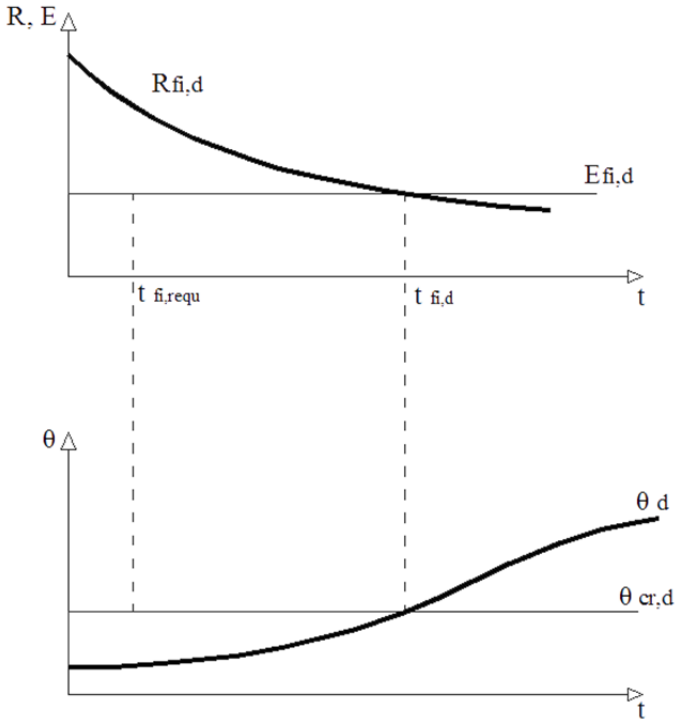


Figura 62 - Domínios de verificação da resistência.

5.2 Método avançado de cálculo para determinação do campo de temperatura na secção.

O cálculo da temperatura na secção foi efetuado por elementos finitos, com recurso ao programa de elementos finitos Ansys, utilizando o elemento "PLANE55" ver Figura 63, com 4 nós e 1Gdl (temperatura). Este elemento permite efetuar uma análise térmica num domínio bidimensional, em regime transiente, utilizando o comportamento não linear material.

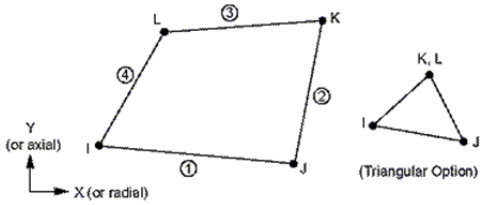


Figura 63 - Elemento finito "PLANE55" [23].

Na Figura 64 está representada a malha de elementos finitos. O modelo utiliza elementos quadrangulares com malha regular. Foi efetuado um refinamento na zona do reforço longitudinal, permitindo um refinamento na zona do betão. Foram efetuados testes de convergência para aproximar os resultados numéricos dos resultados experimentais.

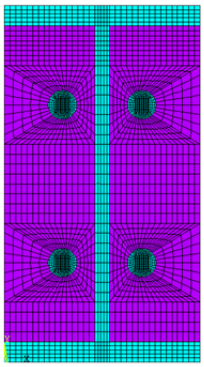


Figura 64 - Malha do modelo numérico.

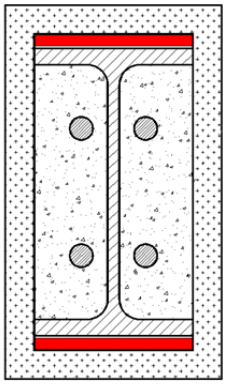


Figura 65 - Modelo físico.

Este modelo utiliza 3430 elementos finitos e 3514 nós. As condições de fronteira consideram curvas prescritas de temperatura-tempo nos banzos. Nos restantes limites é considerado isolamento perfeito.

5.2.1 Simulação do aquecimento a 600ºC.

Na simulação para 600°C foi utilizada como base de comparação o ensaio B/3.9-05 da série 7. Foram utilizadas as temperaturas dos ensaios experimentais nos pontos de medição S2-OStop e S2-OSbottom para a elaboração das curvas de aquecimento do modelo numérico. Estas curvas de aquecimento resultam da aplicação de uma taxa de aquecimento experimental de 800 °C/h.

Da Figura 66 à Figura 69, estão representadas as temperaturas na secção da viga PEB para diferentes instantes de tempo. A temperatura inicial foi considerada constante, sendo que durante o processo de aquecimento é verificada uma diferença de temperatura na secção, em particular no reforço, no betão e no aço.

Os resultados não são simétricos pelo facto de se verificarem curvas de aquecimento diferentes entre o banzo inferior e o banzo superior.

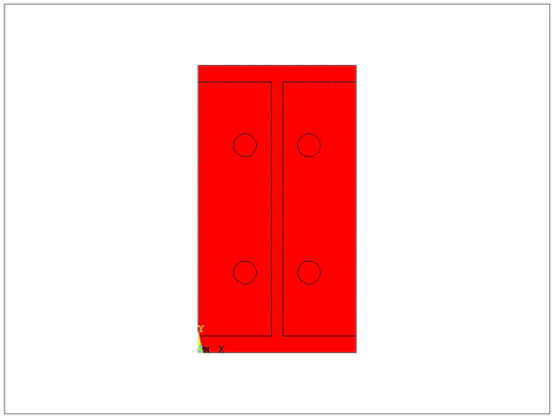


Figura 66 - Campo de temperatura para t=0 (s).

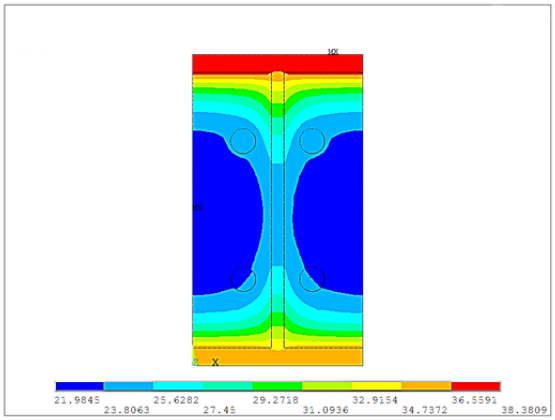


Figura 67 - Campo de temperatura para t=280 (s).

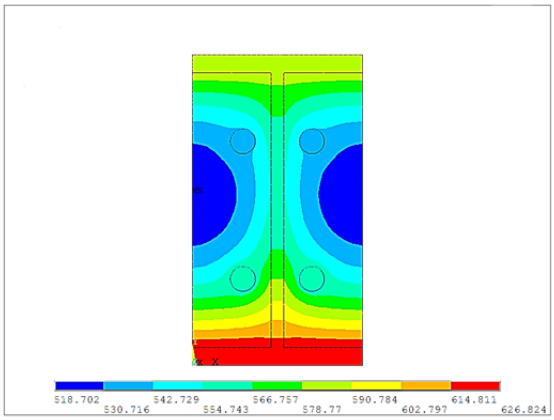


Figura 68 - Campo de temperatura para t=4549 (s).

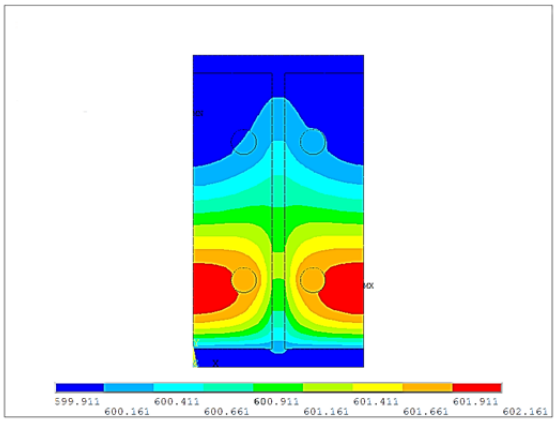


Figura 69 - Campo de temperatura para t=7500 (s).

Na Figura 70 e na Figura 71 está representada a comparação da evolução da temperatura no modelo numérico com a evolução dos resultados experimentais. As temperaturas no interior do betão (S2-IC) e no exterior (S2-OC) aproximam-se aos resultados experimentais com diferença máxima relativa inferior a 5%. As temperaturas no aço apresentam diferenças relativas entre os resultados numéricos e experimentais inferiores a 14%. Na Figura 71 é evidente o efeito da vaporização da água.

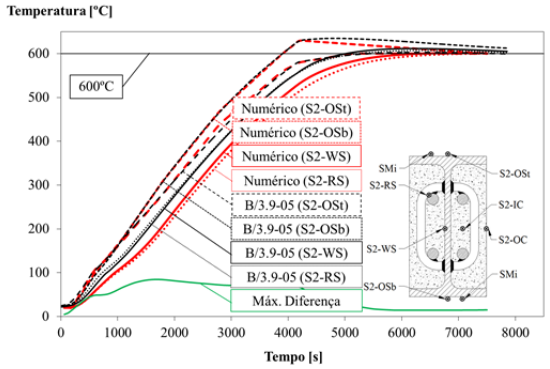


Figura 70 - Evolução de temperaturas no aço.

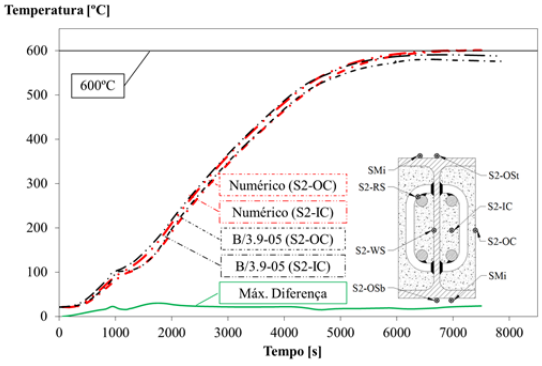


Figura 71 - Evolução de temperaturas no betão.

No final do aquecimento, a secção apresenta uma distribuição de temperaturas quase uniforme, conforme pretendido.

5.2.2 Simulação do aquecimento a 400ºC.

Na simulação para 400°C foi utilizada a curva de aquecimento do ensaio B/3.9-03 da série 6. Foram utilizadas as temperaturas dos ensaios experimentais nos pontos de medição S2-OStop e S2-OSbottom para a elaboração das curvas de aquecimento do modelo numérico. Estas curvas de aquecimento resultam da aplicação de uma taxa de aquecimento experimental de 800 °C/h.

Da Figura 72 à Figura 75 figuras estão representadas as temperaturas na secção da viga PEB para diferentes instantes de tempo. A temperatura inicial foi considerada constante, sendo que durante o processo de aquecimento é verificada uma diferença de temperatura na secção, em particular no reforço, no betão e no aço.

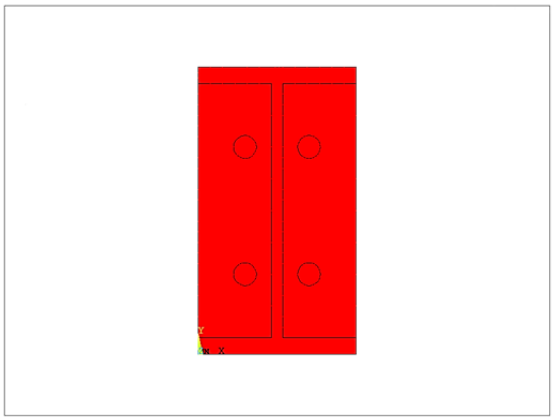


Figura 72 - Campo de temperatura para t=0 (s).

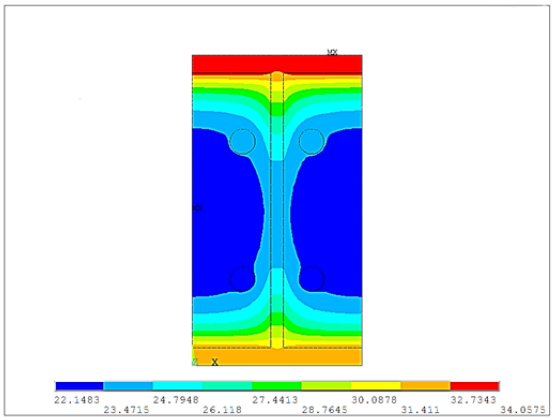


Figura 73 - Campo de temperatura para t=279 (s).

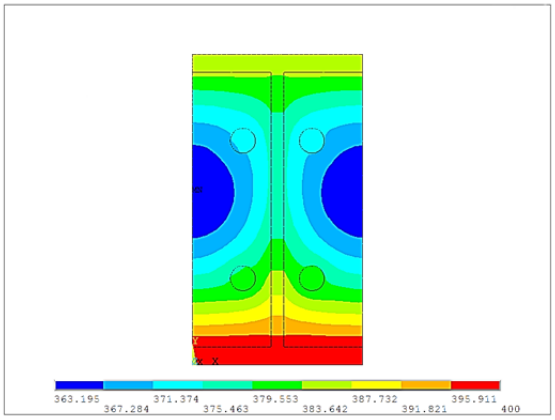


Figura 74 - Campo de temperatura para t=3801 (s).

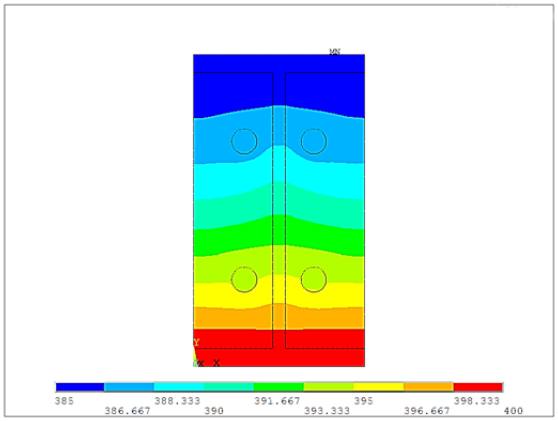


Figura 75 - Campo de temperatura para t=5800 (s).

Na Figura 76 e na Figura 77 está representada a comparação da evolução da temperatura no modelo numérico com a evolução dos resultados experimentais.

As temperaturas no interior do betão (S2-IC) e no exterior (S2-OC) aproximam-se aos resultados experimentais com diferença máxima relativa inferior a 5%. As temperaturas no aço apresentam diferenças entre os resultados numéricos e experimentais inferiores a 12%.

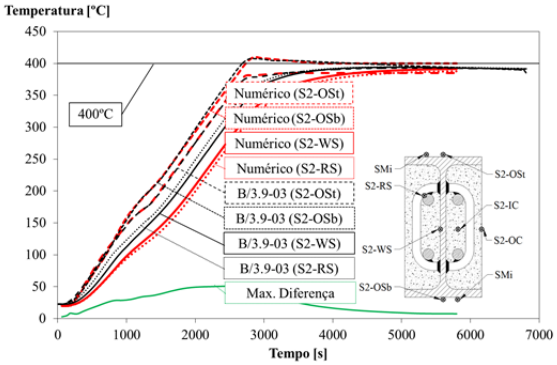


Figura 76 - Evolução de temperaturas no aço.

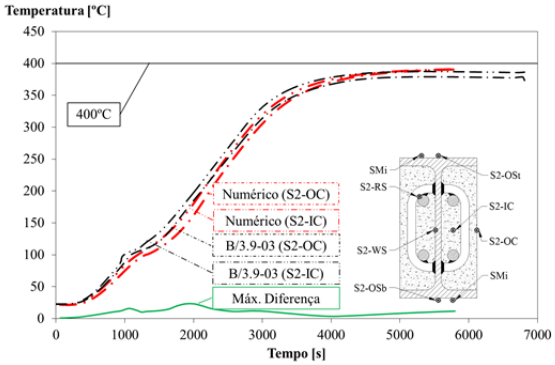


Figura 77 - Evolução de temperaturas no betão.

No final do aquecimento, a secção apresenta uma distribuição de temperaturas quase uniforme, conforme pretendido.

5.2.3 Simulação do aquecimento a 200ºC.

Na simulação para 200°C foi utilizada a curva de aquecimento do ensaio B/2.4-06 da série 2. Foram utilizadas as temperaturas dos ensaios experimentais nos pontos de medição S2-OStop e S2-OSbottom para a elaboração das curvas de aquecimento do modelo numérico. Estas curvas de aquecimento resultam da aplicação de uma taxa de aquecimento experimental de 800 °C/h.

Da Figura 78 à Figura 81 estão representadas as temperaturas na secção da viga PEB para diferentes instantes de tempo. A temperatura inicial foi considerada constante, sendo que durante o processo de aquecimento é verificada uma diferença de temperatura na secção, em particular no reforço, no betão e no aço.

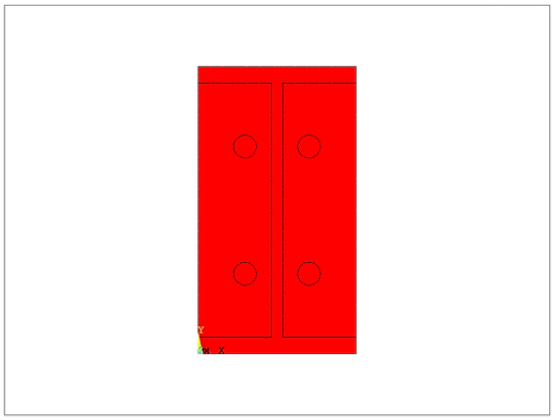


Figura 78 - Campo de temperatura para t=0 (s).

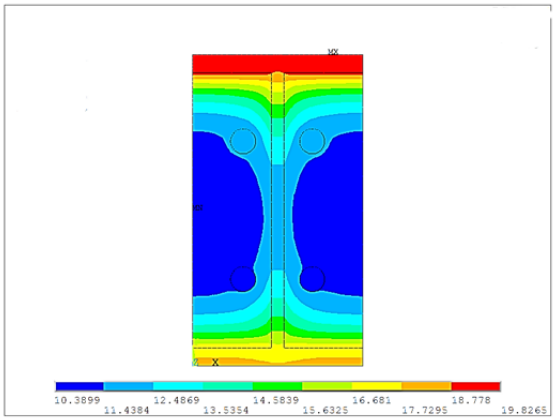


Figura 79 - Campo de temperatura para t=248 (s).

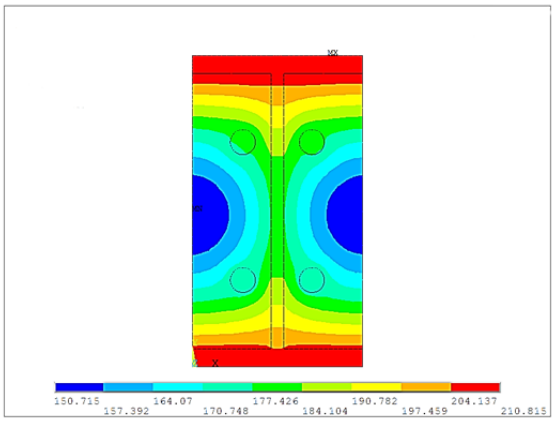


Figura 80 - Campo de temperatura para t=2090 (s).

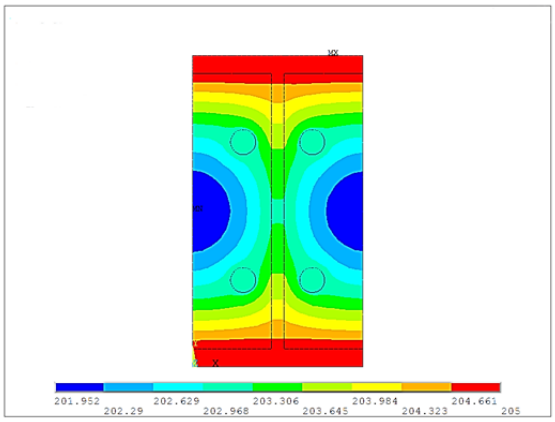


Figura 81 - Campo de temperatura para t=3800 (s).

Na Figura 82 e na Figura 83 está representada a comparação da evolução da temperatura no modelo numérico com a evolução dos resultados experimentais. As temperaturas no interior do betão (S2-IC) e no exterior (S2-OC) aproximam-se aos resultados experimentais com diferença máxima inferior 14%. As temperaturas no aço apresentam diferenças entre os resultados numéricos e experimentais inferiores a 18%.

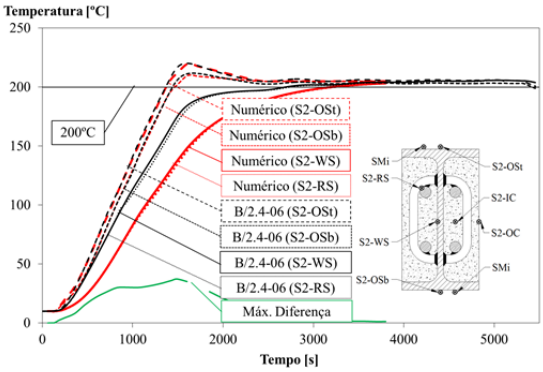


Figura 82 - Evolução de temperaturas no aço.

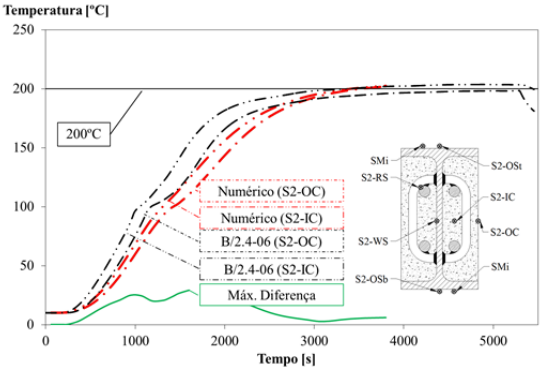


Figura 83 - Evolução de temperaturas no betão.

No final do aquecimento, a secção apresenta uma distribuição de temperaturas quase uniforme, conforme pretendido.

5.2.4 Conclusões.

O método avançado de cálculo foi utilizado para determinar o tempo de duração do ensaio. Foram definidas dois estágios de aquecimento. O primeiro estágio considerou um aquecimento com uma taxa constante e o segundo estágio foi utilizado para definir de uma distribuição de temperaturas na secção quase uniforme. As diferenças que se verificam entre os resultados numéricos e experimentais podem ser justificadas por diferentes fatores.

Decidiu-se utilizar um modelo de aproximação numérico da secção reta, não considerando o efeito térmico dos estribos. Foram também utilizadas as propriedades térmicas de referência dos materiais, que poderão ser diferentes das propriedades reais dos materiais, em particular o efeito da quantidade de água no betão. O isolamento da viga PEB foi considerado perfeito, tendo-se verificado a existência de um fluxo de calor para o exterior, contrariando as condições do modelo. Foi ainda desprezado no modelo numérico o fluxo de calor verificado ao longo do comprimento da viga PEB. No modelo numérico não foi considerada a resistência térmica de contacto entre o perfil e os blocos de betão, condição que poderia alterar a distribuição de temperaturas na fase de aquecimento. Por último, os locais exatos de medição experimental poderão, eventualmente, não coincidir com a posição dos nós de controlo do modelo numérico.

5.3 Método avançado de cálculo para determinação do momento crítico.

A análise à encurvadura lateral é importante, pois é em geral condicionante no dimensionamento de elementos não restringidos lateralmente submetidos a flexão. Em particular torna-se importante para perfis constituídos por secções abertas de paredes finas, como é o caso da secção em I. Esta secção apresenta baixa rigidez de torção e flexão lateral.

A resistência de uma viga à encurvadura lateral depende do momento crítico, que é o momento máximo que uma viga, em condições ideais, pode suportar sem encurvar lateralmente [24].

O cálculo do momento crítico foi efetuado através do cálculo matemático dos vetores e valores próprios da seguinte expressão, de acordo com [25].

$$[K]\{\varphi_i\} = \lambda_i [M]\{\varphi_i\} \tag{36}$$

Onde $[K]$ é a matriz de rigidez do elemento, $\{\varphi_i\}$ é o vetor próprio, λ_i é o valor próprio e $[M]$ é a matriz da massa do elemento.

O cálculo do momento crítico por elementos finitos foi efetuado com recurso ao programa Ansys, utilizando o elemento "SOLID 185", ver Figura 84. Este elemento permite efetuar uma análise estrutural num domínio tridimensional. Foi utilizado o método "subspace method" [26] para análise de encurvadura elástica (estabilidade). Este método aplica-se para

análise à encurvadura para sistemas com as matrizes simétricas. Para resolver usa a seguinte expressão.

$$\left([K]+\lambda_i[S]\right)\{\psi_i\}=\{0\} \tag{37}$$

Onde $[K]$ é a matriz de rigidez do elemento, $[S]$ é a matriz de rigidez geométrica do elemento, λ_i é o valor próprio e ψ_i vetor próprio dos deslocamentos.

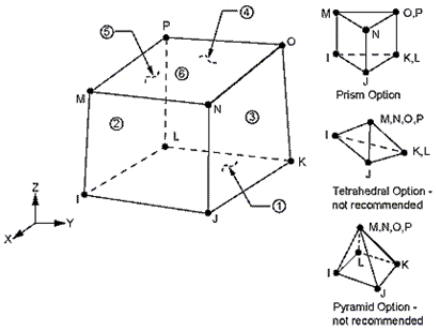


Figura 84 - Elemento finito "SOLID185", [27].

Na Figura 85 está representada a malha de elementos finitos. O modelo utiliza elementos hexaedro com seis faces retangulares e malha regular.

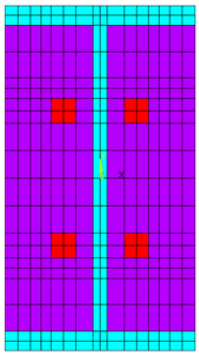


Figura 85 - Malha do modelo numérico.

Foi obtida uma solução linear elástica para o cálculo dos modos de instabilidade. O primeiro modo corresponde à encurvadura lateral torsional "LTB" e permite determinar o Mcr. Aplicou-se uma carga unitária em cada um dos 17 nós e efetuou-se uma análise estática do modelo numérico. Depois de obtidos os resultados da análise estática efetua-se uma análise de estabilidade. Obtém-se então o valor próprio, que vai ser multiplicado por 17, número de nós em que foi aplicada a carga unitária, e obtêm-se o valor da força crítica. Multiplicando a força crítica pelo seu braço, que é a distância ao apoio mais próximo, determina-se o valor do momento crítico.

5.3.1 Vigas série média.

Na análise para vigas de comprimento entre apoios de 2,4 m, obteve-se como valor próprio $\lambda = 11451$. O valor do momento crítico foi obtido pela seguinte expressão.

$$Mcr = \lambda \times 17 \times 1 \times 0,45 \ [N.m] \tag{38}$$

$$Mcr = 87600,15 \ [N.m]$$

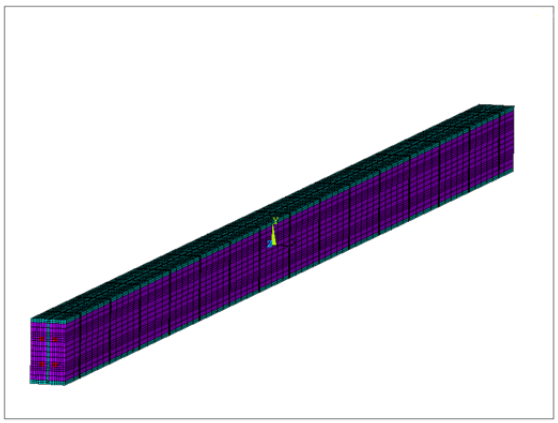


Figura 86 - Malha de elementos finitos.

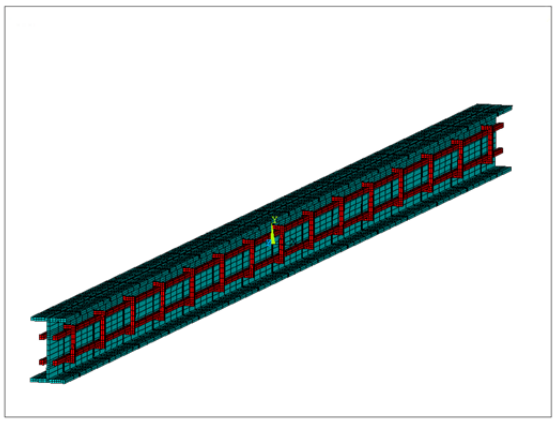


Figura 87 - Malha do perfil com reforço e estribos.

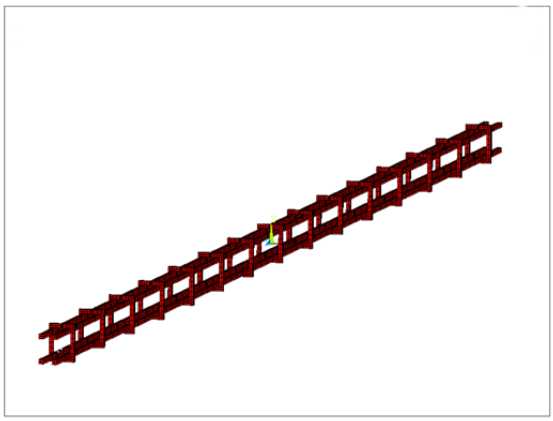


Figura 88 - Malha do reforço e estribos.

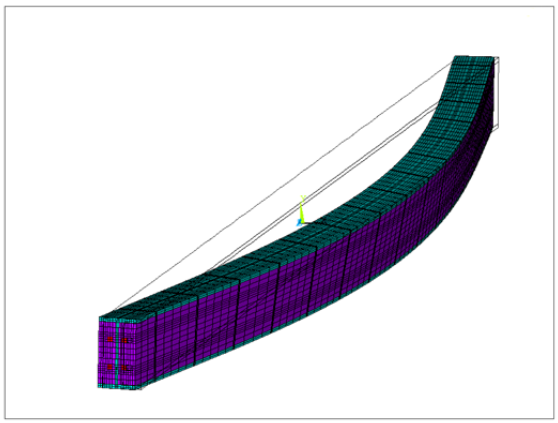


Figura 89 - Encurvadura lateral torsional (LTB).

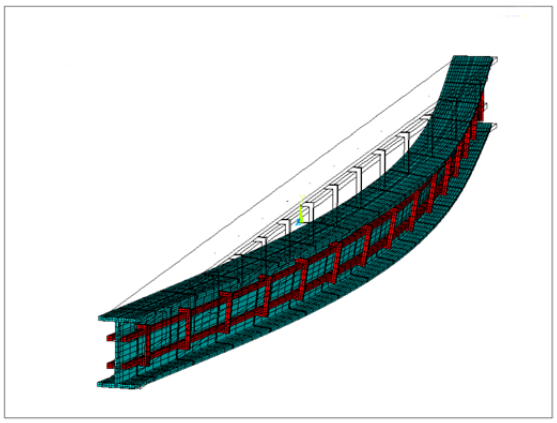


Figura 90 - LTB do perfil com reforço e estribos.

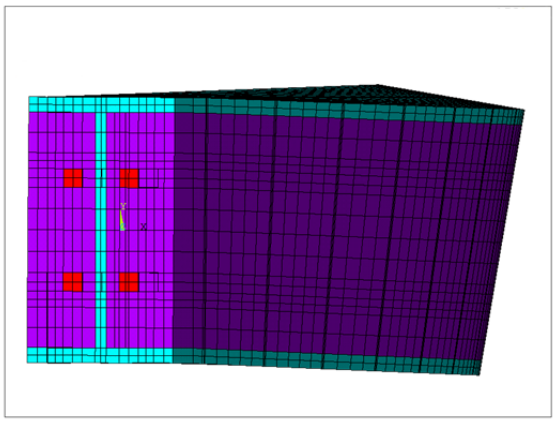


Figura 91 - LTB vista com a viga de topo.

5.3.2 Vigas série grande.

Na análise para vigas de comprimento entre apoios de 3,9 m, obteve-se como valor próprio $\lambda = 7106{,}1$. O valor do momento crítico foi obtido pela seguinte expressão.

$$Mcr = \lambda \times 17 \times 1 \times 0{,}45 \ \left[N.m\right] \tag{39}$$

$$Mcr = 54355{,}55 \ \left[N.m\right]$$

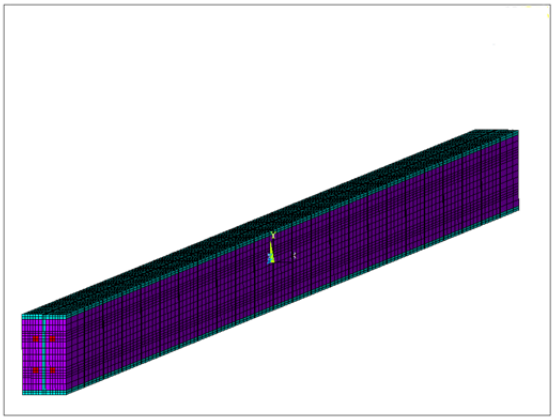


Figura 92 - Malha de elementos finitos.

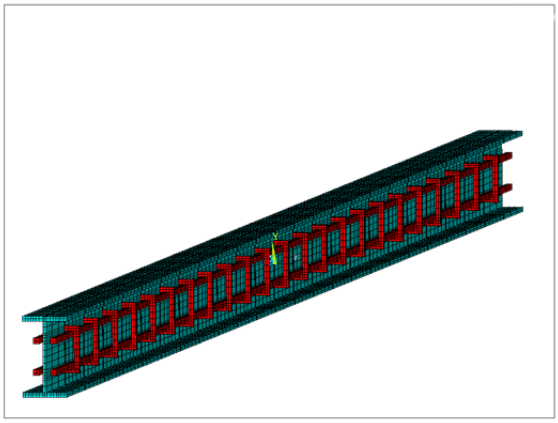


Figura 93 - Malha do perfil com reforço e estribos.

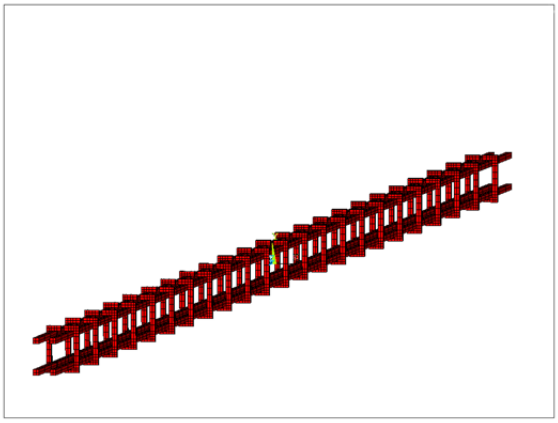


Figura 94 - Malha do reforço e estribos.

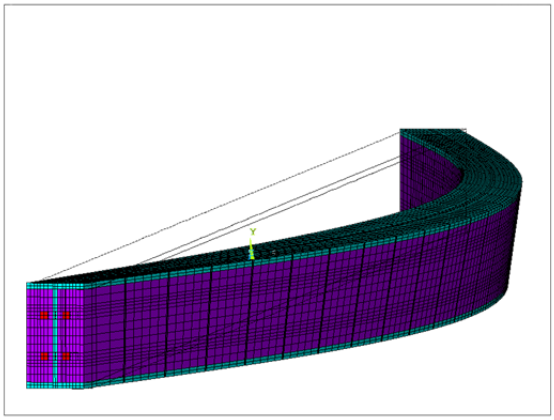


Figura 95 - Encurvadura lateral torsional (LTB).

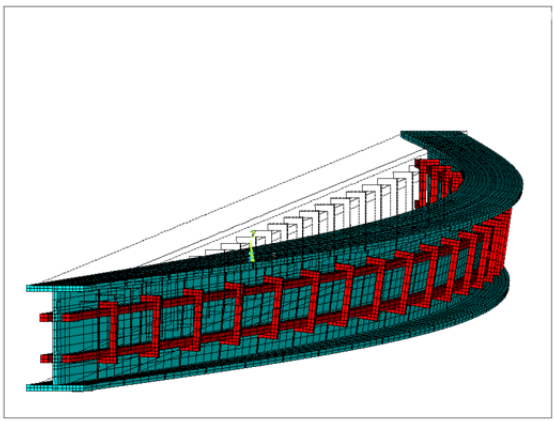


Figura 96 - LTB do perfil com reforço e estribos.

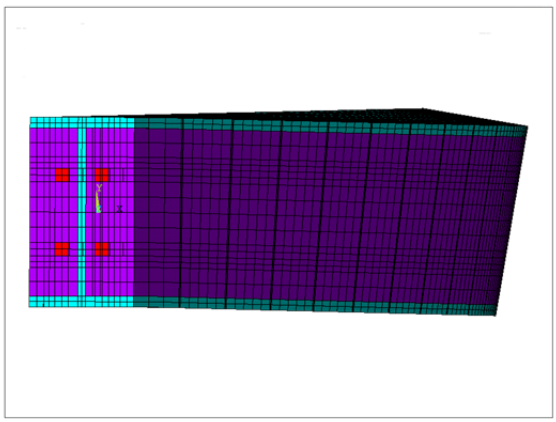


Figura 97 - LTB vista com a viga de topo.

5.4 Método analítico de cálculo do momento plástico.

O momento plástico da secção ocorre quanto os materiais entram no regime plástico.

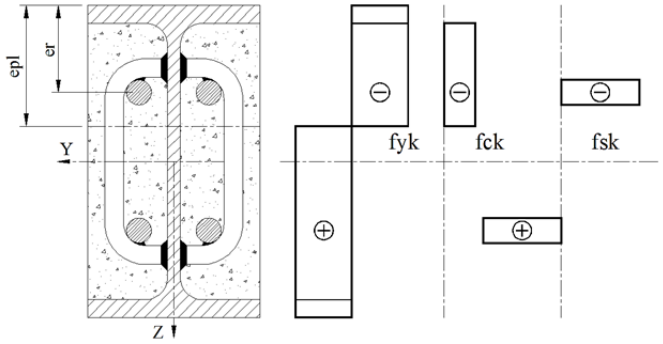


Figura 98 - Distribuição de tensões.

O cálculo do momento plástico do perfil IPE efetua-se através da seguinte equação (40), simplificada na equação (42).

$$Mpl = \int [\sigma_x dA] \times z \tag{40}$$

$$Mpl = f_y \int z \times dA \tag{41}$$

$$Mpl = f_y \times W_{pl} \tag{42}$$

Onde Mpl - é o momento plástico, σ_x - tensão principal na direção x, dA - área infinitesimal, z - braço da área infinitesimal relativamente ao CG da secção, f_y - tensão de cedência do material, W_{pl} - módulo plástico da secção (momento estático de 1ª ordem).

Nas vigas parcialmente embebidas betão devem ser utilizadas algumas hipóteses simplificativas para contabilizar o contributo misto dos materiais envolvidos. A parte do betão é considerada, reduzindo este contributo a uma parte equivalente em aço, considerando os valores relativos dos módulos de elasticidade transversal (G_c / G_a) e longitudinal (E_c / E_a).

O valor equivalente em aço da constante de torção ($I_{tc,red}$) e o momento de 2ª ordem equivalente em aço ($I_{zc,red}$) do betão, devem ser aproximados de acordo com as expressões seguintes [8].

$$I_{tc,red} = I_{tc} \times \frac{G_c}{G_a} \tag{43}$$

$$I_{zc,red} = I_{zc} \times \frac{E_c}{E_a} \tag{44}$$

Nas expressões (43) e (44), I_{tc} representa a constante de torção do betão, I_{zc} momento de 2ª ordem do betão.

Na Figura 99 está representada a geometria da secção reta da viga.

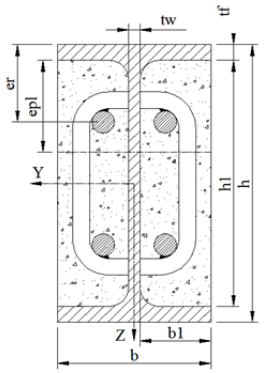


Figura 99 - Geometria da secção da viga.

O cálculo do fator da constante de torção efetua-se através da expressão seguinte.

$$\alpha = \left(1 - 0{,}63\ e_{pl} / \left(b - t_w\right)\right) / 3 \tag{45}$$

O valor da constante de torção do betão é calculado na expressão (39).

$$I_{tc} = (b - t_w) e_{pl}{}^3 \alpha \tag{46}$$

O valor da constante de torção da viga parcialmente embebida com betão PEB obtém-se através da expressão (40).

$$I_t = I_{ta} + I_{tc,red} \tag{47}$$

O valor do momento de segunda ordem ou momento de inércia do betão obtém-se na expressão (41).

$$I_{zc} = \frac{e_{pl} \left(b - t_w\right)^3}{12} \tag{48}$$

O valor do momento de inércia total da secção da viga PEB obtém-se na expressão (42).

$$I_z = I_{za} + I_{zc,red} \tag{49}$$

A posição do eixo neutro plástico obtém-se na seguinte expressão.

$$e_{pl} = \frac{2 f_{yk}\ t_w\ h_1/2}{2 f_{yk}\ t_w + 2 f_{ck} b_1} \tag{50}$$

Nas expressões (45) a (52), α é o fator da constante de torsão; e_{pl} é a posição do eixo neutro plástico; f_{yk} é a tensão de cedência característica do aço do perfil; f_{ck} é a tensão de cedência à compressão característica do betão; b é o comprimento do banzo; t_w é a espessura da alma; h_1 é a altura entre banzos; I_t é a constante de torção da PEB; I_z é o momento de 2ª ordem da viga PEB; I_{ta} é a constante de torção do perfil; I_{za} é o momento de 2ª ordem do perfil.

O momento plástico para temperatura de 20ºC, da secção da viga parcialmente embebiba com betão PEB é obtido na expressão seguinte.

$$M_{pl} = W_{pl,y}.f_{yk} - 2.f_{yk}.t_w.\left(0.5h_1 - e_{pl}\right)^2 \Big/ 2 + f_{ck}.2.b_1.e_{pl}\left(0.5h_1 - 0.5e_{pl}\right) + 2.A_r.\left(f_{sk} - f_{ck}\right)\left(h - 2.e_r\right) \tag{51}$$

Onde f_{sk} é a tensão de cedência característica do aço do reforço; e_r é excentricidade do CG do varão de reforço.

A dedução do momento plástico para elevadas temperaturas, expressão (45), é determinada partir da expressão (44) do momento plástico para nível de temperatura de 20°C, afetando as propriedades com os coeficientes de redução.

$$M_{pl,\theta} = W_{pl,y}.f_{yk}.k_{y\theta} - 2.f_{yk}.k_{y\theta}.t_w.\left(0.5h_1 - e_{pl}\right)^2 \Big/ 2 + f_{ck}.k_{c\theta}.2.b_1.e_{pl}\left(0.5h_1 - 0.5e_{pl}\right) + 2.A_r.\left(f_{sk}.k_{s\theta} - f_{ck}.k_{c\theta}\right)\left(h - 2.e_r\right) \tag{52}$$

Onde $k_{y\theta}$ é o coeficiente de redução das propriedades mecânicas do aço do perfil; $k_{c\theta}$ é o coeficiente de redução das propriedades mecânicas do betão; $k_{s\theta}$ é o coeficiente de redução das propriedades mecânicas do aço do reforço.

Tabela 14 - Momento plástico PEB e IPE a vários níveis de temperatura.

$M_{pl}\ [N \times m]$		
Temperatura	PEB	IPE
Ambiente	14835,60	11822,05
200 °C	14794,65	11822,05
400 °C	14485,95	11822,05
600 °C	6788,70	5556,36

5.5 Método avançado de cálculo para determinação da resistência à encurvadura lateral.

Para a determinação da resistência à encurvadura lateral, foi utilizada uma análise não linear geométrica (grandes deslocamentos) e material.

Para introduzir as imperfeições geométricas no modelo de elementos finitos foram utilizados os modos de instabilidade determinados no capítulo 5.3, com amplificação adequada. Afetou-se o valor desse modo de deformação por um fator, de modo que a imperfeição geométrica lateral no nó do CG da secção SM seja de L/600. Como referido no capítulo 6 (conclusões e trabalhos futuros), poder-se-ia usar os valor das imperfeiçoes medidas nas vigas de ensaios. Esta opção não foi considerada por se considerar que o elemento possa ter uma rotação inicial.

Segundo o Eurocódigo EN1993-1-5 [28], a curva real de extensão-tensão do aço do perfil pode ser obtida através da curva de engenharia que resulta do ensaio de rotura à tração. Na Figura 100 estão representadas as curvas de engenharia e real do aço do perfil. Nas expressões (53) e (54) demostra-se como se obtiveram os pontos para definir a curva real.

$$\varepsilon_{real} = \ln\left(1+\varepsilon\right) \tag{53}$$

$$\sigma_{real} = \sigma\left(1+\varepsilon\right) \tag{54}$$

Em que ε_{real} é a extensão ou deformação real do aço, ε é a extensão obtida no ensaio de rotura à tração, σ_{real} é a tensão real e σ é atenção obtida do ensaio de rotura à tração.

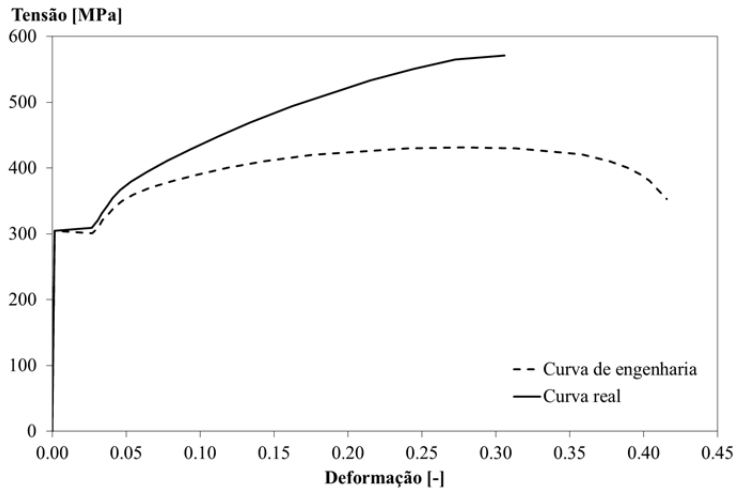


Figura 100 - Curvas extensão-tensão real e de engenharia do aço do perfil.

Na Figura 101 estão representadas as curvas extensão-tensão do aço do perfil para os níveis de temperatura considerados.

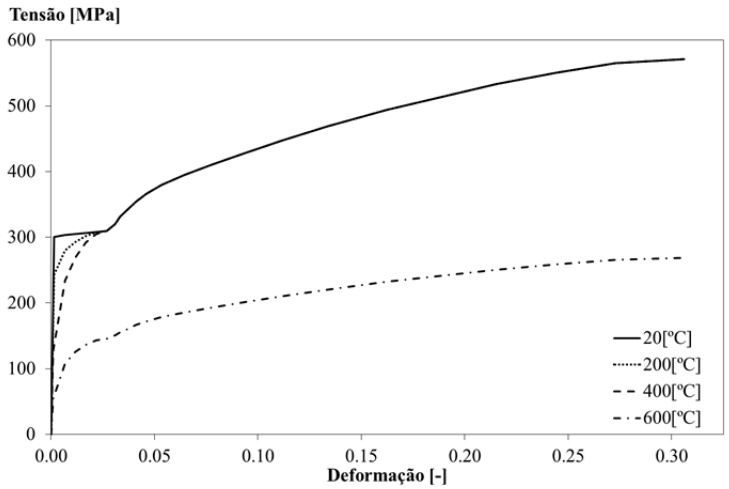


Figura 101 - Curvas extensão-tensão reais do aço do perfil.

O comportamento deste material à compressão é idêntico ao comportamento à tração.

Na Figura 102 está representada a curva de resistência modificada para o betão. Esta simplificação tem em consideração o confinamento que este material está submetido.

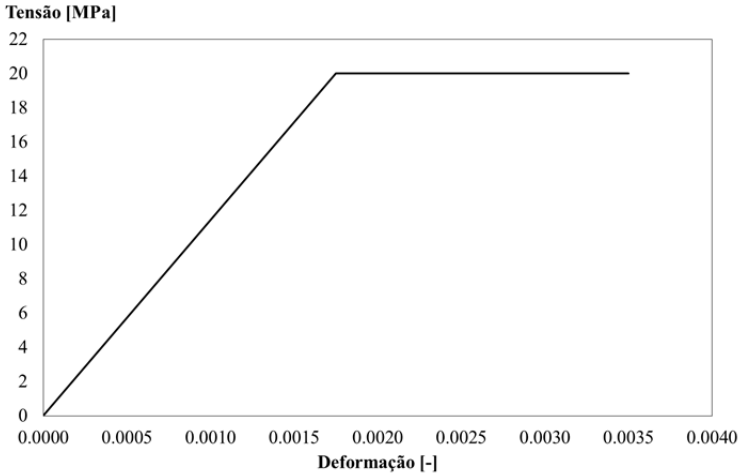


Figura 102 - Curva extensão-tensão do betão a 20ºC utilizada no Ansys.

Na Figura 103 está representada a curva de resistência a temperaturas elevadas definida no Eurocódigo EN1992-1-2 [18].

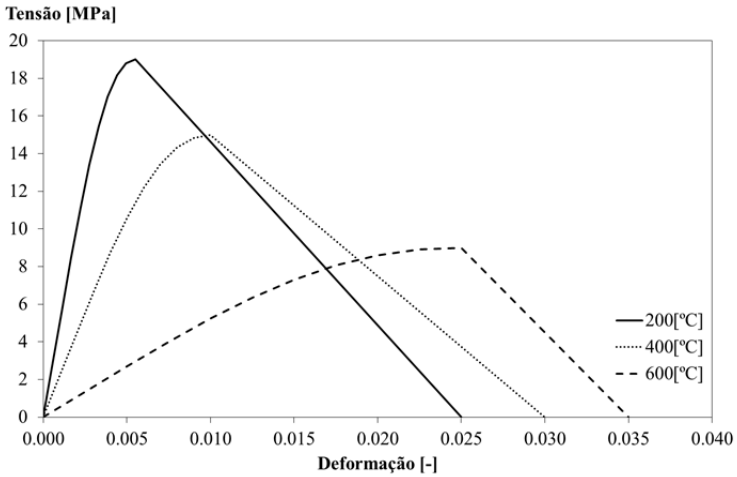


Figura 103 - Curva tensão-extensão do betão a elevadas temperaturas.

Na Figura 104 estão representadas as curvas tensão-extensão para os níveis de temperaturas elevadas a que se efetuaram as simulações numéricas (200ºC, 400ºC e 600ºC). O ramo descendente das curvas foi considerado como constante, considerando assim o aumento da resistência à compressão do betão confinado.

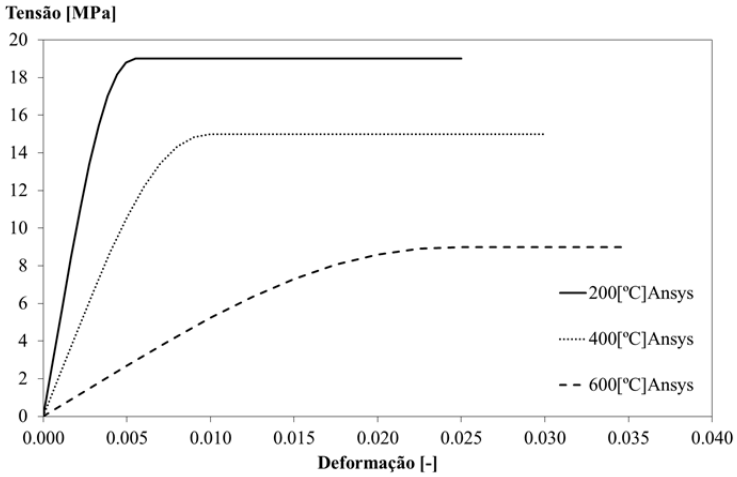


Figura 104 - Curva tensão-extensão do betão a elevadas temperaturas utilizada no Ansys.

O comportamento do betão à tração difere do comportamento à compressão. Neste modelo foi assumido um comportamento igual em ambos os domínios.

Na Figura 105 está representado o modelo simplificado do comportamento do aço do reforço.

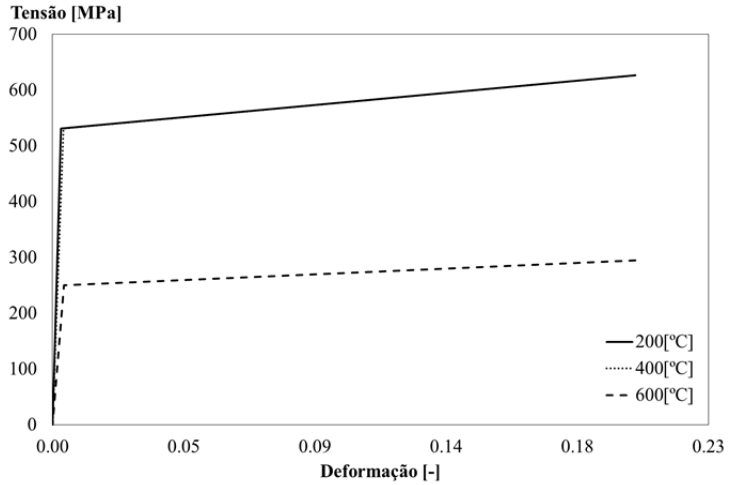


Figura 105 - Curva tensão-extensão do aço do reforço a elevadas temperaturas utilizada no Ansys.

Para os materiais aço do perfil e aço do reforço e dos estribos foi utilizado o elemento finito "Solid 185". Para o betão foi utilizado o elemento "Solid 65". Como referido no capítulo 5.3, onde se determinou o momento crítico, o elemento "Solid 185" permite efetuar uma análise estrutural num domínio tridimensional. O elemento utilizado para simular o betão "Solid 65" permite a introdução do critério de dano, provocado pelo fissuramento à tração "cracking" e por o esmagamento do betão à compressão "crushing". Por dificuldades de convergência nas simulações, não foi considerado o efeito do "cracking" e "crushing", mas em trabalhos futuros recomenda-se a introdução desse critério de dano, bem como o refinamento da malha.

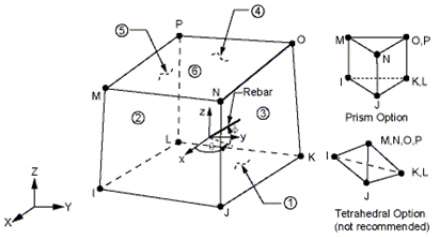


Figura 106 - Elemento finito "SOLID65", [29].

Na Figura 107 está representada a malha de elementos finitos. O modelo utiliza elementos finitos sólidos hexaedros com seis faces retangulares e malha regular.

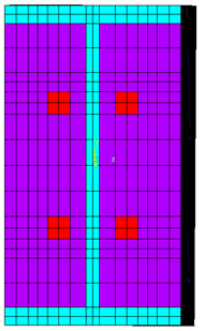


Figura 107 - Malha do modelo numérico.

A carga foi implementada de forma quase estática, incrementar e adaptativa. Na Tabela 15 estão definidos a carga final a que a simulação acaba, o incremento normal de carga, o mínimo e máximo.

Tabela 15 - Incrementos de carga.

Carga [N]	
Carga final	50000
Incremento de carga	500
Incremento mínimo	2,5
Incremento máximo	1000

O atrito entre o aço do perfil e o aço dos apoios foi simulado introduzindo nos 17 nós da base do perfil uma força F_a, contrária à tendência de deslocamento da viga. Foi adotado inicialmente o valor de 0,7 para o coeficiente de atrito, mas nas simulações finais foi considerado o valor de 0,5, por melhor se aproximarem os valores dos deslocamentos verticais e transversais aos obtidos experimentalmente.

$$F_a = \mu_s R_N \tag{55}$$

$$R_N = -F \tag{56}$$

Onde F_a é a força de atrito; μ_s é o coeficiente de atrito estático; R_N é o valor da reação normal no apoio; F é a carga aplicada em cada cilindro hidráulico.

O processo de solução utilizou um critério de convergência baseado no deslocamento, com uma tolerância igual ou inferior a 8% ($\Delta u \leq 0,08$).

$$\Delta u = u_i - u_{i-1} \tag{57}$$

Onde Δu é a diferença entre o deslocamento na iteração i (u_i) e o deslocamento na iteração anterior (u_{i-1}).

5.5.1 Vigas série média.

Para as vigas da série média (Lt=2,5 m), são apresentados os resultados do deslocamento transversal Z_G e lateral Y_G do centro de gravidade da secção média da viga "SM", em função da carga "Load".

Foram observados 4 eventos de carga na análise dos resultados, ver Figura 108. A força "F_p" é definida para o início da cedência do material. A força "F_y" é definida a partir da interseção de duas linhas tangentes do gráfico força versus deslocamento transversal, refletindo a plastificação da secção. A força "$F_{L/30}$" foi definida para o critério de deslocamento L/30, normalmente utilizado para o ensaio de resistência ao fogo. A força última "F_u" corresponde ao valor máximo medido no ensaio.

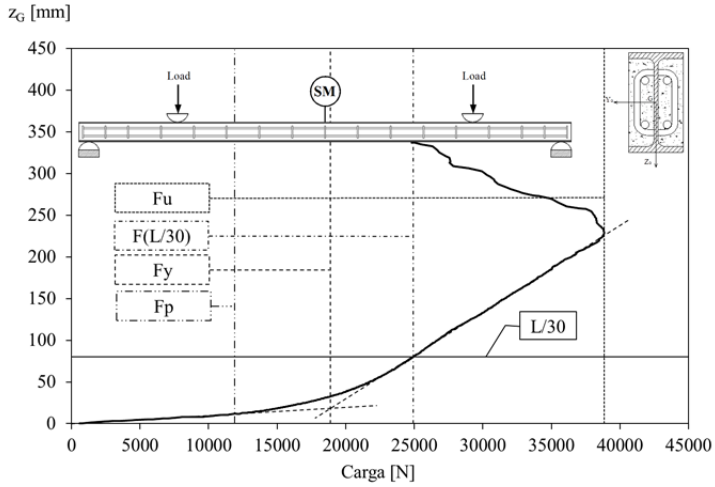


Figura 108 - Eventos de carga.

5.5.1.1 Simulação à temperatura ambiente.

Na Figura 109 está representado o comportamento do deslocamento transversal do centro de gravidade da secção "SM" Z_G. Numa primeira fase o deslocamento varia linearmente com a carga, até se atingir o limite de proporcionalidade "F_p". Depois deste valor de carga, o material começa a plastificar, atingindo o estado limite último, com um modo de deformação de encurvadura lateral torsional.

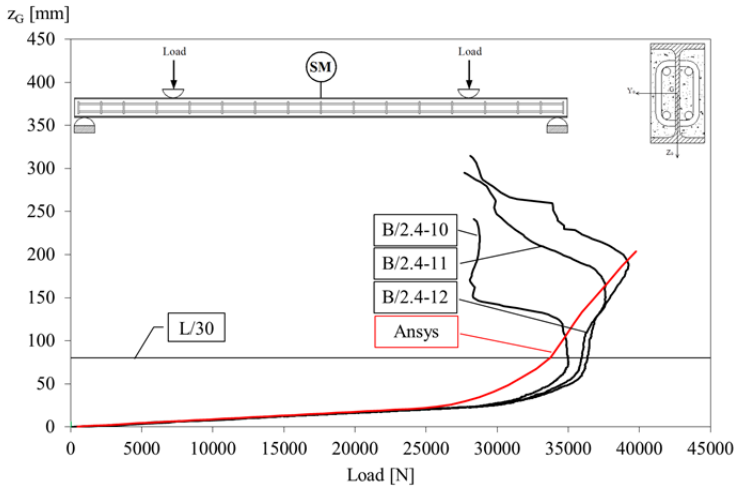


Figura 109 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

Na Figura 110 está representado o comportamento do deslocamento lateral do centro de gravidade da secção Y_G .

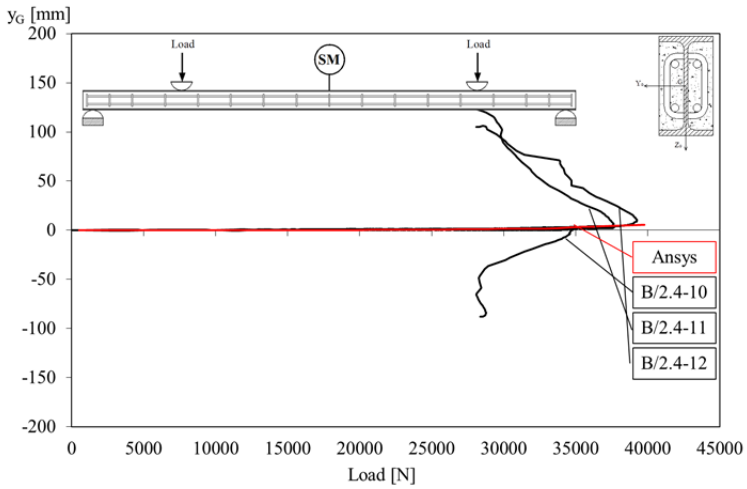


Figura 110 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

5.5.1.2 Simulação a 200 °C.

Na Figura 111 está representado o comportamento do deslocamento transversal do centro de gravidade da secção Z_G . Numa primeira fase o deslocamento varia linearmente com a carga, até se atingir o limite de proporcionalidade. Depois deste valor de carga, o material começa a plastificar, atingindo o estado limite último, com um modo de deformação de encurvadura lateral torsional.

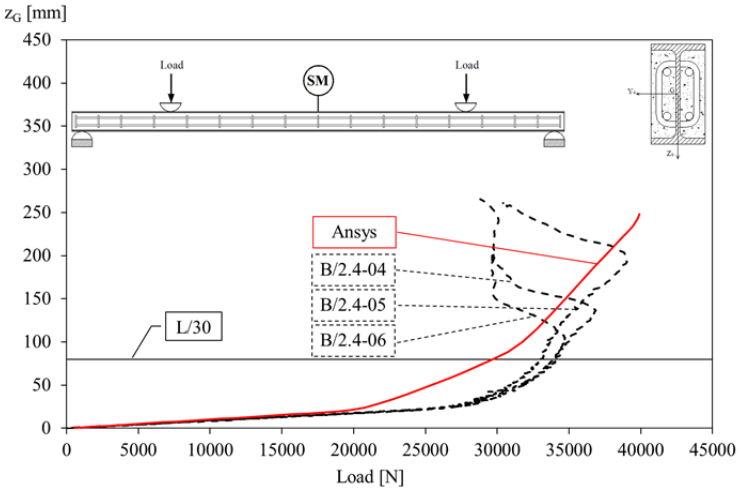


Figura 111 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

Na Figura 112 está representado o comportamento do deslocamento lateral do centro de gravidade da secção Y_G .

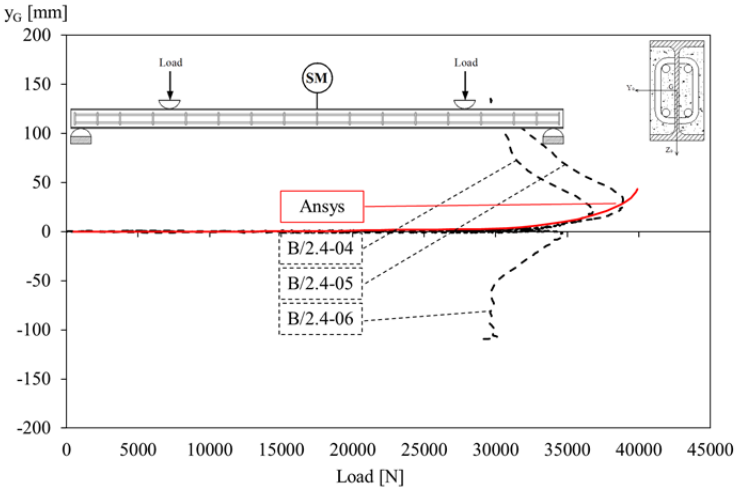


Figura 112 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

5.5.1.3 Simulação a 400 °C.

Na Figura 113 está representado o comportamento do deslocamento transversal do centro de gravidade da secção Z_G . Numa primeira fase o deslocamento varia linearmente com a carga, até se atingir o limite de proporcionalidade. Depois deste valor de carga, o material começa a plastificar, atingindo o estado limite último, com um modo de deformação de encurvadura lateral torsional.

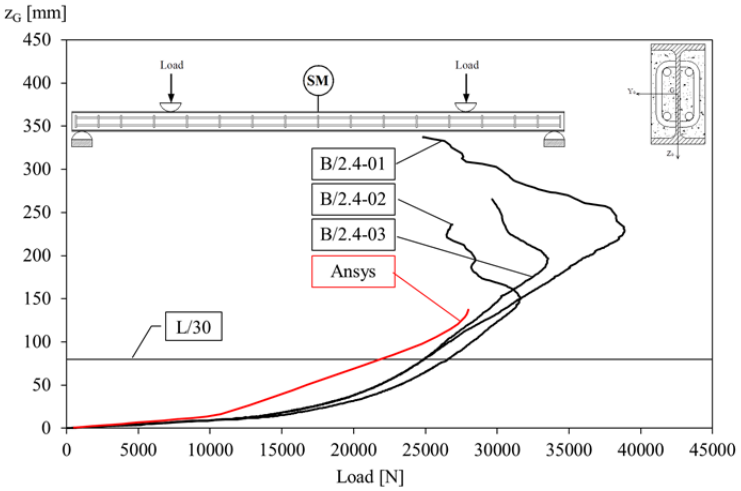


Figura 113 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

Na Figura 114 está representado o comportamento do deslocamento lateral do centro de gravidade da secção Y_G .

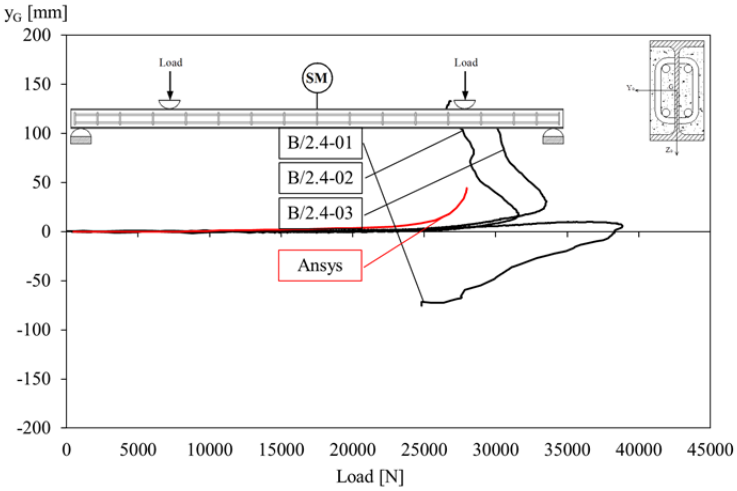


Figura 114 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

5.5.2 Vigas série grande.

Nas simulações numéricas e nos ensaios experimentais, para as vigas da série grande (L=4,0 m), apresentam-se os resultados do deslocamento transversal Z_G e lateral Y_G do centro de gravidade da secção média da viga "SM", em função da carga "Load".

5.5.2.1 Simulação à temperatura ambiente.

Na Figura 115 está representado o comportamento do deslocamento transversal do centro de gravidade da secção Z_G . Numa primeira fase o deslocamento varia linearmente com a carga, até se atingir o limite de proporcionalidade. Depois deste valor de carga, o material

começa a plastificar, atingindo o estado limite último, com um modo de deformação de encurvadura lateral torsional.

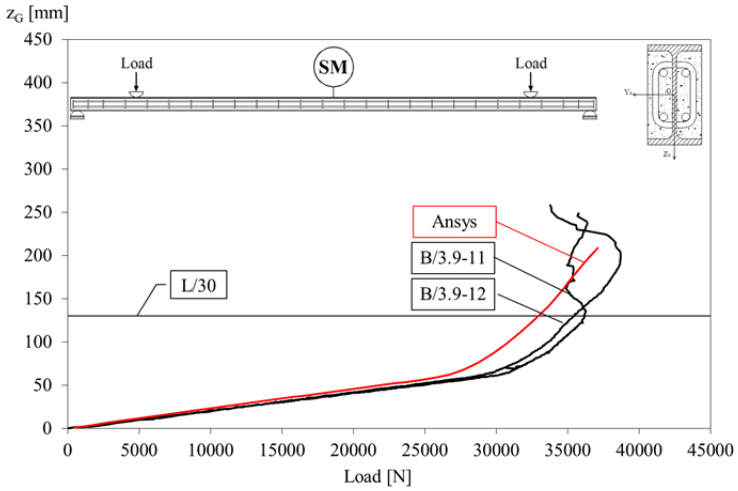


Figura 115 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

Na Figura 116 está representado o comportamento do deslocamento lateral do centro de gravidade da secção Y_G .

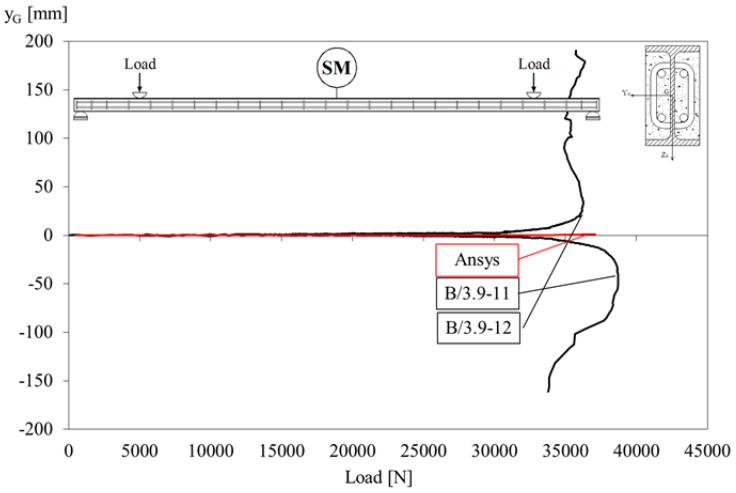


Figura 116 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

5.5.2.2 Simulação a 400 °C.

Na Figura 117 está representado o comportamento do deslocamento transversal do centro de gravidade da secção Z_G . Numa primeira fase o deslocamento varia linearmente com a carga, até se atingir o limite de proporcionalidade. Depois deste valor de carga, o material começa a plastificar, atingindo o estado limite último, com um modo de deformação de encurvadura lateral torsional.

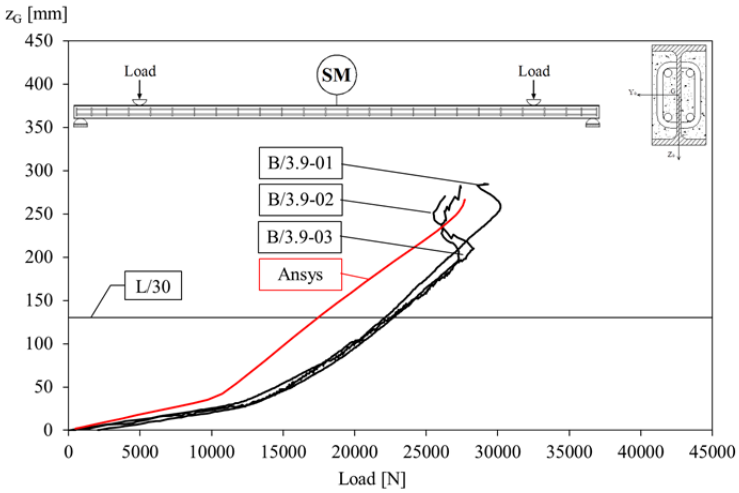


Figura 117 - Deslocamento vertical ZG da secção SM.

Na Figura 118 está representado o comportamento do deslocamento lateral do centro de gravidade da secção Y_G .

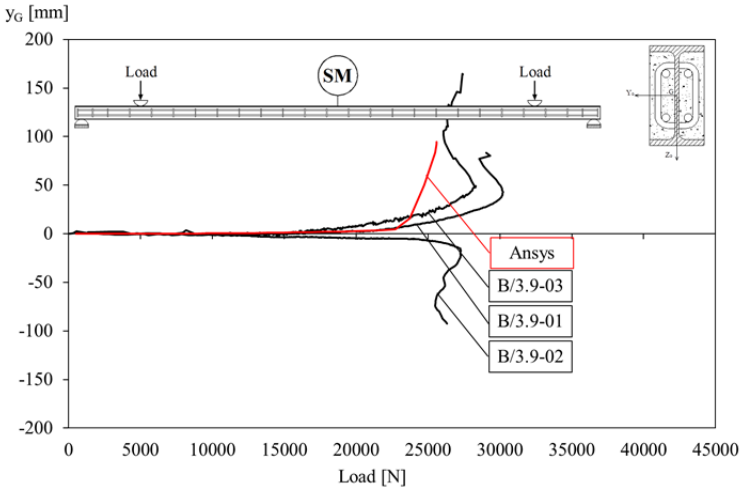


Figura 118 - Deslocamento lateral YG da secção SM.

5.5.2.3 Simulação a 600 °C.

Na Figura 119 está representado o comportamento do deslocamento transversal do centro de gravidade da secção Z_G . Numa primeira fase o deslocamento varia linearmente com a carga, até se atingir o limite de proporcionalidade. Depois deste valor de carga, o material começa a plastificar, atingindo o estado limite último, com um formação de rótula plástica.

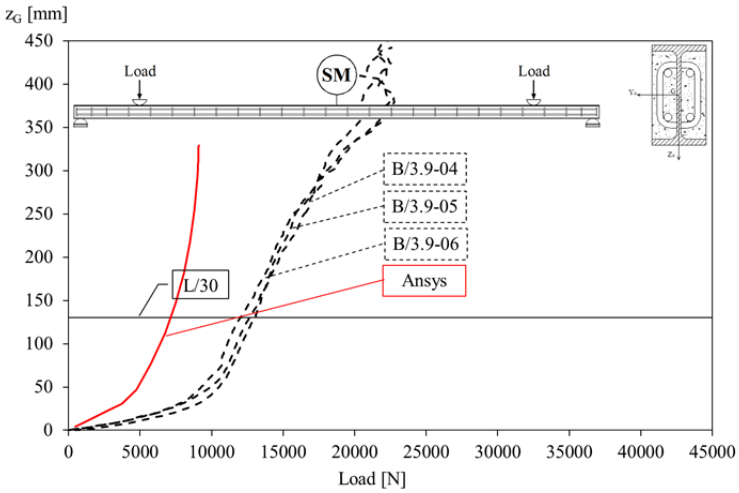


Figura 119 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

Na Figura 120 está representado o comportamento do deslocamento lateral do centro de gravidade da secção Y_G .

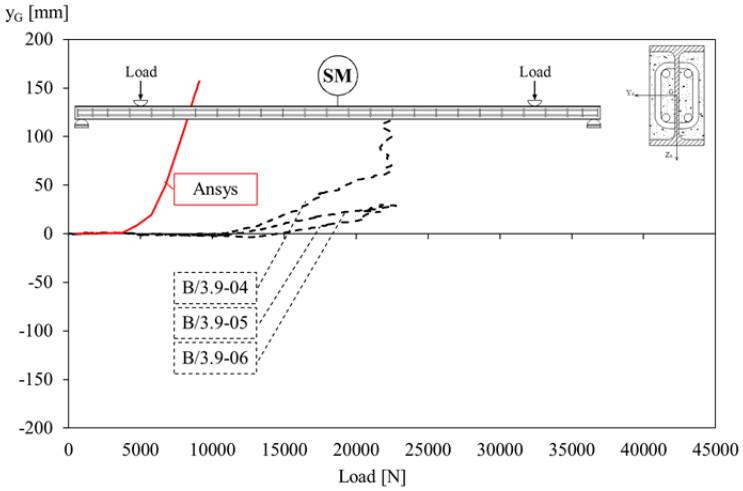


Figura 120 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

5.5.3 Conclusões.

Nas simulações foi assumido que todo o comprimento de viga parcialmente embebida se encontrava exposta a temperaturas elevadas. Nos ensaios experimentais só uma parte da viga foi aquecida (Lf) e a temperatura ao longo dessa parte não é uniforme, pelo que nas regiões extremas a rigidez é superior e a resistência também. Pressupõe-se que seja o principal fator para explicar diferença de resultado entre as simulações numéricas e os ensaios experimentais.

6 CONCLUSÕES E TRABALHO FUTUROS.

Foram realizados 27 ensaios à flexão na tipologia de 4 pontos, sendo que 9 ensaios foram realizados à temperatura ambiente e 18 a temperaturas elevadas. Das vigas ensaiadas à temperatura ambiente, 5 ensaios foram realizados com vigas parcialmente embebidas com betão PEB e 4 com o perfil metálico IPE100. Das vigas ensaiadas a elevadas temperaturas, todas PEB, 12 foram testadas para a um nível de temperatura de 400 °C considerando diferentes condições de ligação dos estribos com a alma do perfil, 3 a nível de temperatura de 200 °C e 3 a nível de temperatura de 600 °C.

Para trabalhos futuros propõem-se estudar vigas parcialmente embebidas com diferentes secções, secções IPE como diferentes dimensões e secções com outras formas e dimensões, por exemplo HEB. Também se propõe a verificação da resistência para outros comprimentos de viga para além dos utilizados (2,5 m e 4,0 m), outros níveis de temperatura e outras condições de apoio. Também deveriam ser testados diferentes tipos de carregamento, por exemplo cargas uniformemente distribuídas, carga concentrada a meio vão, ou outras condições. Também devem ser estudados diferentes tipos de estribos, bem como a utilização de conectores soldados à alma do perfil.

O cálculo das temperaturas por elementos finitos utilizou uma análise não linear, transiente de uma secção reta do perfil - 2D, apenas simulando a secção S2. Propõe-se a utilização de um modelo tridimensional com as mesmas características, afetando os elementos com diferentes níveis de temperatura, em consequência da falta de isolamento nas extremidades do perfil e ao longo deste.

No método avançado de cálculo para a determinação da resistência à encurvadura lateral seria necessário refinar a malha do modelo numérico, bem como simular as condições de adesão entre os materiais, uma vez que foram consideradas como contacto perfeito. Quanto ao tipo de análise efetuada não inclui-o a introdução do critério de dano, provocado por o fissuramento à tração “cracking” e por o esmagamento do betão à compressão “crushing”, por motivos relacionados com a convergência da solução. Mas em trabalhos futuro o critério de dano no betão deve ser incluído para uma melhor aproximação das simulações numéricas aos ensaios experimentais.

Na introdução das imperfeições poderiam se utilizar as máximas imperfeições medidas na viga antes dos ensaios, uma vez que foram utilizados os modos de instabilidade

determinados na análise de estabilidade elástica com ajuste da amplitude máxima (L/600) correspondente ao deslocamento lateral a meio-vão.

REFERÊNCIAS.

[1] CEN - EN 1994-1-2; *"Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design"*; Brussels, August 2005.

[2] Hunaiti, Y.; Fattah, B. A.; "Design considerations of partially encased composite columns", *Proceedings Institution of Civil Engineers Structures & Buildings*, v.106, pp.75-82, Feb. 1994.

[3] A. Plumier, A. Abed, B. Tiliouine, "Increase of buckling resistance and ductility of H-sections by encased concrete", *Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas*, E & FN Spon, London, ISBN: 0419 198903, 1995.

[4] Brent Pricket, Robert Driver, "Behaviour of partially encased composite columns made with high performance concrete", *Structural Engineering report nº 262*, University of Alberta, Department of Civil & Environmental Engineering, 2006.

[5] António J.P. Moura Correia, João Paulo C. Rodrigues, "Fire resistance of partially encased steel columns with restrained thermal elongation", *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 67, Issue 4, pp. 93-601, April 2011.

[6] R. Kindmann, R. Bergmann, L-G. Cajot, J. B. Scleich; "Effect of reinforced concrete between the flanges of the steel profile of partially encased composite beam"; *Journal of Constructional Steel Research*, 27, pp 107-122, 1993.

[7] D.Hosser, T. Dorn, O. El-Nesr, "Experimental and numerical studies of composite beams exposed to fire", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, No.10, pp. 2871-2892, 1994.

[8] Joachim Lindner, Nikos Budassis; "Lateral torsional buckling of partially encased composite beams without concrete slab"; *Composite construction in steel and concrete IV*, conference proceedings, May 28th to June 2nd , Banff, Alberta, Canada, pp. 117-128, 2000.

[9] R. Maquoi, C. Heck, V. Ville de Goyet, et al, (European commission), "Lateral torsional buckling in steel and composite beams"; ISBN 92-894-6414-3; Book 1,2 and 3; *Technical steel research final report* EUR 20888 EN; August 2002.

[10] I.M. Assi, S.M. Abed, Y.M. Hunaiti, "Flexural strength of composite beams partially encased in lightweight concrete", *Pakistan Journal of Applied Sciences* 2(3), pp. 320-323, 2002.

[11] Akio Kodaira, Hideo Fujinaka, Hirokazu Ohashi and Toshihiko Nishimura; "Fire Resistance of Composite Beams Composed of Rolled Steel Profile Concreted Between Flanges"; *Fire Science and Technology* Vol.23 No.3, pp. 192-208, 2004.

[12] A.Y. Elghazouli, J. Treadway. "Inelastic behaviour of composite members under combined bending and axial loading", *Journal of Constructional Steel Research*, 64, pp. 1008–1019, 2008.

[13] Silvana de Nardin, Ana Lucia H.C. El Debs, "Study of partially encased composite beams with innovative position of stud bolts", *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 65, Issue 2, pp. 342-350, February 2009.

[14] CEN - EN 1993-1-1; "Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules - Rules for buildings.", *European standards*; Brussels, 2005.

[15] CEN - EN 1993-1-2; "Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design", *European standards*; Brussels, April 2005.

[16] ISO TC 164, ISO 6892-1; "*Metallic materials – tensile testing – part 1: Method of test at room temperature"*; Switzerland, international standard, 2009.

[17] CEN - EN 1992-1-1; "Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.", *European standards*; Brussels, 2004.

[18] CEN - EN 1992-1-2; "Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules structural fire design.", *European standards*; Brussels, 2004.

[19] CEN NP 206-1:2007; "Concrete - Part 1: Specification, performace, production and conformity", *European standards*; Brussels, 2005.

[20] CEN NP 933-1:1997; "Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - sieving method", *European standards*; Brussels, August 1997.

[21] CEN - EN 1991-1-2; "Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions on structures exposed to fire", *European standards*; Brussels, 2009.

[22] Vila Real, Paulo, "Incêndio em estruturas metálicas - Cálculo estrutural", *Edições Oriom*, capítulo 2, pag. 12,18 e 19, 1ª Edição; 2003.

[23] ANSYS® Academic Research, Release 14.0, Help System, Mechanical APDL/Element Reference/I. Element Library/PLANE55, ANSYS, Inc.

[24] Simões, Rui A. D., "Dimensionamento de estruturas metálicas - Eurocódigo 3: Projecto de estruturas de aço - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios", *Edição CMM*, capítulo 3, pp. 146, 2ª Edição; Fevereiro 2007.

[25] ANSYS® Academic Research, Release 14.0, Help System, Theory Reference/Analysis Tools/Eigenvalue and Eigenvector Extraction, ANSYS, Inc.

[26] ANSYS® Academic Research, Release 14.0, Help System, Theory Reference/Analysis Tools/Eigenvalue and Eigenvector Extraction/Subspace Method, ANSYS, Inc.

[27] ANSYS® Academic Research, Release 14.0, Help System, Mechanical APDL/Element Reference/I. Element Library/SOLID185, ANSYS, Inc.

[28] CEN - EN 1993-1-5; "Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements", *European standards*; Brussels, October 2006.

[29] ANSYS® Academic Research, Release 14.0, Help System, Mechanical APDL/Element Reference/I. Element Library/ SOLID65, ANSYS, Inc.

[30] http://pt.wikipedia.org/wiki/Politetrafluoretileno, Setembro 2012.

ANEXO A – MATERIAIS.

AÇO PERFIL (S275)

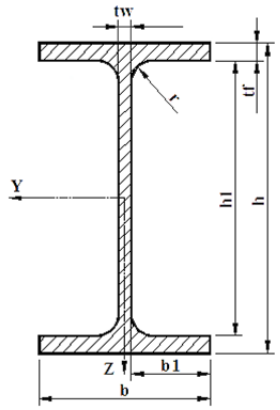


Figura A 1 - Perfil IPE100.



Figura A 2 - Ensaio rotura à tracção.

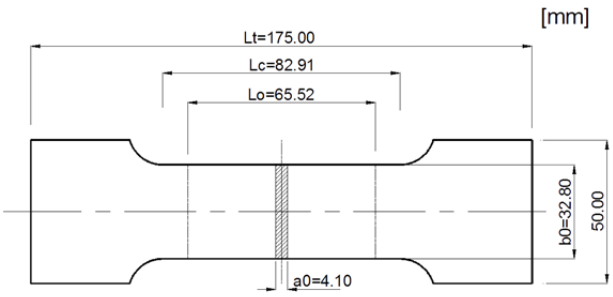


Figura A 3 - Provete de ensaio.

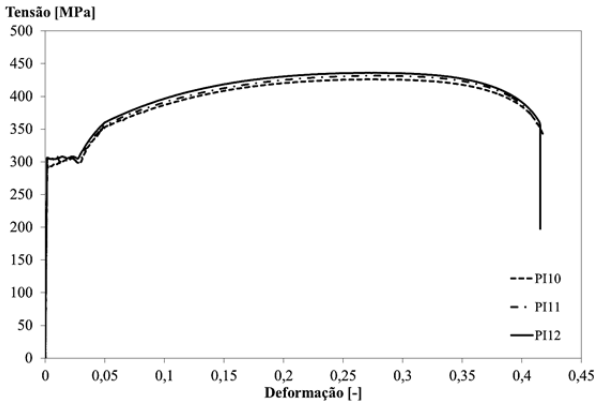


Figura A 4 - Resultados ensaios.

Tabela A 1 - Dimensões do IPE100.

Dimensões	h	h1	b	b1	tw	tf	r
[mm]	100	88,6	55	25,5	4,1	5,7	7

Tabela A 2 - Características nomimais de resistência.

E [GPa]	G [GPa]	f_y [MPa]	f_u [MPa]
210	81	275	430

Tabela A 3 - Resultados ensaios de rotura à tracção.

Ensaio nº	E [GPa]	$R_{p.0,2\%}$ [MPa]	ReH [MPa]	ReL [MPa]	Rm [MPa]	At [%]
PI1	198,606	292,989	295,848	296,741	426,061	41,834
PI2	200,433	304,256	305,329	301,038	431,612	41,378
PI3	194,664	304,969	306,222	304,789	436,082	41,540
Média	197,901	300,738	302,466	300,856	431,252	41,584
Desv. Padrão	2,948	6,720	5,749	4,028	5,020	0,231

E- Módulo de Elasticidade, $R_{p.0,2\%}$ - Tensão aos 0,2% de extensão, ReH- Tensão de cedência máxima, ReL- Tensão de cedência mínima, Rm- Tensão de rotura, At- Extensão total no momento da rotura.

AÇO DAS ARMADURAS DE BETÃO ARMADO (S500 NR CLASSE B)

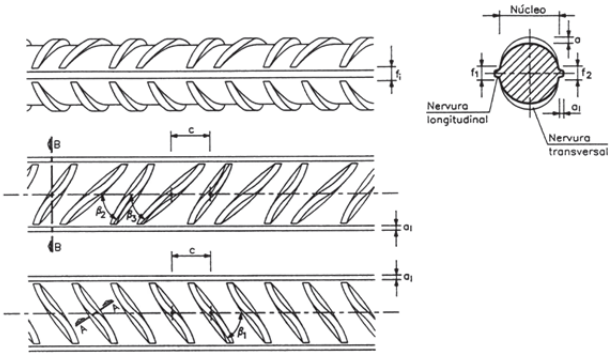


Figura A 5 - Nervuras do varão aço S500 NR.

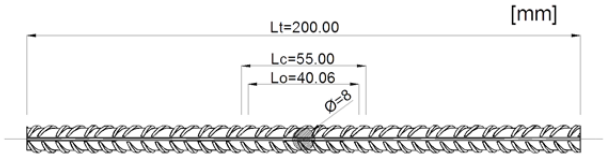


Figura A 6 - Provete de ensaio.

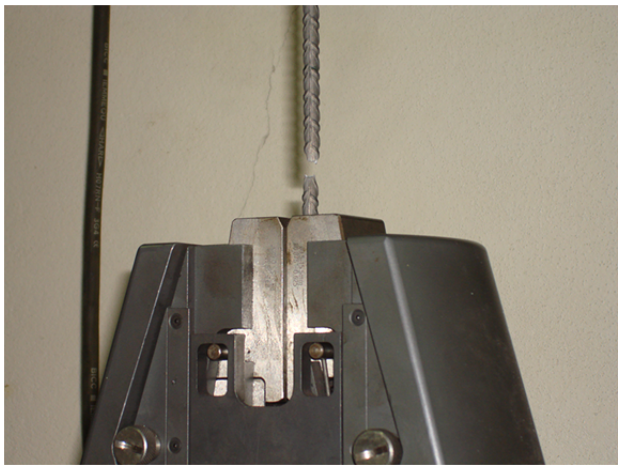


Figura A 7 - Ensaio rotura à tracção.

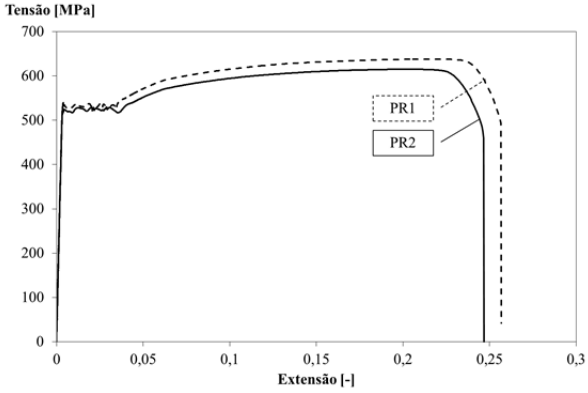


Figura A 8 - Resultados ensaios.

Tabela A 4 - Características nomimais de resistência.

E [GPa]	f_y [MPa]	k	$f_u=k.f_y$ [MPa]
200	500	1.08	540

Tabela A 5 - Resultados ensaios de rotura à tracção.

Ensaio nº	E [GPa]	$R_{p.0,2\%}$ [MPa]	ReH [MPa]	ReL [MPa]	Rm [MPa]	At [%]
PR1	201,184	528,514	539,416	524,893	638,112	25,650
PR2	205,403	521,472	523,600	516,757	615,035	24,660
Média	203,294	524,993	531,508	520,825	626,574	25,155
Desv. Padrão	2,110	3,521	7,908	4,068	11,539	0,495

E- Módulo de Elasticidade, $R_{p.0,2\%}$ - Tensão aos 0,2% de extensão, ReH- Tensão de cedência máxima, ReL- Tensão de cedência mínima, Rm- Tensão de rotura, At- Extensão total no momento da rotura.

BETÃO (C20/25)

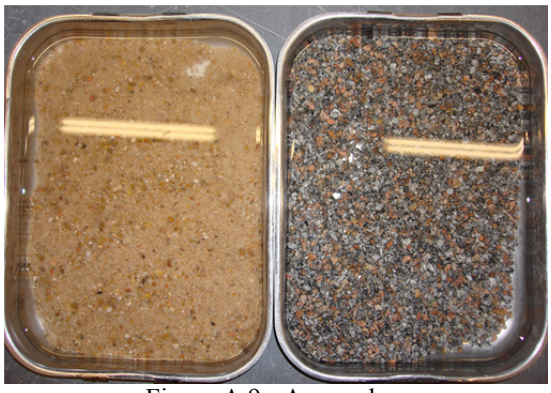


Figura A 9 - Agregados.

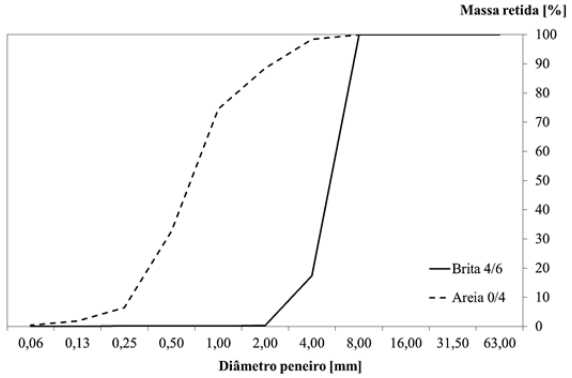


Figura A 10 - Curvas granulométricas dos agregados.



Figura A 11 - Mistura dos componentes do betão.



Figura A 12 - Ensaio rotura à compressão.

Tabela A 6 - Composição do betão.

Componentes por [m3] betão				
Areia 0/4 [kg]	Brita 4/6 [kg]	Água [l]	Cimento [kg]	Água / Cimento [%]
1322,7	451,1	198	466,7	45

Tabela A 7 - Características nominais do betão C20/25.

f_{ck} [MPa]	$f_{ck,cube}$ [MPa]	f_{cm} [MPa]	f_{ctm} [MPa]	E_{cm} [GPa]	ε_{c1} [‰]	ε_{cu1} [‰]
20	25	28	2,2	30	2,0	3,5

Tabela A 8 - Ensaio rotura à compressão.

Provete (tipo)	Cura [dias]	Peso [kg]	Máxima força [kN]	Tensão última [MPa]	Área [mm^2]
1 (cubo)	36	7,50	540,98	24,04	22500
2 (cubo)	36	7,50	540,44	24,02	22500
3 (cubo)	36	7,50	534,73	23,77	22500
4 (cubo)	36	7,50	542,09	24,09	22500
Média				23,98	
Desv. padrão				0,12	
1 (cubo)	29	7,40	502,15	22,32	22500
2 (cubo)	29	7,35	495,96	22,04	22500
3 (cubo)	29	7,40	449,96	20,00	22500
Média				21,45	
Desv. padrão				1,03	
1 (cilindro)	29	11,35	358,20	20,27	17671
2 (cilindro)	29	11,30	367,07	20,77	17671
3 (cilindro)	29	11,25	354,33	20,05	17671
Média				20,36	
Desv. padrão				0,30	

ANEXO B – FICHAS TÉCNICAS DOS ENSAIOS.

SÉRIE 1 (ENSAIO - B/2.4-01)

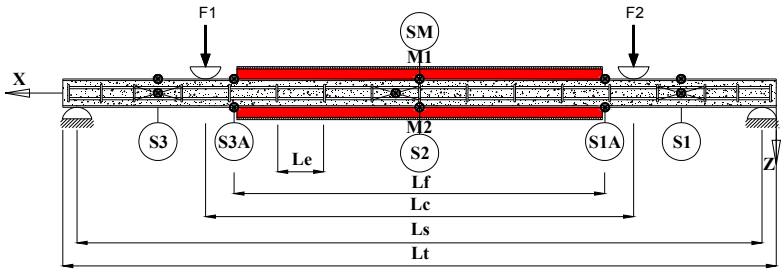


Figura B 1 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

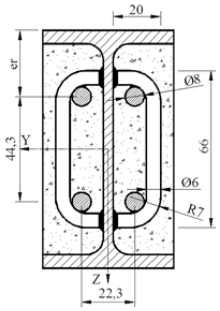


Figura B 2 - Secção da viga.

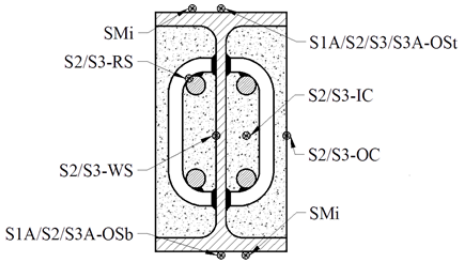


Figura B 3 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi.

Tabela B 1 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{vk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck.cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 2 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Lf [m]	Le [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
2,5	2,4	1,5	1,3	0,167	W	400	2=L/1250

Tabela B 3 - Imperfeições laterais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,25	1,5	2,0	2,45
Imperfeições (Y) [mm]	0	2	1	1	0	0	0

Tabela B 4 - Eventos de carga.

F_p [N]	F_v [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
11910	18890	24932	38864

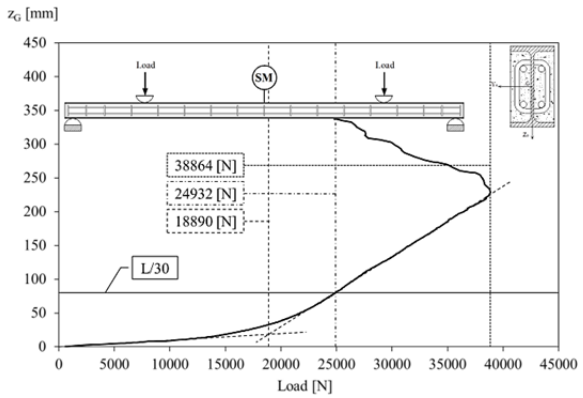


Figura B 4 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

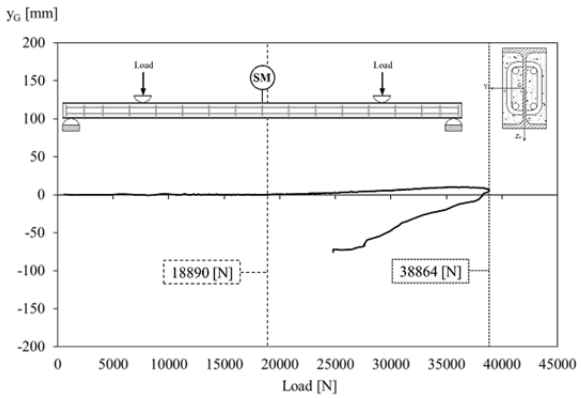


Figura B 5 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

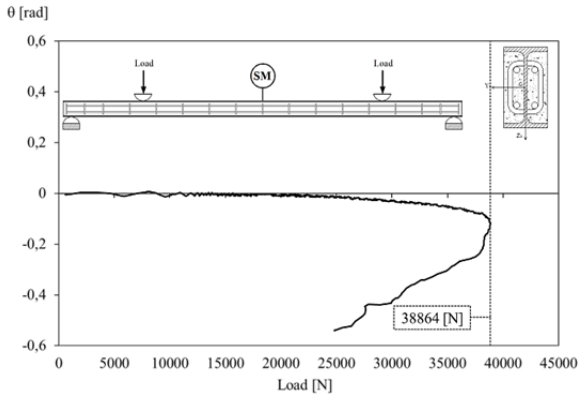


Figura B 6 - Rotação da secção SM.

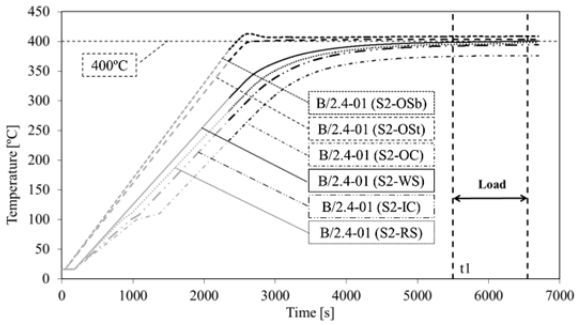


Figura B 7 - Aquecimento da Secção S2.

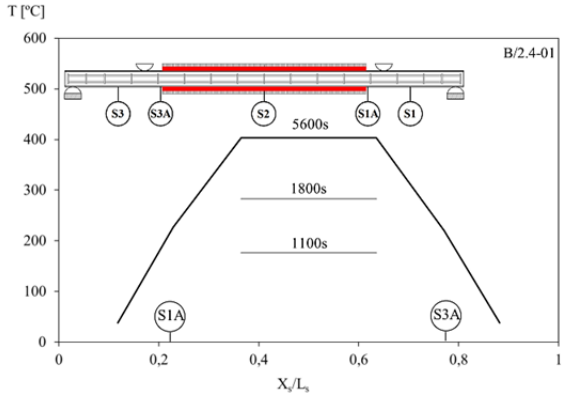


Figura B 8 - Evolução da distribuição de temperatura.

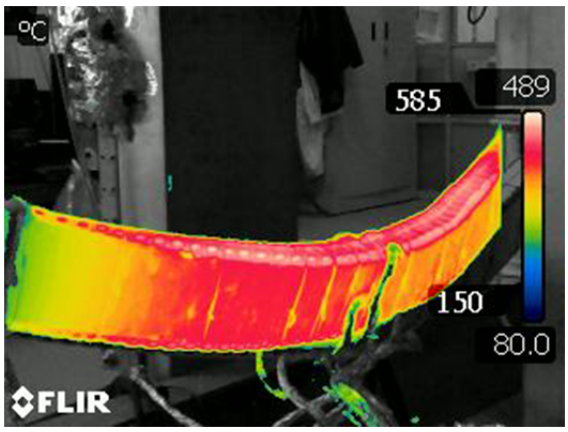


Figura B 9 - Termografia após remoção do isolamento.

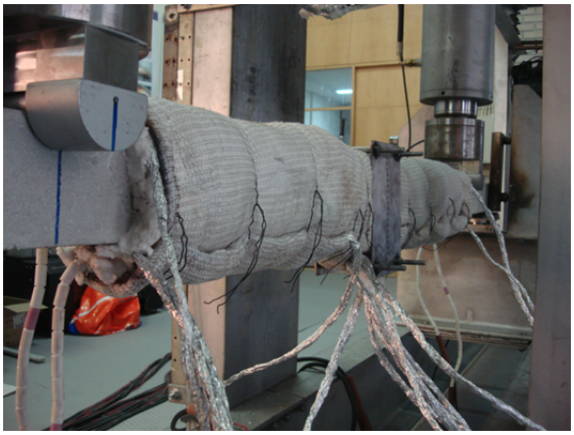


Figura B 10 - Inicio da aplicação da carga.



Figura B 11 - Fim da aplicação da carga.

Tabela B 5 - Observações / Comentários.

Observações / Comentários: O computador que registra as temperaturas bloqueou na fase inicial do ensaio.
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB).

SÉRIE 1 (ENSAIO - B/2.4-02)

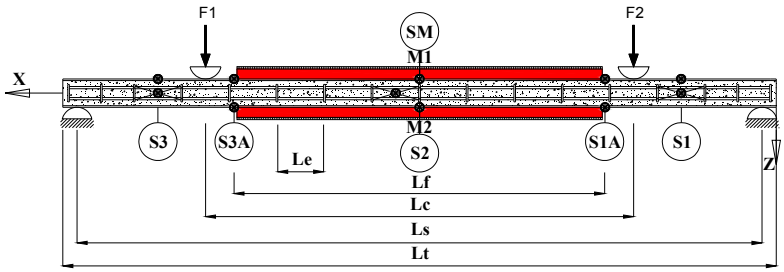


Figura B 12 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

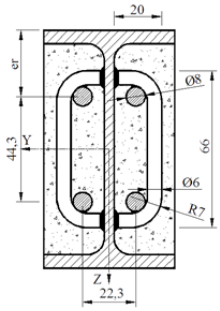


Figura B 13 - Secção da viga.

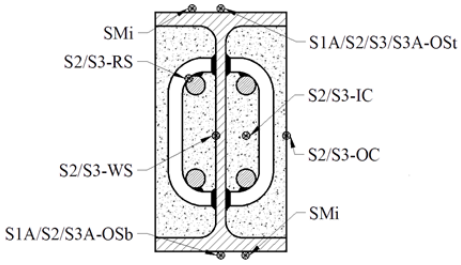


Figura B 14 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi.

Tabela B 6 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{vk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck.cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 7 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Lf [m]	Le [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
2,5	2,4	1,5	1,3	0,167	W	400	2=L/1250

Tabela B 8 - Imperfeições laterais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,25	1,5	2,0	2,45
Imperfeições (Y) [mm]	0	0	2	1	1	0	0

Tabela B 9 - Eventos de carga.

F_p [N]	F_v [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
13627	21760	26583	31533

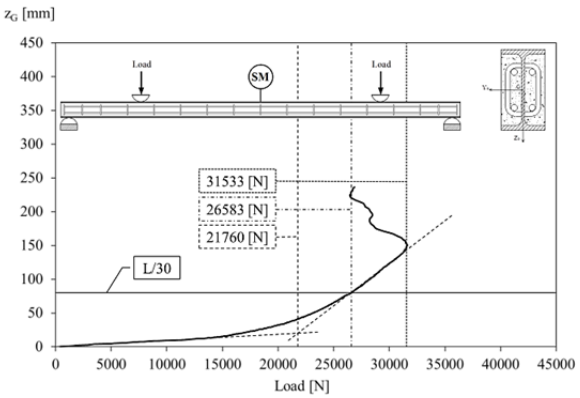


Figura B 15 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

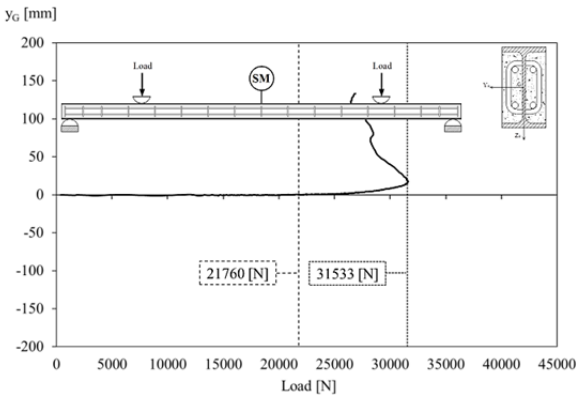


Figura B 16 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

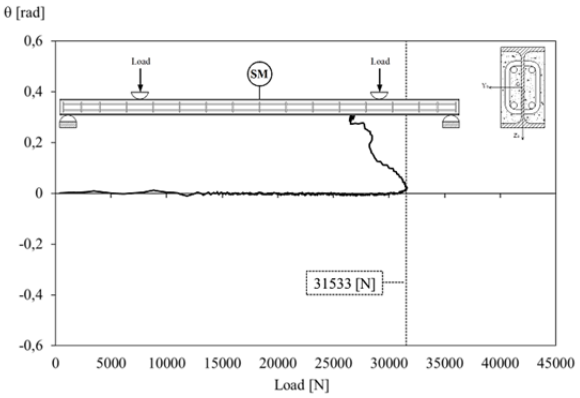


Figura B 17 - Rotação da secção SM.

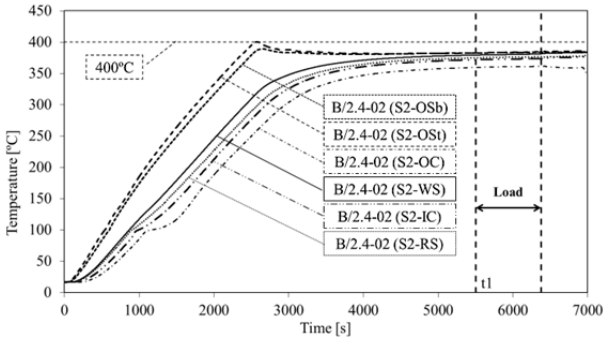


Figura B 18 - Aquecimento da Secção S2.

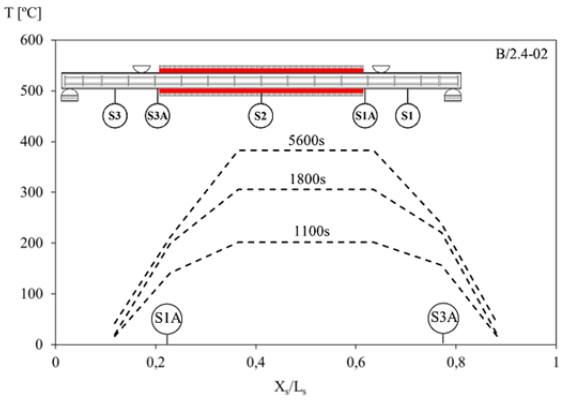


Figura B 19 - Evolução da distribuição de temperatura.

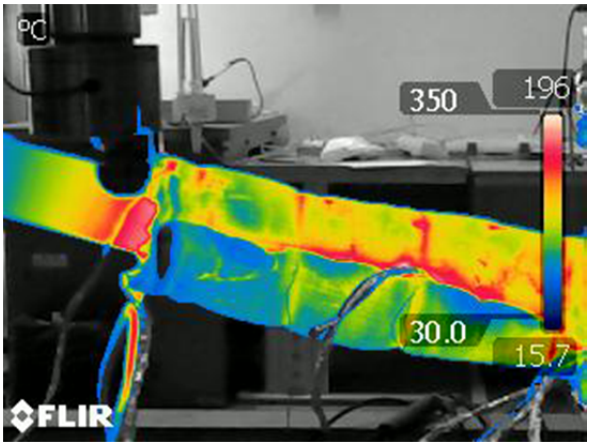


Figura B 20 - Termografia antes de remover isolamento.

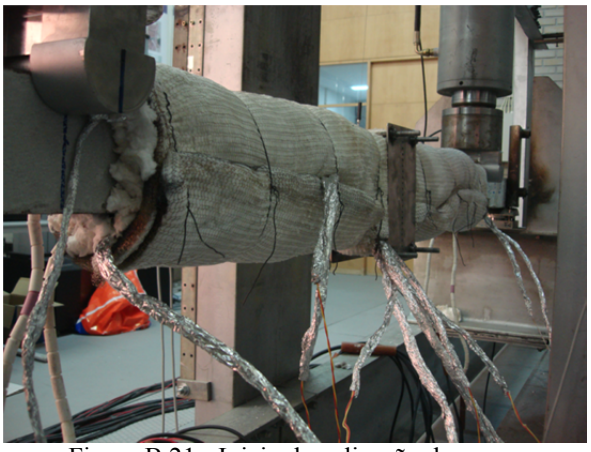


Figura B 21 - Inicio da aplicação da carga.

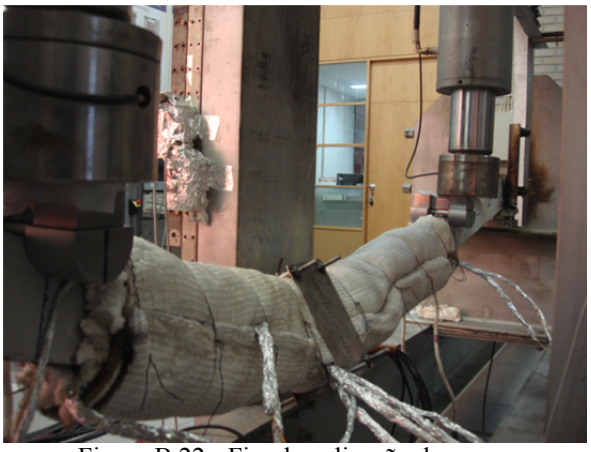


Figura B 22 - Fim da aplicação da carga.

Tabela B 10 - Observações / Comentários.

Observações / Comentários: Os termopares da máquina de aquecimento foram colocados na posição da imperfeição I5 (X=1,5m).
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB).

SÉRIE 1 (ENSAIO - B/2.4-03)

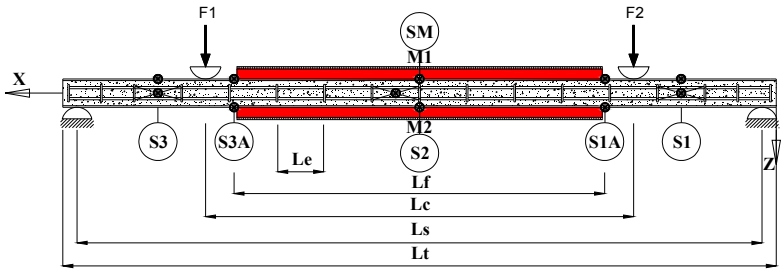


Figura B 23 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

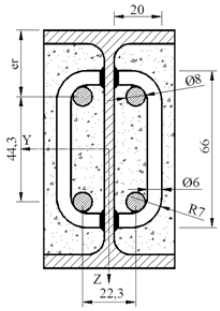


Figura B 24 - Secção da viga.

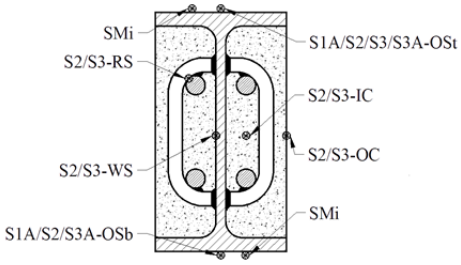


Figura B 25 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi.

Tabela B 11 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{vk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck,cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 12 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Lf [m]	Le [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
2,5	2,4	1,5	1,3	0,167	W	400	2=L/1250

Tabela B 13 - Imperfeições laterais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,25	1,5	2,0	2,45
Imperfeições (Y) [mm]	0	1	1	2	2	1	0

Tabela B 14 - Eventos de carga.

F_p [N]	F_v [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
12540	19920	24878	33568

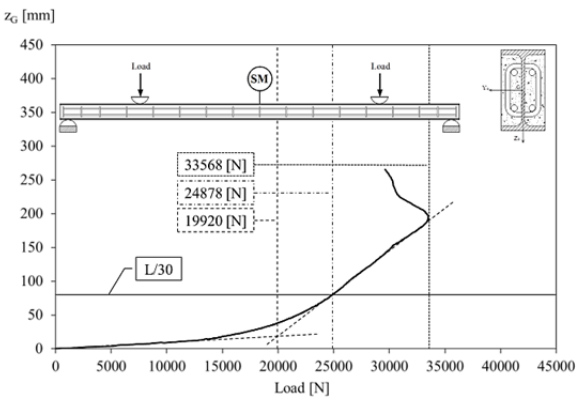


Figura B 26 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

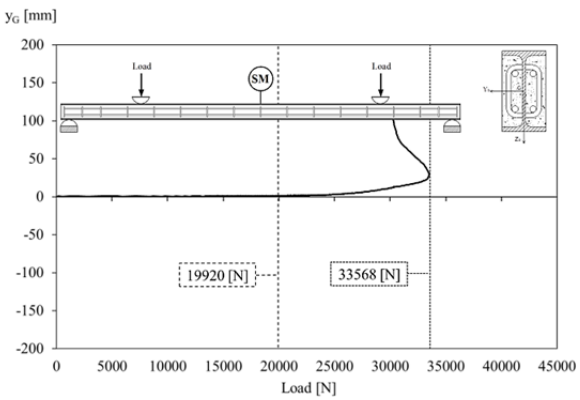


Figura B 27 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

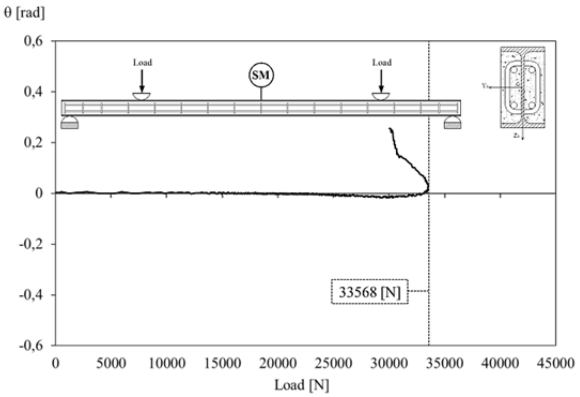


Figura B 28 - Rotação da secção SM.

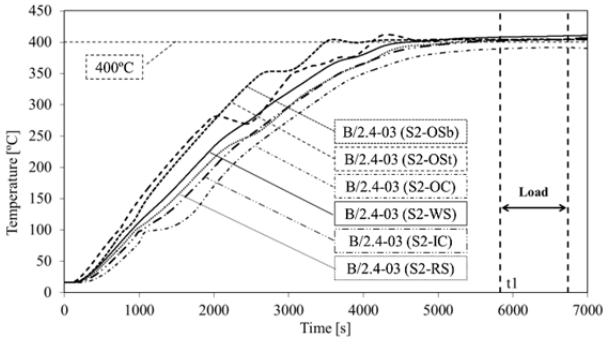


Figura B 29 - Aquecimento da Secção S2.

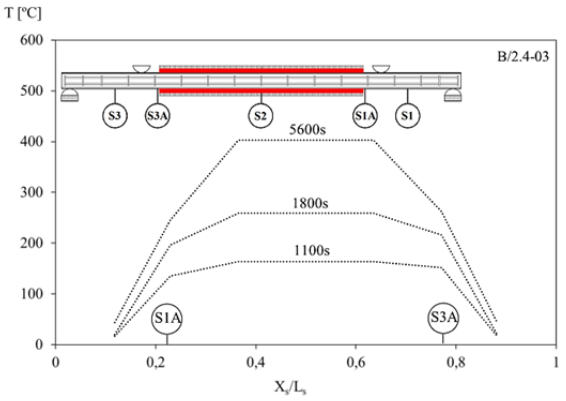


Figura B 30 - Evolução da distribuição de temperatura.

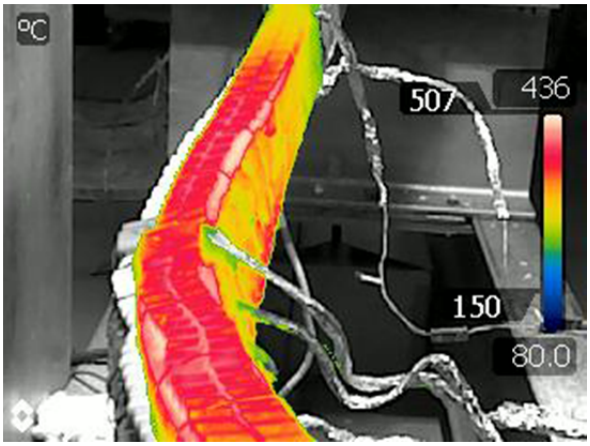


Figura B 31 - Termografia após remoção do isolamento.

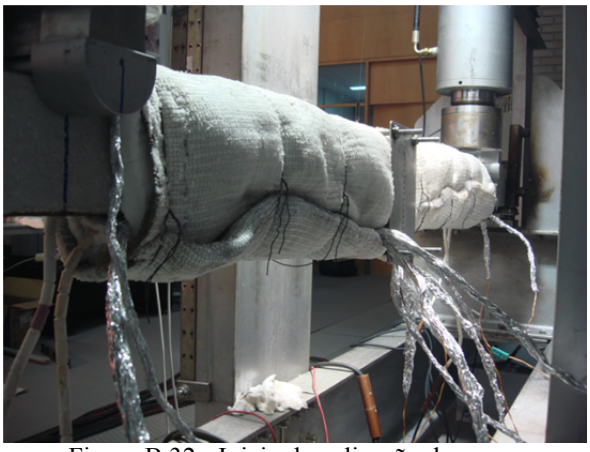


Figura B 32 - Inicio da aplicação da carga.

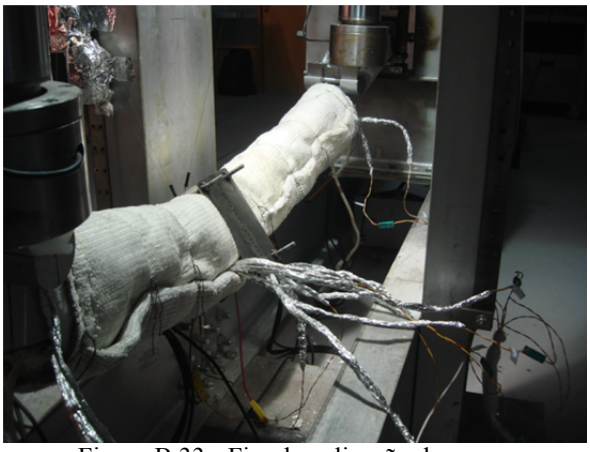


Figura B 33 - Fim da aplicação da carga.

Tabela B 15 - Observações / Comentários.

Observações / Comentários: Problemas no processo de aquecimento.
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB).

SÉRIE 2 (ENSAIO - B/2.4-04)

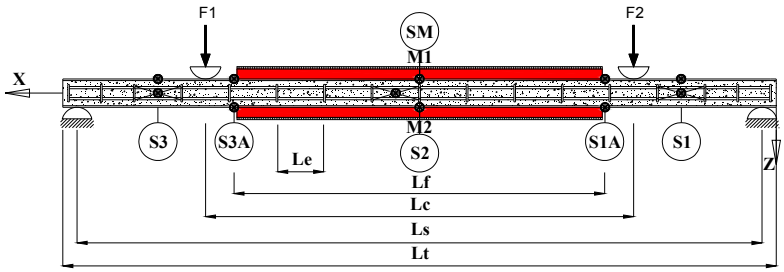


Figura B 34 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

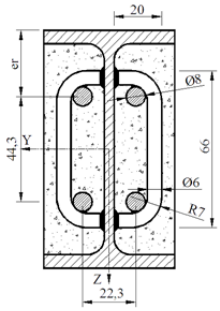


Figura B 35 - Secção da viga.

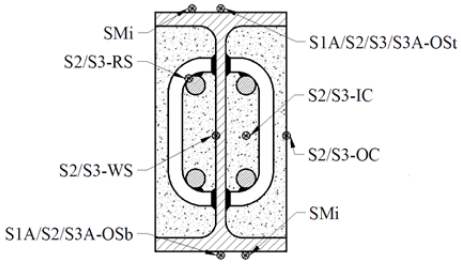


Figura B 36 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi.

Tabela B 16 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{vk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck,cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 17 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Lf [m]	Le [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
2,5	2,4	1,5	1,3	0,167	W	200	1=L/2500

Tabela B 18 - Imperfeições laterais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,25	1,5	2,0	2,45
Imperfeições (Y) [mm]	0	0	0	1	0	0	0

Tabela B 19 - Eventos de carga.

F_p [N]	F_v [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
24770	31430	34060	36875

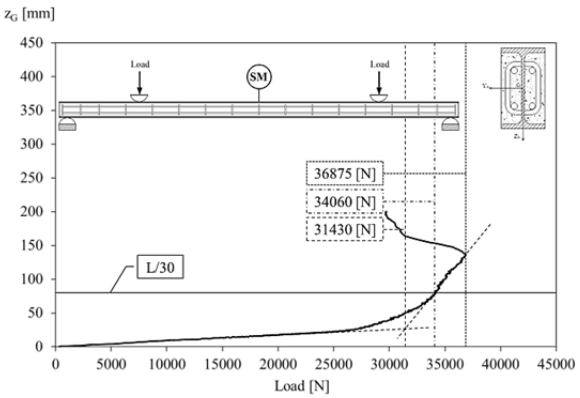


Figura B 37 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

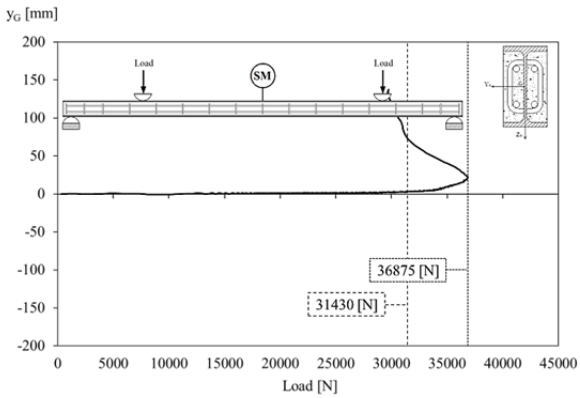


Figura B 38 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

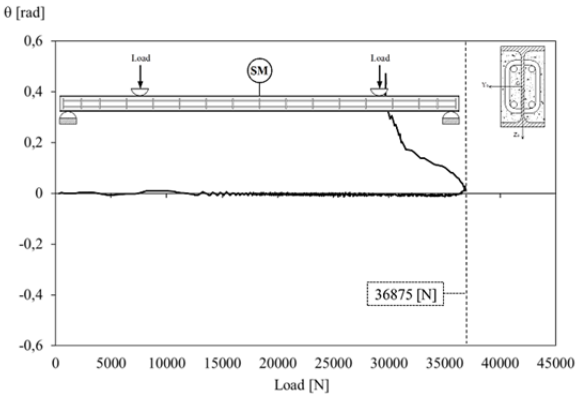


Figura B 39 - Rotação da secção SM.

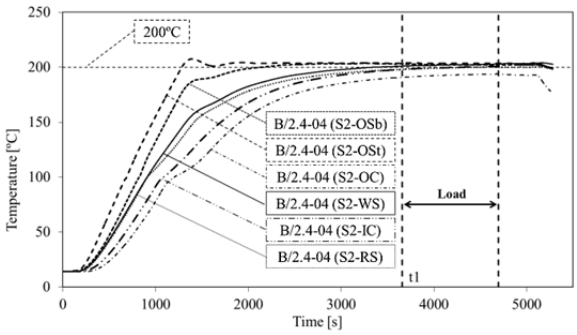


Figura B 40 - Aquecimento da Secção S2.

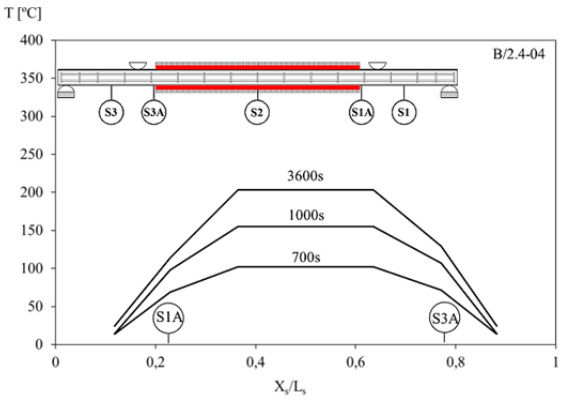


Figura B 41 - Evolução da distribuição de temperatura.

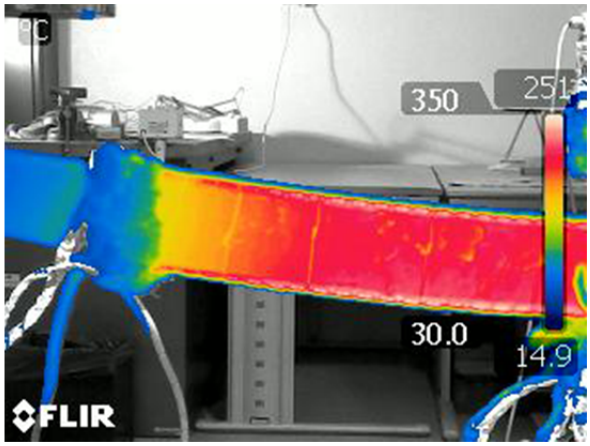


Figura B 42 - Termografia após remoção do isolamento.

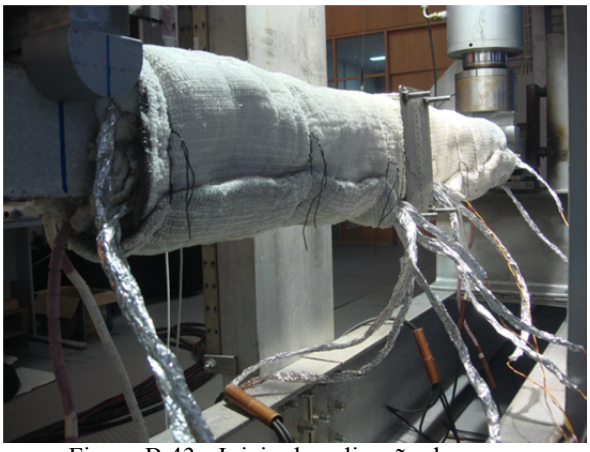


Figura B 43 - Inicio da aplicação da carga.

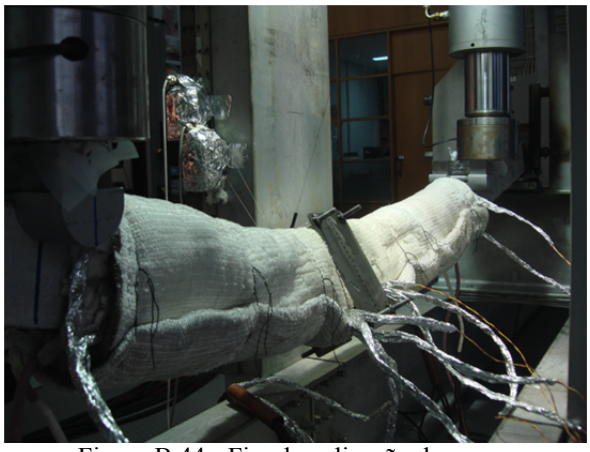


Figura B 44 - Fim da aplicação da carga.

Tabela B 20 - Observações / Comentários.

Observações / Comentários:
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB).

SÉRIE 2 (ENSAIO - B/2.4-05)

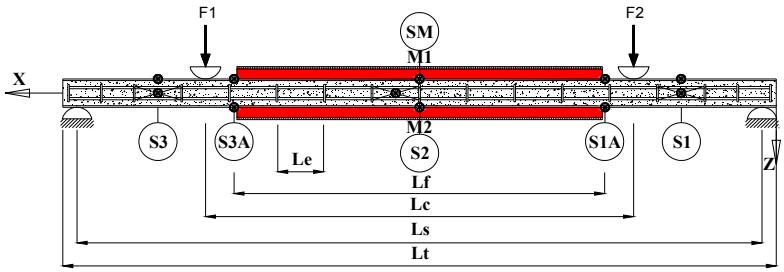


Figura B 45 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

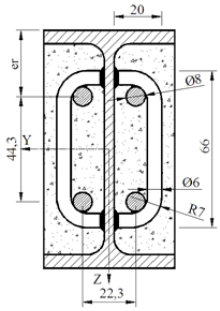


Figura B 46 - Secção da viga.

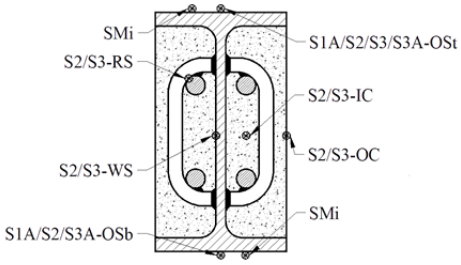


Figura B 47 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi.

Tabela B 21 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{vk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck,cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 22 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Lf [m]	Le [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
2,5	2,4	1,5	1,3	0,167	W	200	2=L/1250

Tabela B 23 - Imperfeições laterais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,25	1,5	2,0	2,45
Imperfeições (Y) [mm]	0	2	2	1	1	0	0

Tabela B 24 - Eventos de carga.

F_p [N]	F_v [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
26030	30350	32953	39042

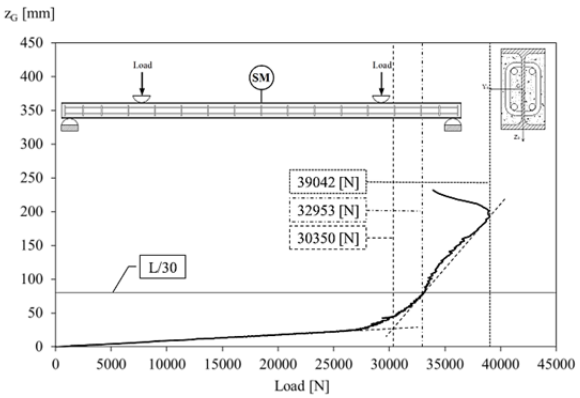


Figura B 48 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

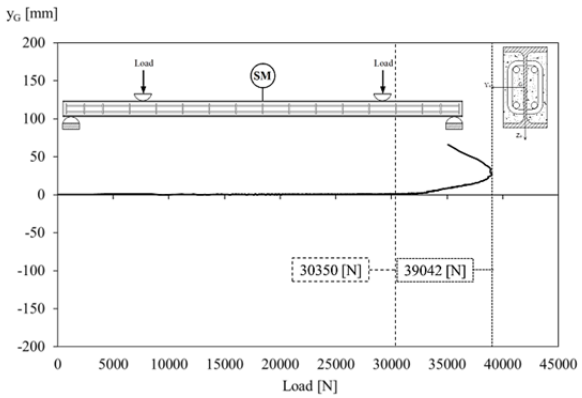


Figura B 49 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

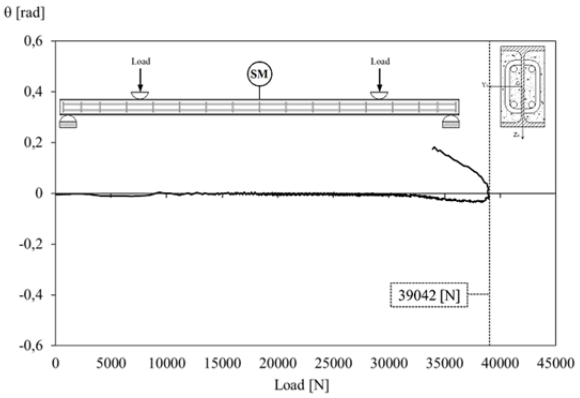


Figura B 50 - Rotação da secção SM.

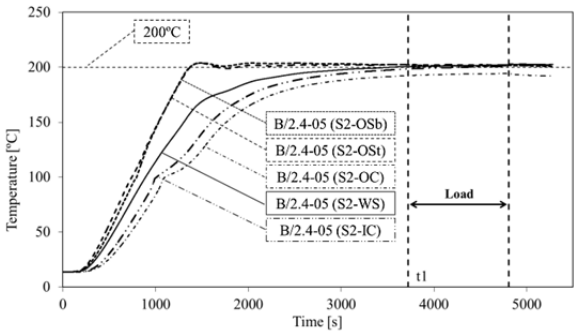


Figura B 51 - Aquecimento da Secção S2.

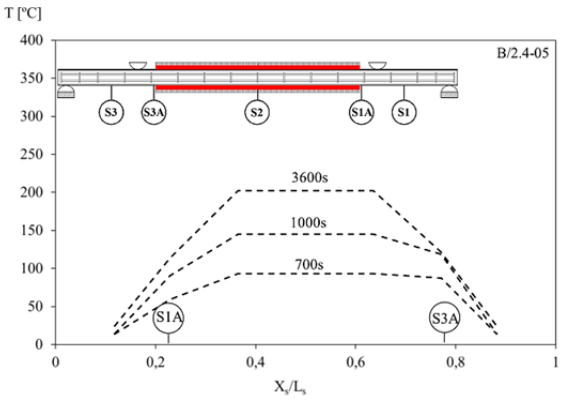


Figura B 52 - Evolução da distribuição de temperatura.

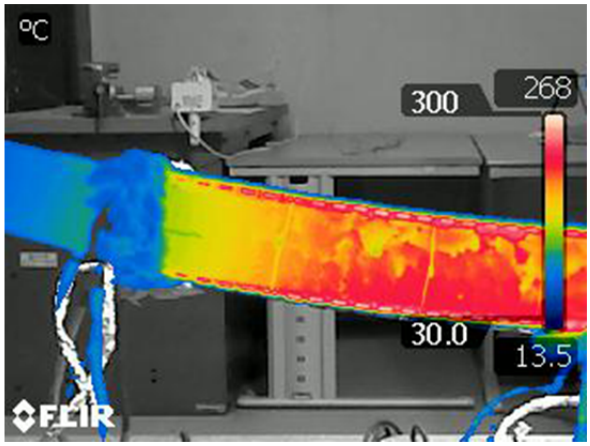


Figura B 53 - Termografia após remoção do isolamento.

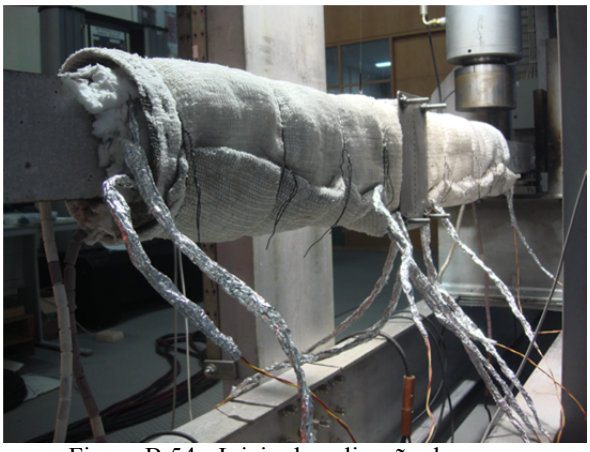


Figura B 54 - Inicio da aplicação da carga.

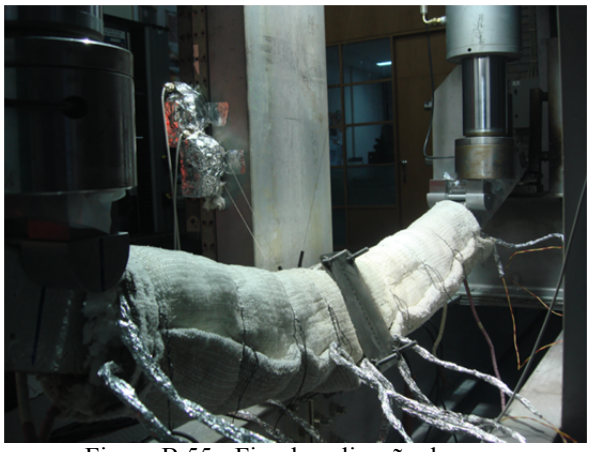


Figura B 55 - Fim da aplicação da carga.

Tabela B 25 - Observações / Comentários.

Observações / Comentários: O termopar S2-RS perdeu leitura de temperatura.
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB).

SÉRIE 2 (ENSAIO - B/2.4-06)

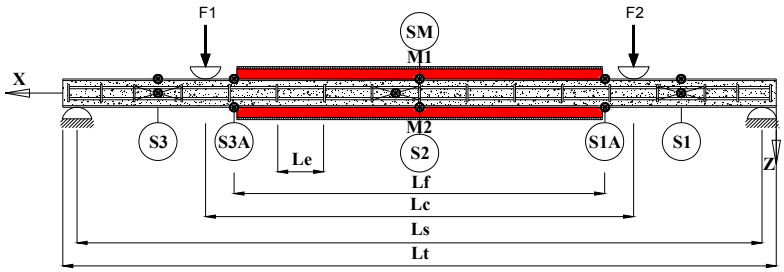


Figura B 56 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

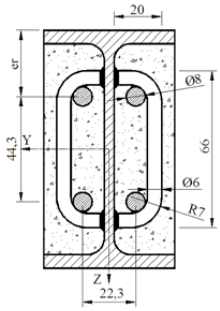


Figura B 57 - Secção da viga.

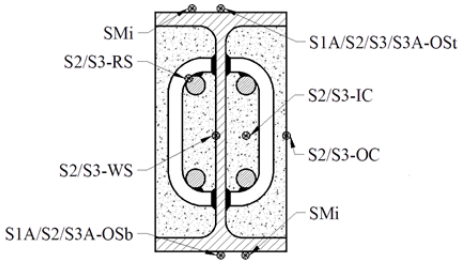


Figura B 58 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi.

Tabela B 26 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{vk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck.cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 27 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Lf [m]	Le [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
2,5	2,4	1,5	1,3	0,167	W	200	1=L/2500

Tabela B 28 - Imperfeições laterais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,25	1,5	2,0	2,45
Imperfeições (Y) [mm]	0	0	1	0	0	0	0

Tabela B 29 - Eventos de carga.

F_p [N]	F_v [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
26580	31380	33930	34712

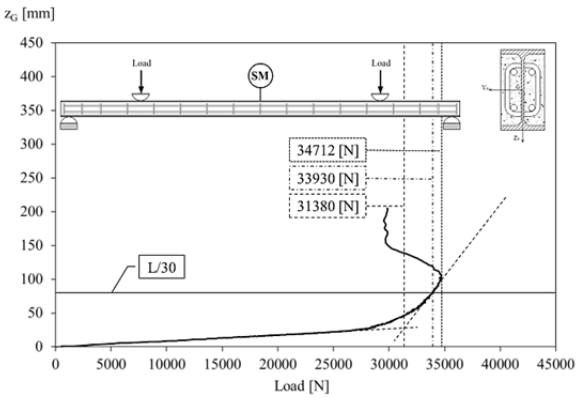


Figura B 59 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

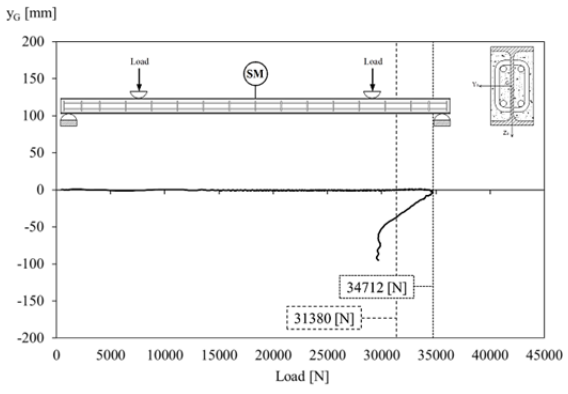


Figura B 60 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

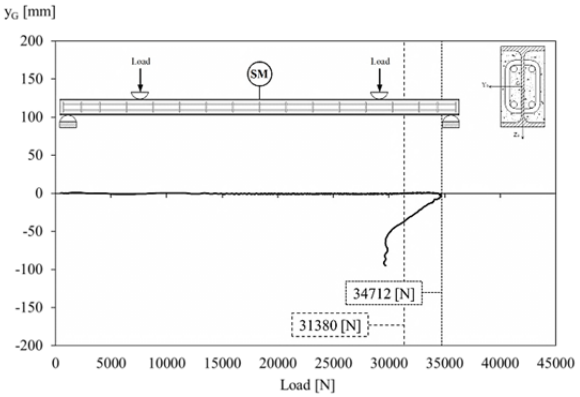


Figura B 61 - Rotação da secção SM.

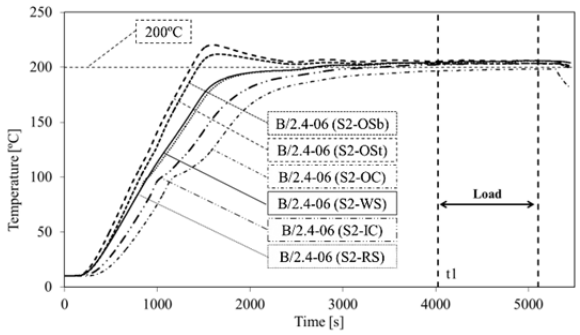


Figura B 62 - Aquecimento da Secção S2.

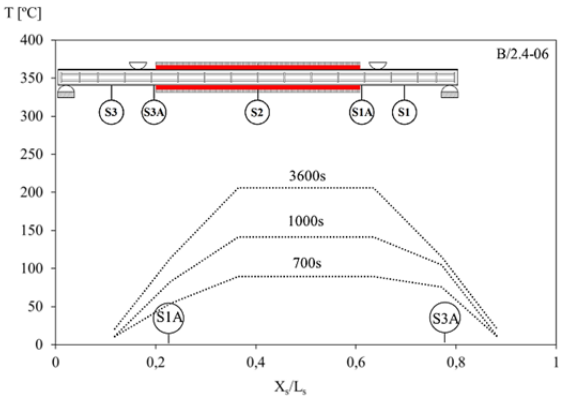


Figura B 63 - Evolução da distribuição de temperatura.

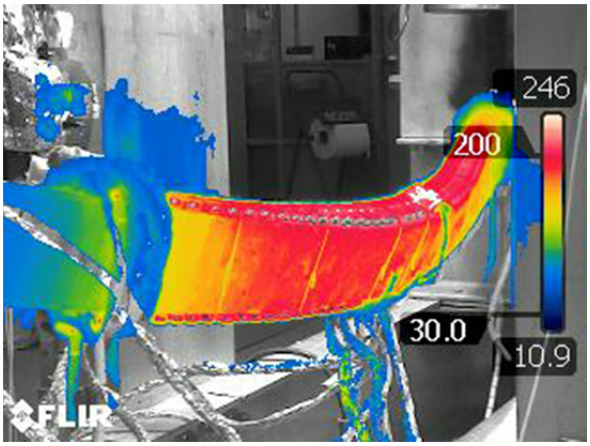


Figura B 64 - Termografia após remoção do isolamento.



Figura B 65 - Inicio da aplicação da carga.

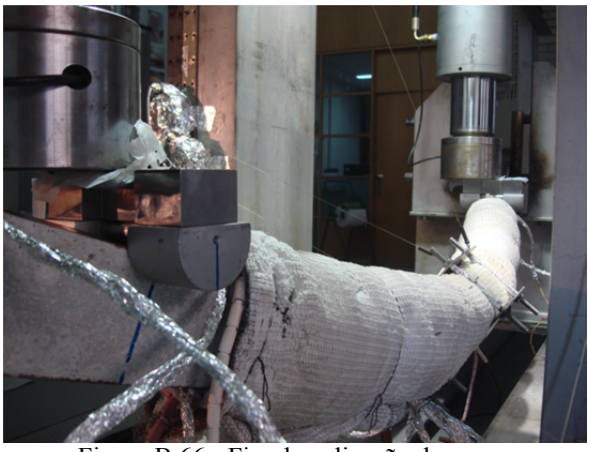


Figura B 66 - Fim da aplicação da carga.

Tabela B 30 - Observações / Comentários.

Observações / Comentários: O termopar S3-WS foi instável durante o ensaio.
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB).

SÉRIE 3 (ENSAIO - B/2.4-07)

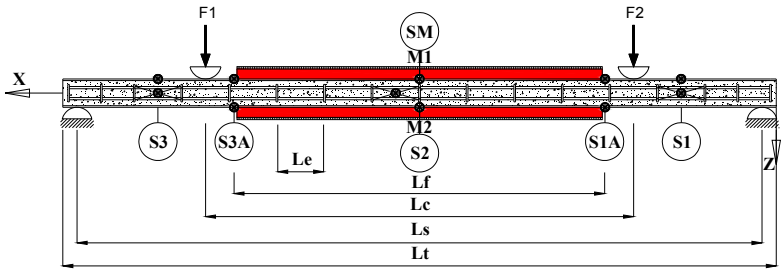


Figura B 67 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

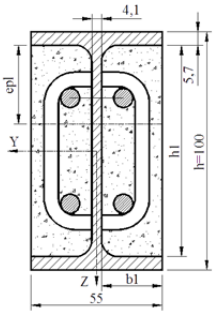


Figura B 68 - Secção da viga.

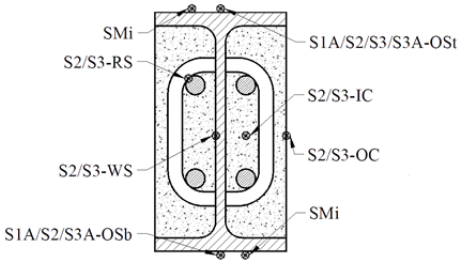


Figura B 69 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi.

Tabela B 31 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{vk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck.cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 32 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Lf [m]	Le [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
2,5	2,4	1,5	1,3	0,167	NW	400	1=L/2500

Tabela B 33 - Imperfeições laterais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,25	1,5	2,0	2,45
Imperfeições (Y) [mm]	0	1	1	1	1	0	0

Tabela B 34 - Eventos de carga.

F_p [N]	F_v [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
13050	20610	24898	29000

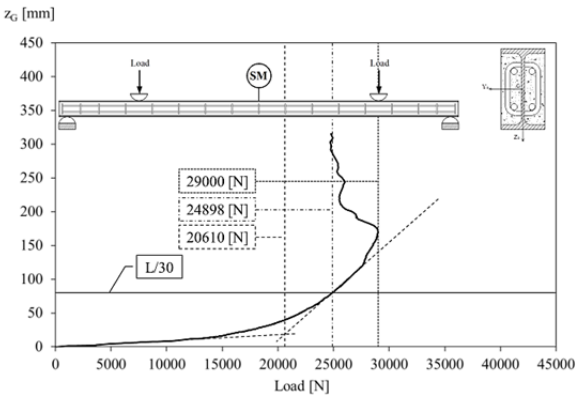


Figura B 70 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

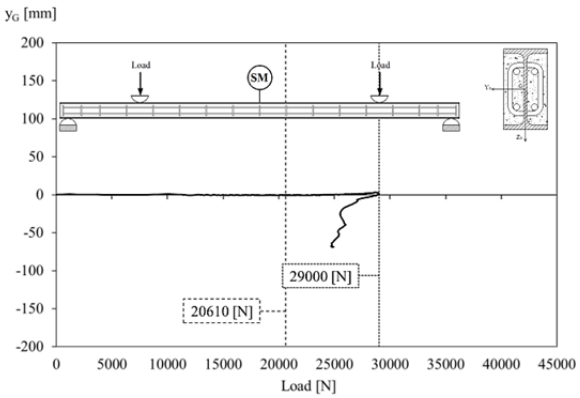


Figura B 71 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

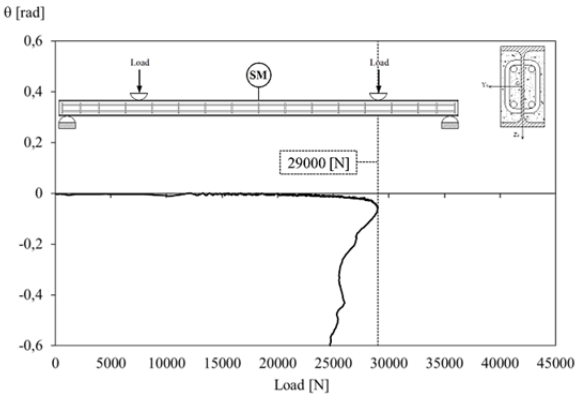


Figura B 72 - Rotação da secção SM.

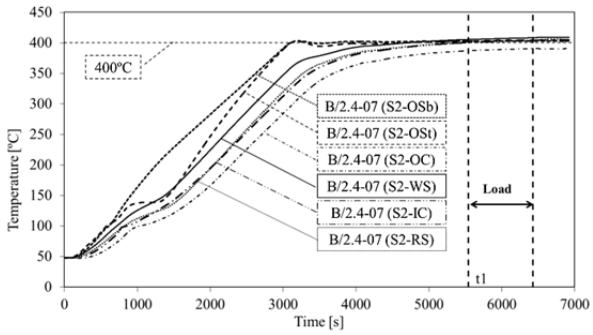


Figura B 73 - Aquecimento da Secção S2.

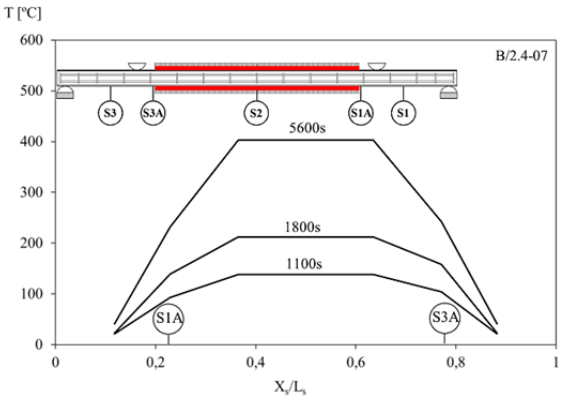


Figura B 74 - Evolução da distribuição de temperatura.

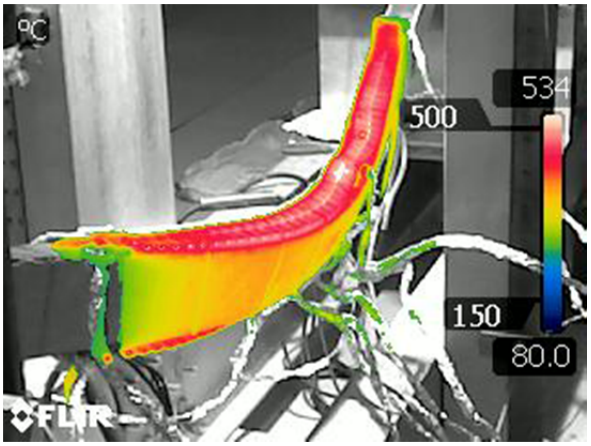


Figura B 75 - Termografia após remoção do isolamento.

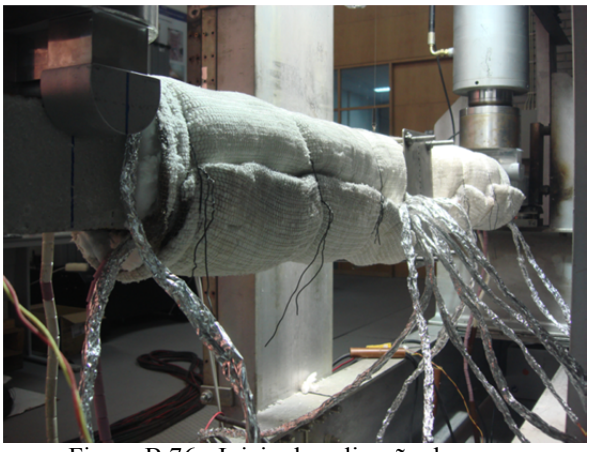


Figura B 76 - Inicio da aplicação da carga.

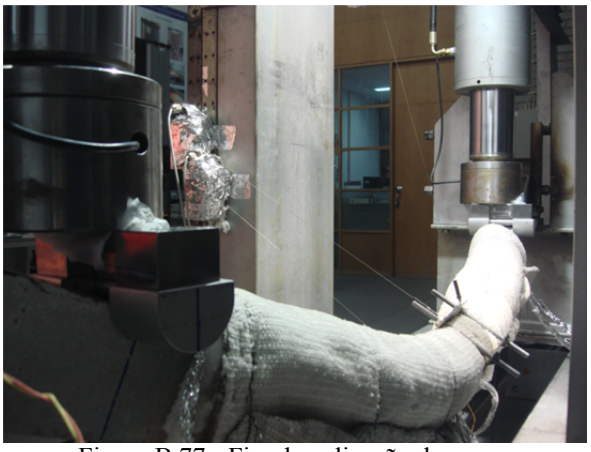


Figura B 77 - Fim da aplicação da carga.

Tabela B 35 - Observações / Comentários.

Observações / Comentários:
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB).

SÉRIE 3 (ENSAIO - B/2.4-08)

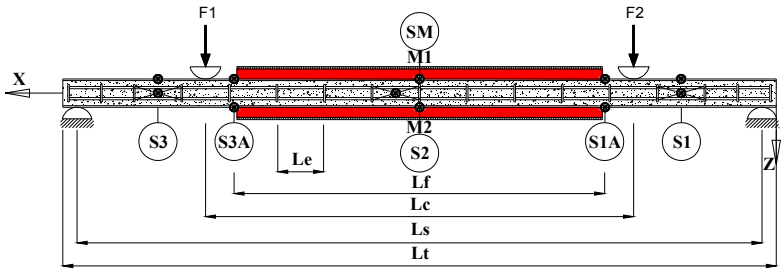


Figura B 78 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

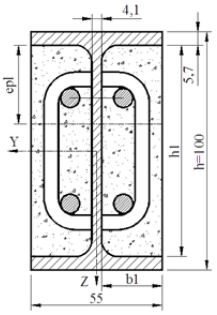


Figura B 79 - Secção da viga.

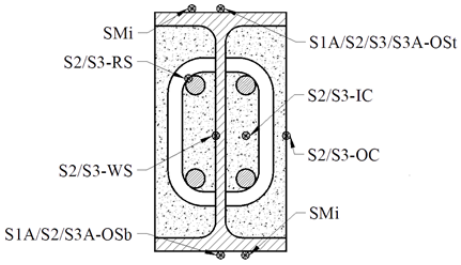


Figura B 80 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi.

Tabela B 36 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{vk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck.cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 37 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Lf [m]	Le [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
2,5	2,4	1,5	1,3	0,167	NW	400	1=L/2500

Tabela B 38 - Imperfeições laterais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,25	1,5	2,0	2,45
Imperfeições (Y) [mm]	0	1	0	0	0	1	0

Tabela B 39 - Eventos de carga.

F_p [N]	F_v [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
12960	19270	25135	40861

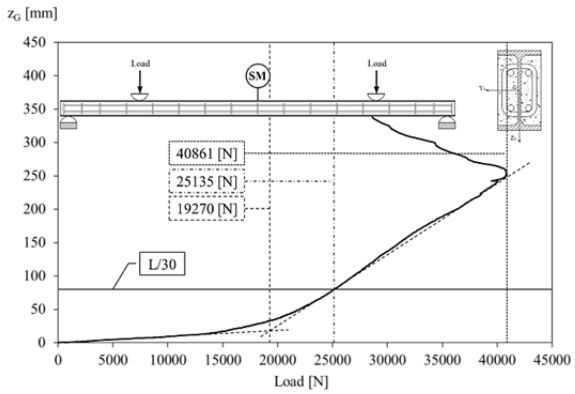


Figura B 81 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

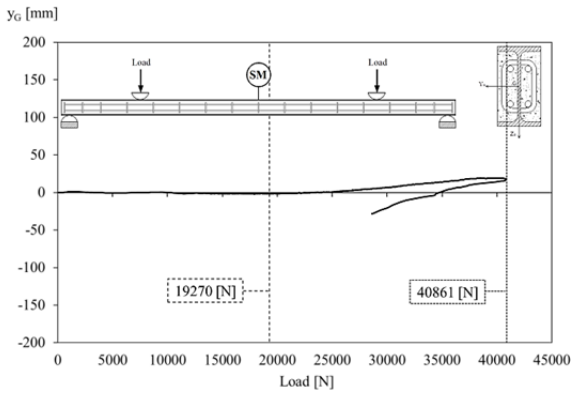


Figura B 82 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

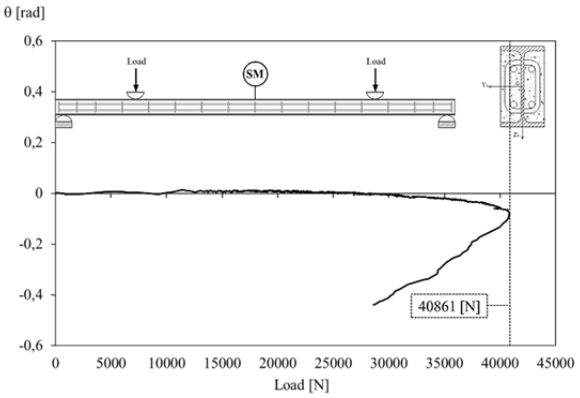


Figura B 83 - Rotação da secção SM.

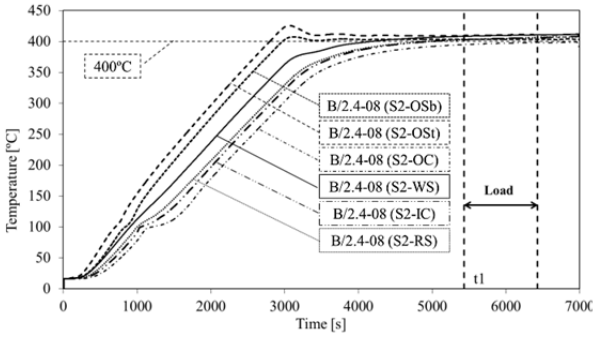


Figura B 84 - Aquecimento da Secção S2.

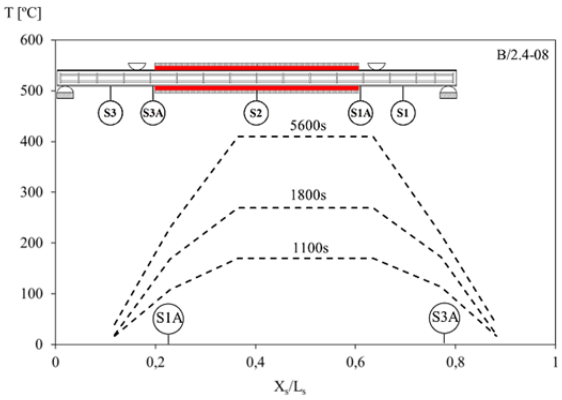


Figura B 85 - Evolução da distribuição de temperatura.

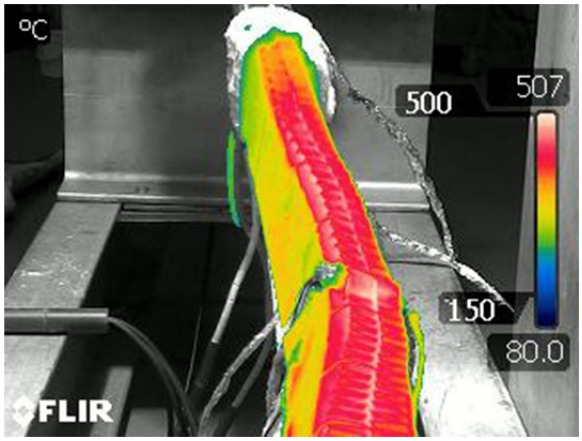


Figura B 86 - Termografia após remoção do isolamento.

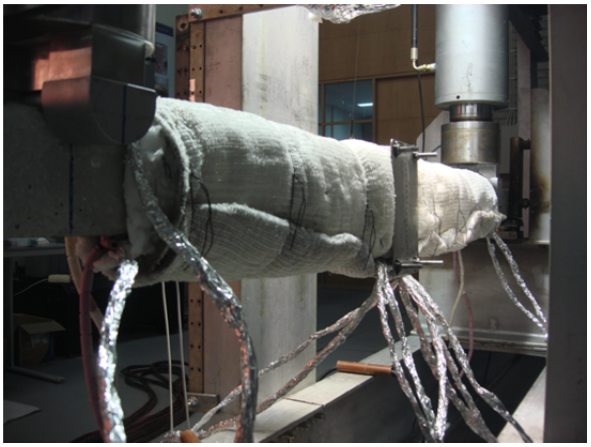


Figura B 87 - Inicio da aplicação da carga.

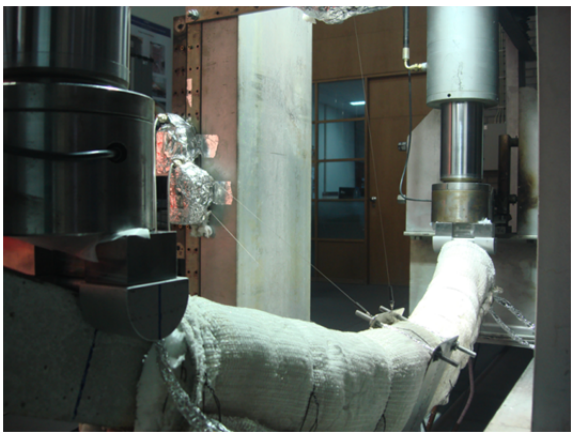


Figura B 88 - Fim da aplicação da carga.

Tabela B 40 - Observações / Comentários.

Observações / Comentários:
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB).

SÉRIE 3 (ENSAIO - B/2.4-09)

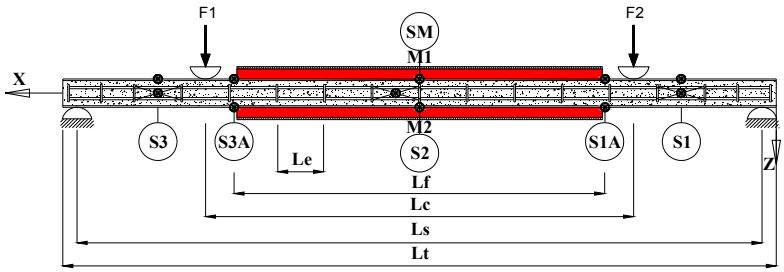


Figura B 89 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

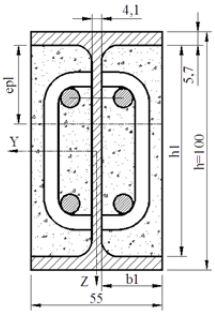


Figura B 90 - Secção da viga.

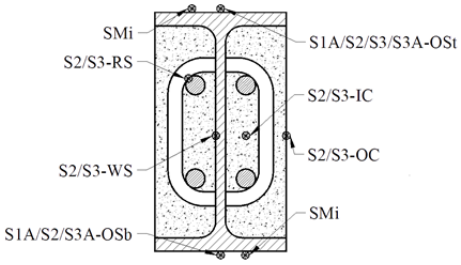


Figura B 91 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi.

Tabela B 41 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{vk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck.cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 42 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Lf [m]	Le [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
2,5	2,4	1,5	1,3	0,167	NW	400	1=L/2500

Tabela B 43 - Imperfeições laterais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,25	1,5	2,0	2,45
Imperfeições (Y) [mm]	0	1	1	0	1	0	0

Tabela B 44 - Eventos de carga.

F_p [N]	F_v [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
11920	20850	25722	33246

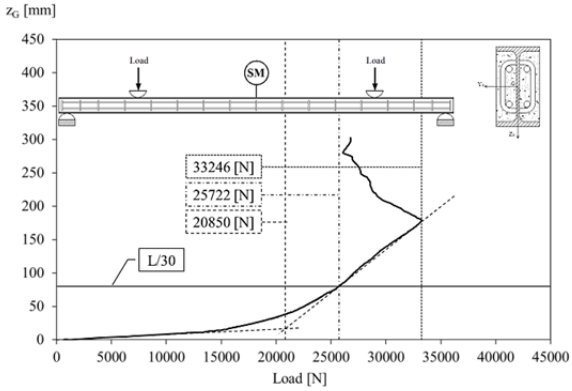


Figura B 92 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

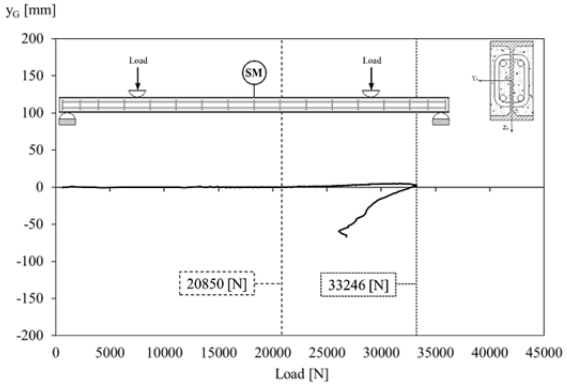


Figura B 93 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

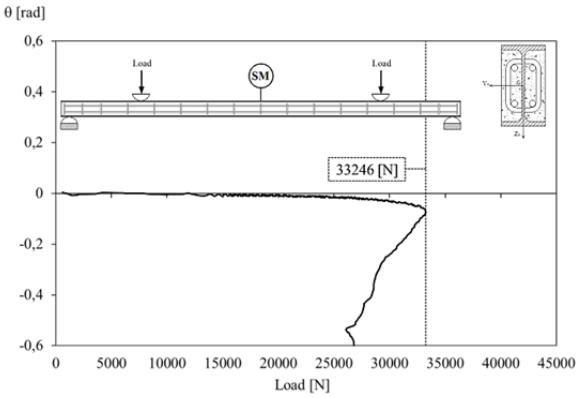


Figura B 94 - Rotação da secção SM.

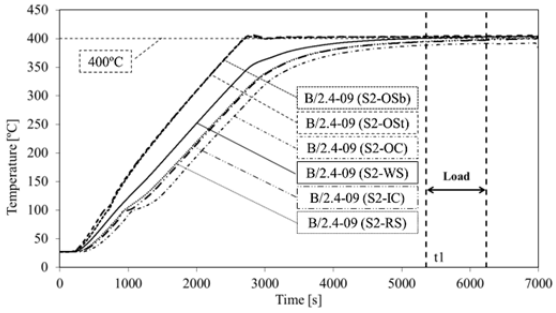


Figura B 95 - Aquecimento da Secção S2.

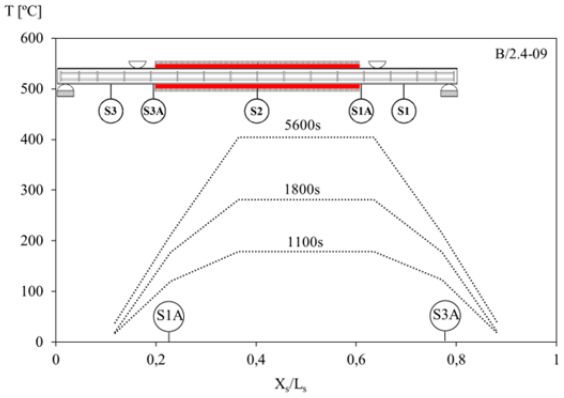


Figura B 96 - Evolução da distribuição de temperatura.

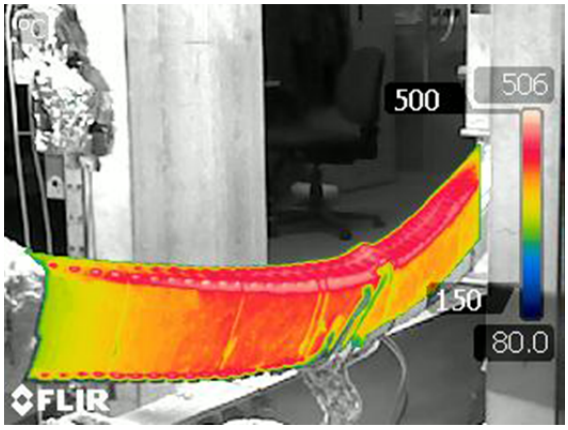


Figura B 97 - Termografia após remoção do isolamento.

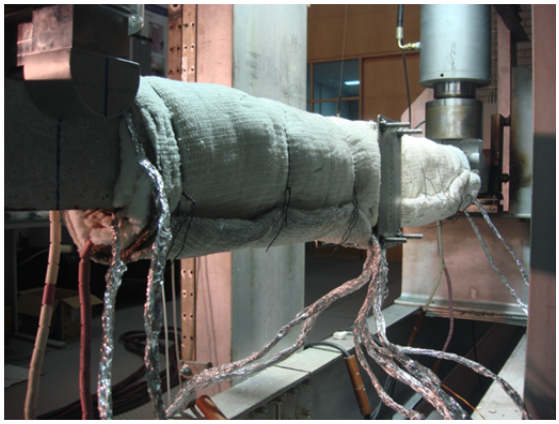


Figura B 98 - Inicio da aplicação da carga.

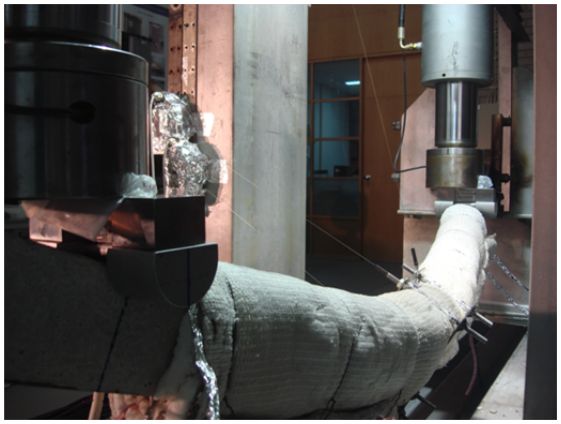


Figura B 99 - Fim da aplicação da carga.

Tabela B 45 - Observações / Comentários.

Observações / Comentários:
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB).

SÉRIE 4 (ENSAIO - B/2.4-10)

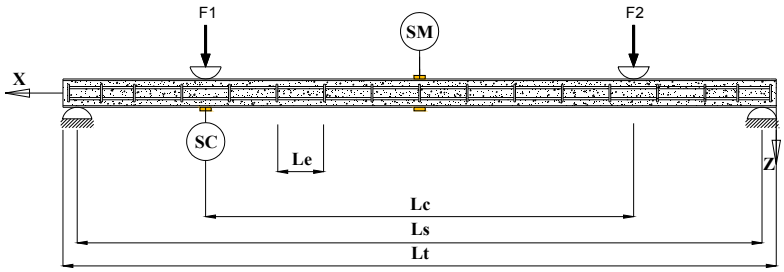


Figura B 100 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

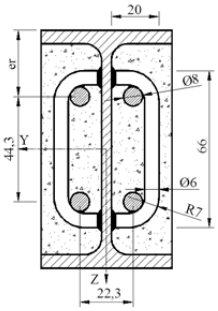


Figura B 101 - Secção da viga.

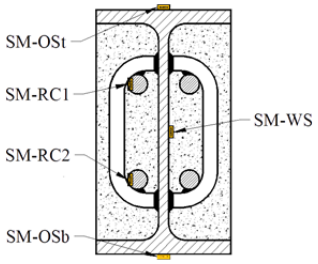


Figura B 102 - Instrumentação da secção SM.

Tabela B 46 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{vk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck.cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 47 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Le [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
2,5	2,4	1,5	0,167	W	Ambiente	2=L/1250

Tabela B 48 - Imperfeições laterais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,25	1,5	2,0	2,45
Imperfeições (Y) [mm]	0	1	1	2	2	1	0

Tabela B 49 - Eventos de carga.

F_p [N]	F_v [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
27050	33470	34966	35015

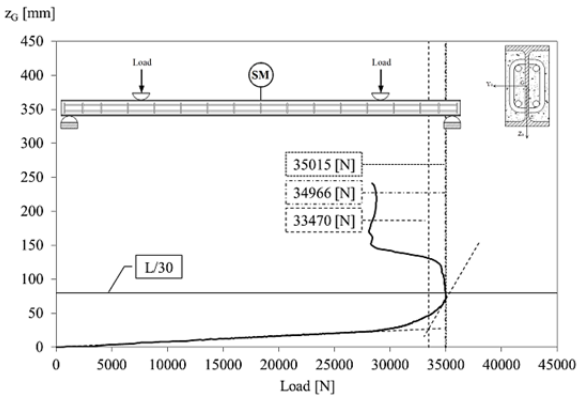


Figura B 103 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

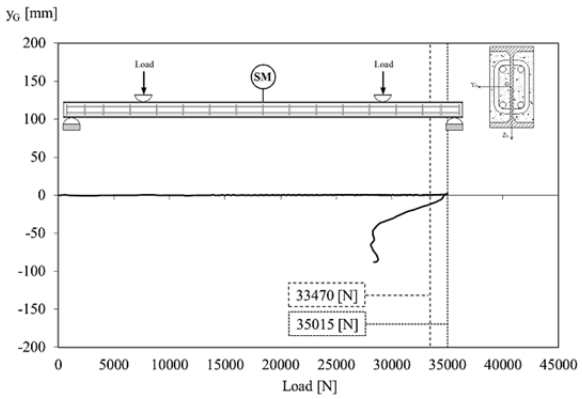


Figura B 104 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

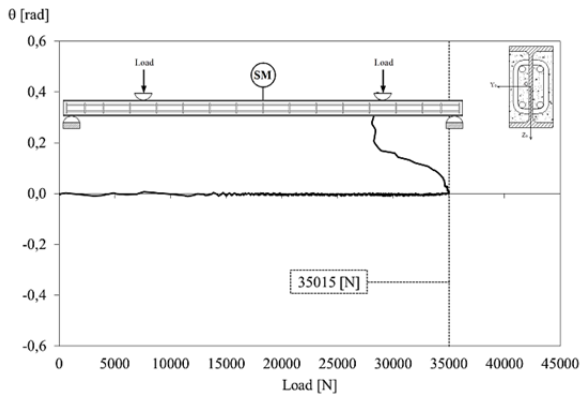


Figura B 105 - Rotação da secção SM.

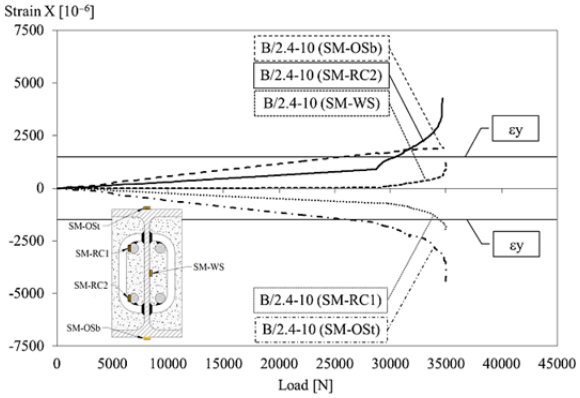


Figura B 106 - Extensometria da Secção SM.

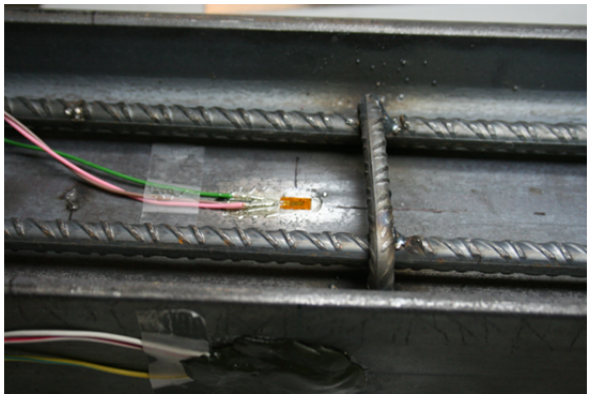


Figura B 107 - Colocação extensometria no IPE.

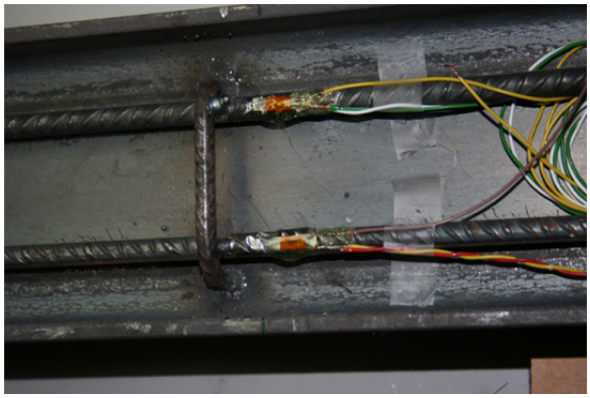


Figura B 108 - Colocação extensiometria no reforço.

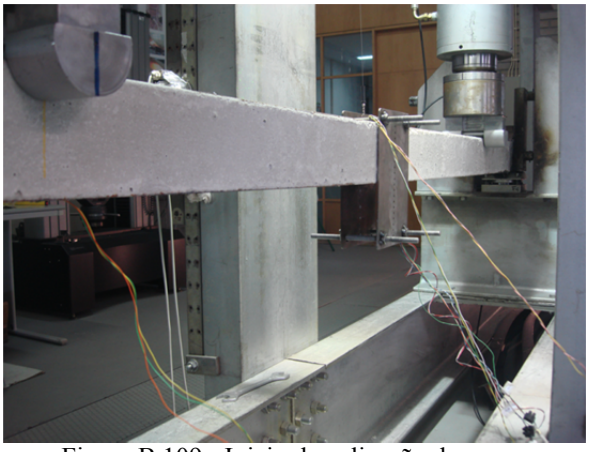


Figura B 109 - Inicio da aplicação da carga.



Figura B 110 - Fim da aplicação da carga.

Tabela B 50 - Observações / Comentários.

Observações / Comentários:
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB).

SÉRIE 4 (ENSAIO - B/2.4-11)

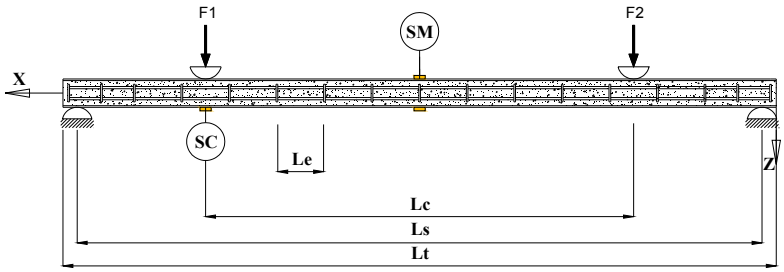


Figura B 111 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

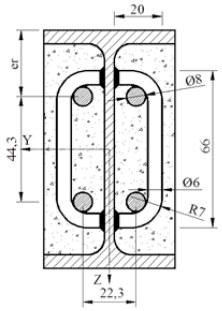


Figura B 112 - Secção da viga.

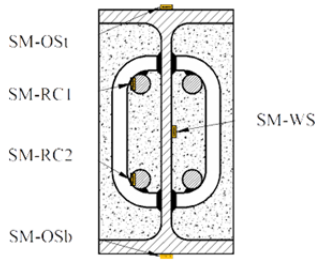


Figura B 113 - Instrumentação da secção SM.

Tabela B 51 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{vk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck.cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 52 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Le [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
2,5	2,4	1,5	0,167	W	Ambiente	0,5=L/5000

Tabela B 53 - Imperfeições laterais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,25	1,5	2,0	2,45
Imperfeições (Y) [mm]	0	0,5	0	0	0	0,5	0

Tabela B 54 - Eventos de Carga.

F_p [N]	F_v [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
25960	35410	36360	37624

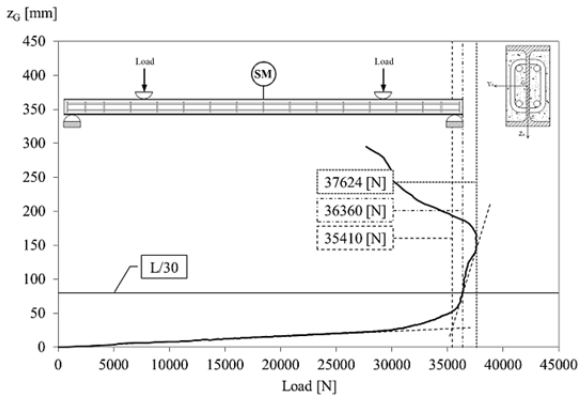


Figura B 114 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

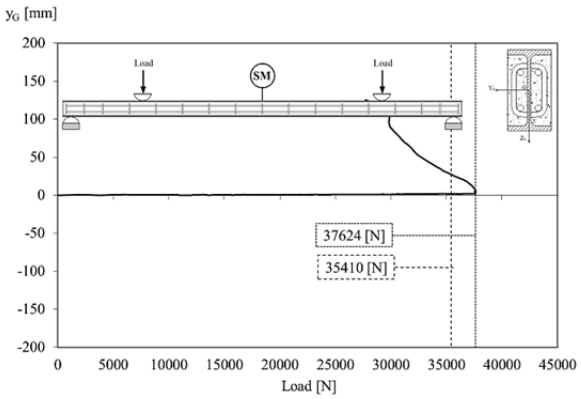


Figura B 115 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

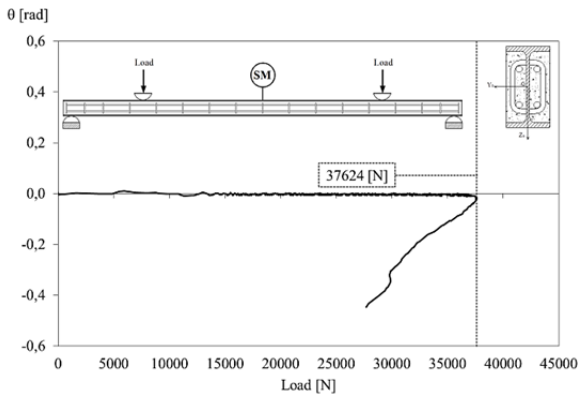


Figura B 116 - Rotação da secção SM.

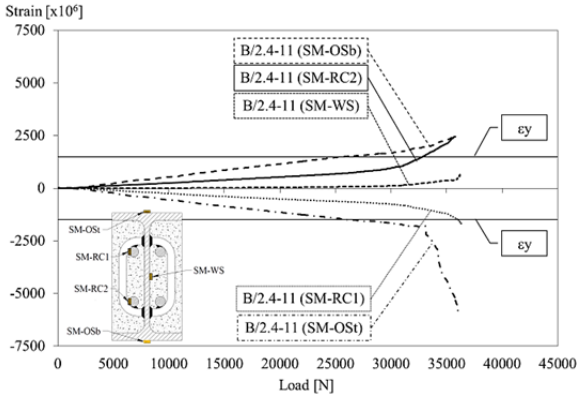


Figura B 117 - Extensometria da Secção SM.

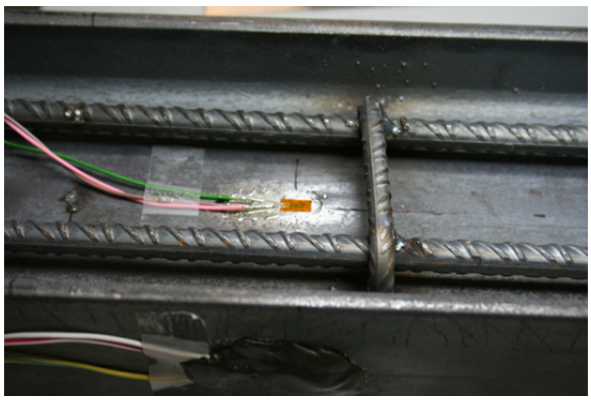


Figura B 118 - Extensometria no IPE.

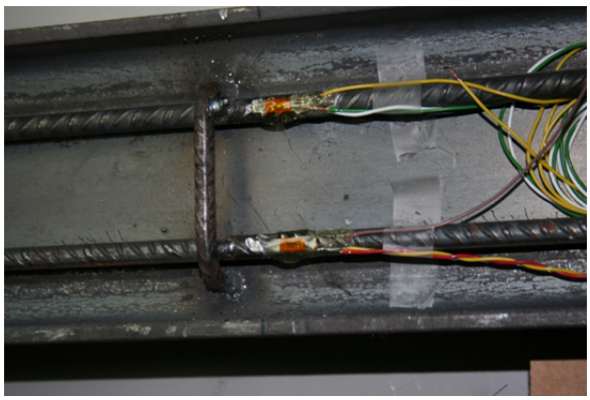


Figura B 119 - Extensometria no reforço.

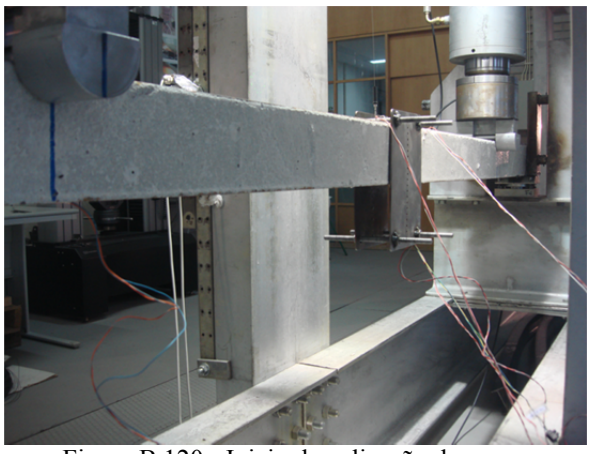


Figura B 120 - Inicio da aplicação da carga.

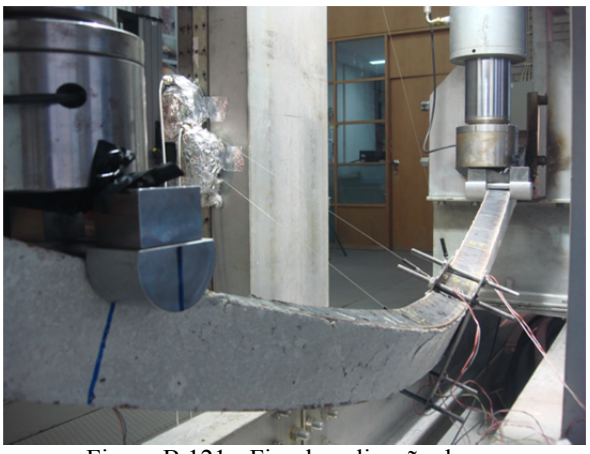


Figura B 121 - Fim da aplicação da carga.

Tabela B 55 - Observações / Comentários.

Observações / Comentários:
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB).

SÉRIE 4 (ENSAIO - B/2.4-12)

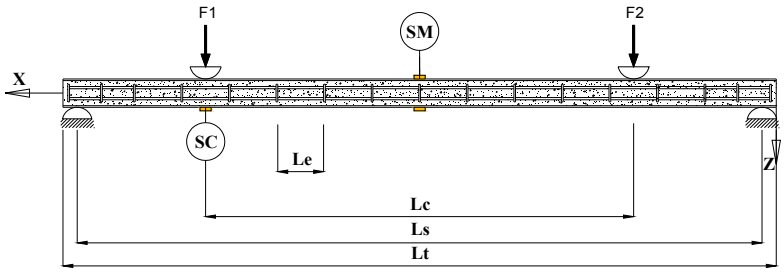


Figura B 122 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

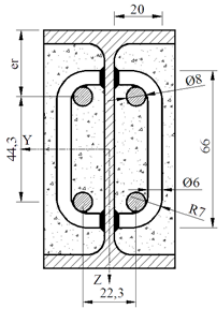


Figura B 123 - Secção da viga.

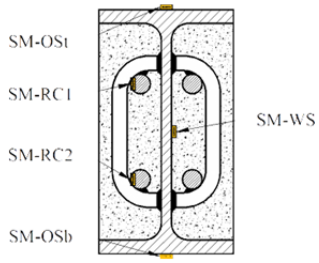


Figura B 124 - Instrumentação da secção SM.

Tabela B 56 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{vk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck.cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 57 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Le [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
2,5	2,4	1,5	0,167	W	Ambiente	3=L/833

Tabela B 58 - Imperfeições laterais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,25	1,5	2,0	2,45
Imperfeições (Y) [mm]	0	1	2	3	2	1	0

Tabela B 59 - Eventos de Carga.

F_p [N]	F_v [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
26600	34600	35962	39246

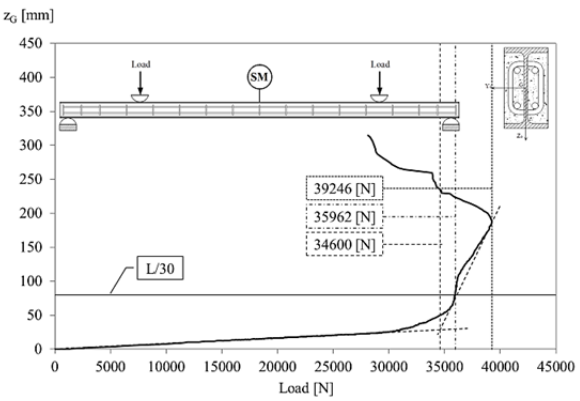


Figura B 125 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

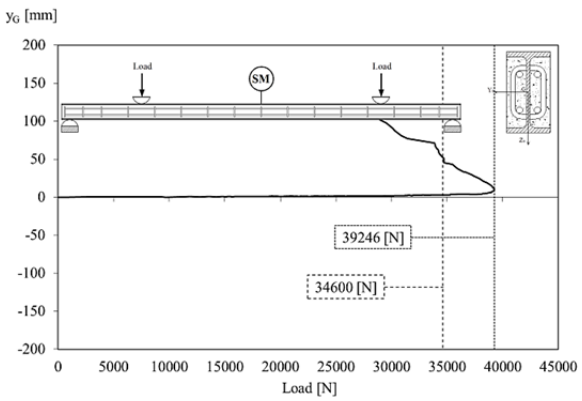


Figura B 126 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

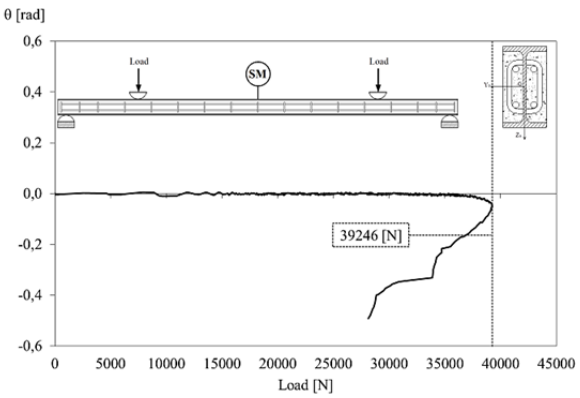


Figura B 127 - Rotação da secção SM.

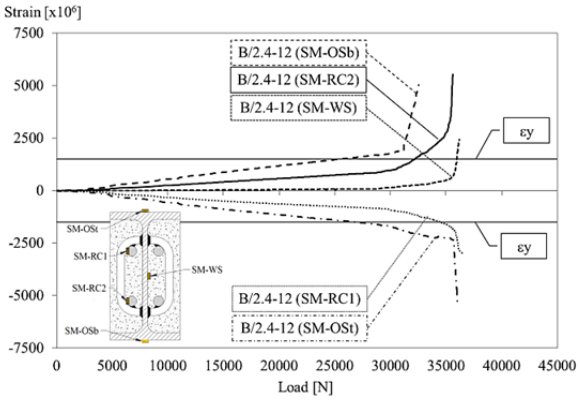


Figura B 128 - Extensometria da Secção SM.

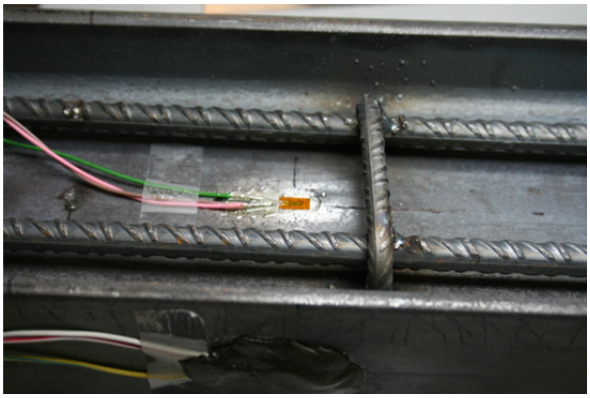


Figura B 129 - Extensometria no IPE.

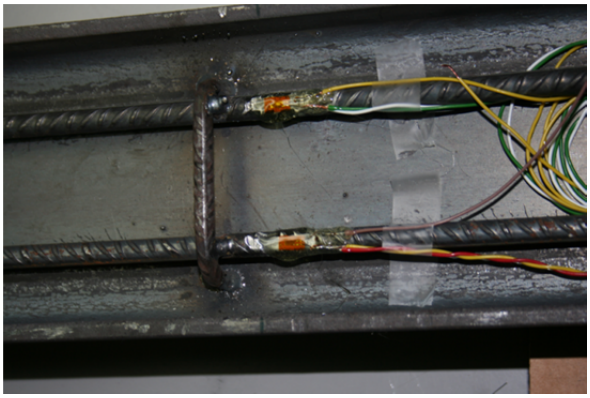


Figura B 130 - Extensometria no reforço.

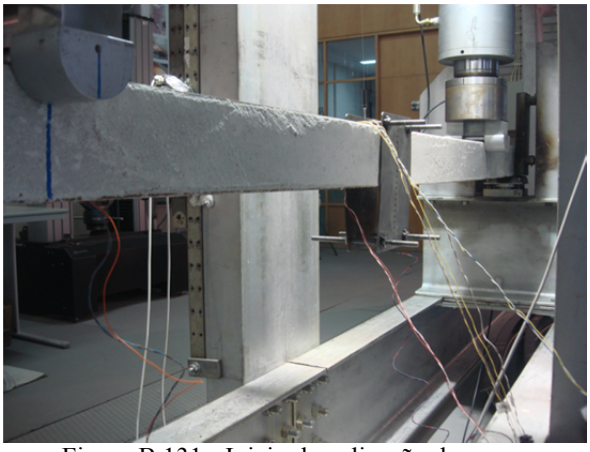


Figura B 131 - Inicio da aplicação da carga.

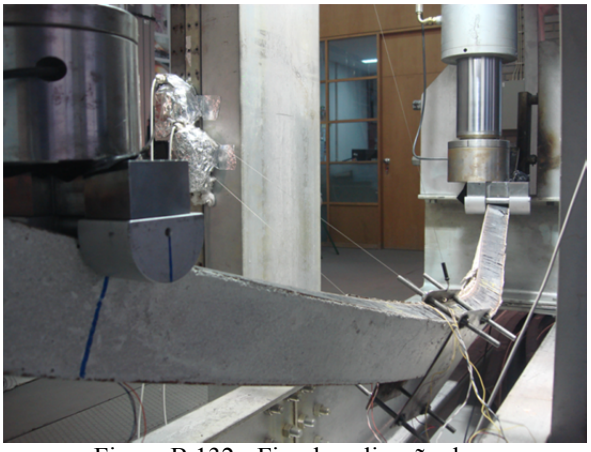


Figura B 132 - Fim da aplicação da carga.

Tabela B 60 - Observações / Comentários.

Observações / Comentários:
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB).

SÉRIE 5 (ENSAIO - B/2.4-11A)

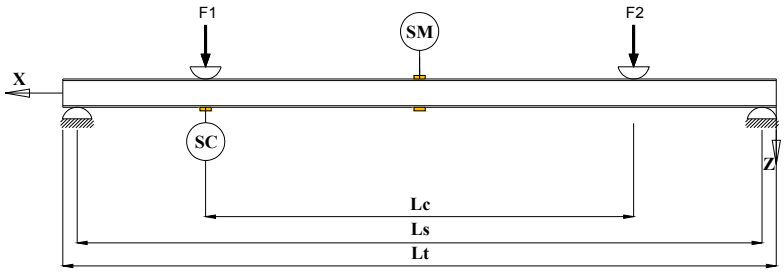


Figura B 133 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

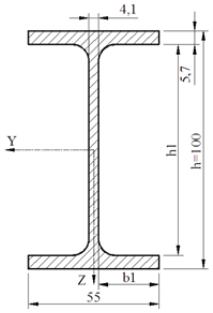


Figura B 134 - Secção da viga.

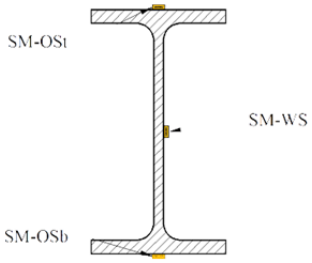


Figura B 135 - Instrumentação da secção SM.

Tabela B 61 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{vk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck.cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 62 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
2,5	2,4	1,5	-	Ambiente	1=L/2500

Tabela B 63 - Imperfeições laterais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,25	1,5	2,0	2,45
Imperfeições (Y) [mm]	0	1	1	0	1	0	0

Tabela B 64 - Eventos de Carga.

F_p [N]	F_v [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
-	27500	-	29627

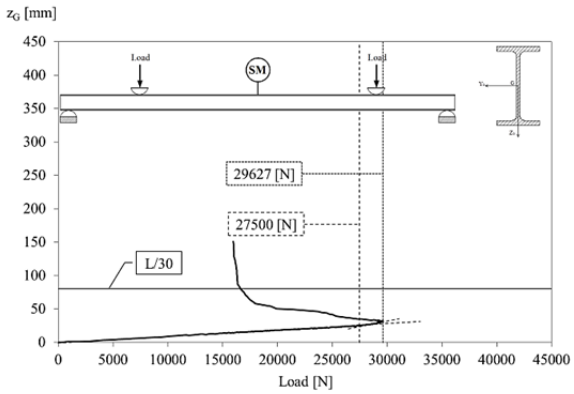


Figura B 136 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

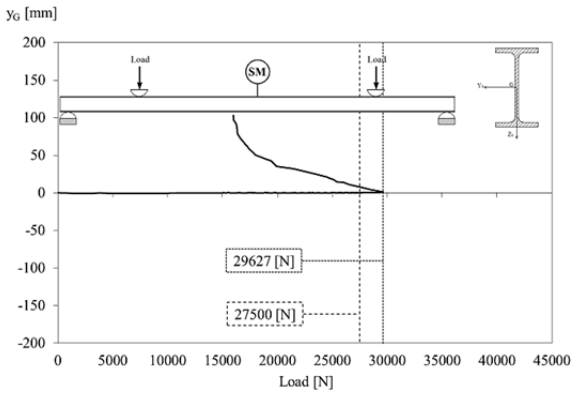


Figura B 137 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

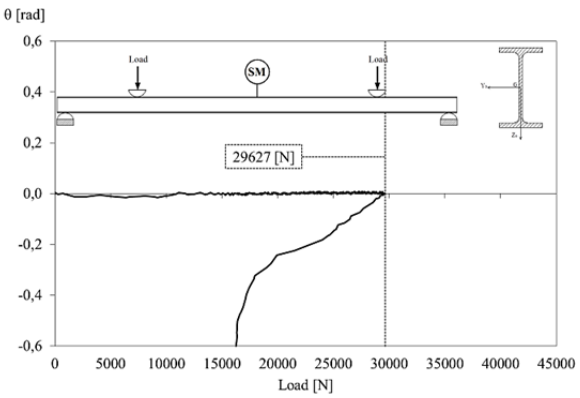


Figura B 138 - Rotação da secção SM.

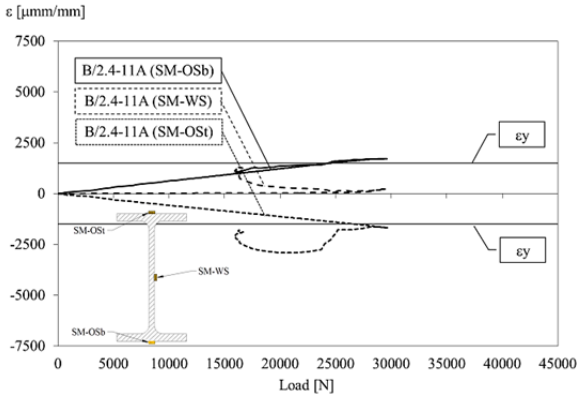


Figura B 139 - Extensometria da Secção SM.

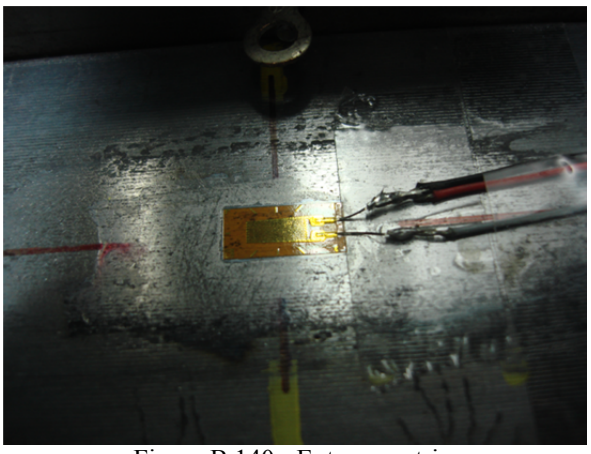


Figura B 140 - Extensometria.

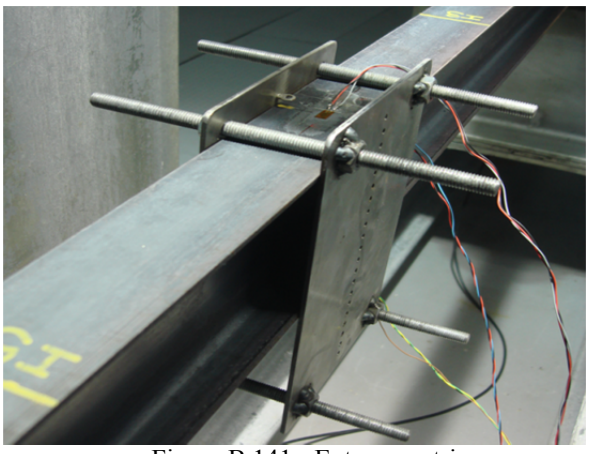


Figura B 141 - Extensometria.

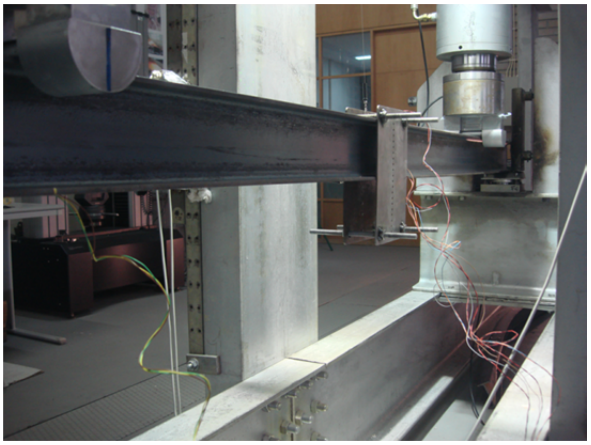


Figura B 142 - Inicio da aplicação da carga.

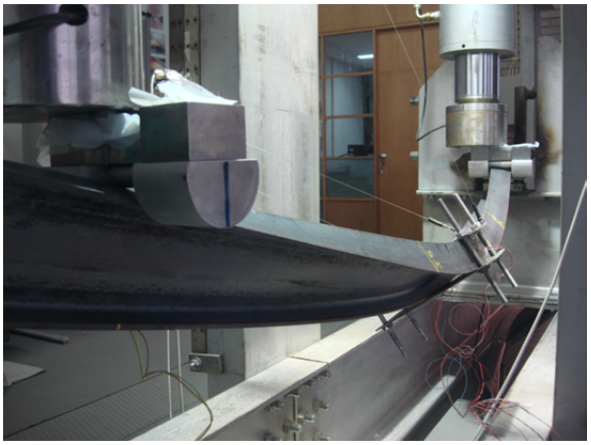


Figura B 143 - Fim da aplicação da carga.

Tabela B 65 - Observações / Comentários.

Observações / Comentários:
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB).

SÉRIE 5 (ENSAIO - B/2.4-12A)

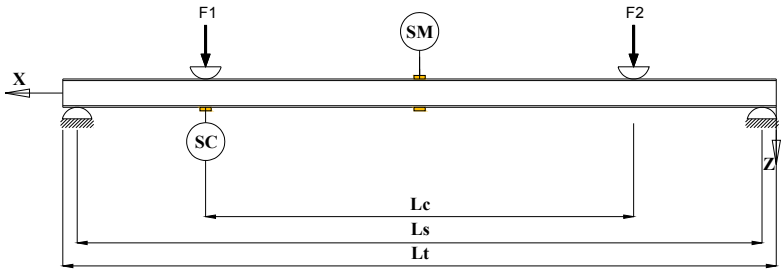


Figura B 144 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

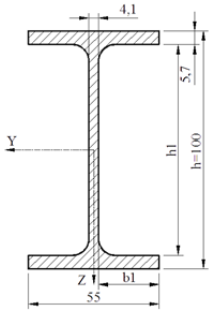


Figura B 145 - Secção da viga.

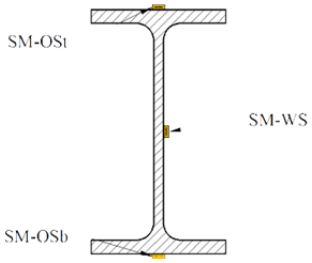


Figura B 146 - Instrumentação da secção SM.

Tabela B 66 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{vk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck.cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 67 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
2,5	2,4	1,5	-	Ambiente	2=L/1250

Tabela B 68 - Imperfeições laterais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,25	1,5	2,0	2,45
Imperfeições (Y) [mm]	0	0	0	1	1	2	0

Tabela B 69 - Eventos de Carga.

F_p [N]	F_v [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
-	27200	-	28477

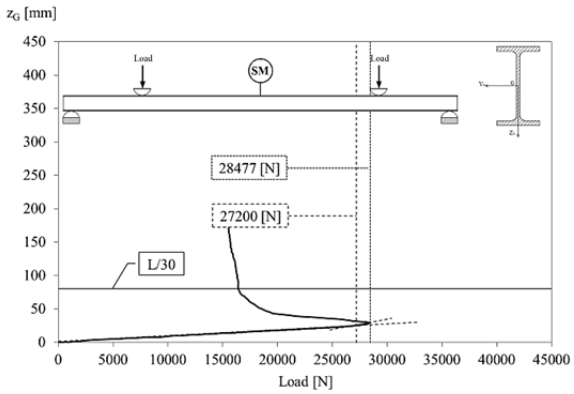


Figura B 147 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

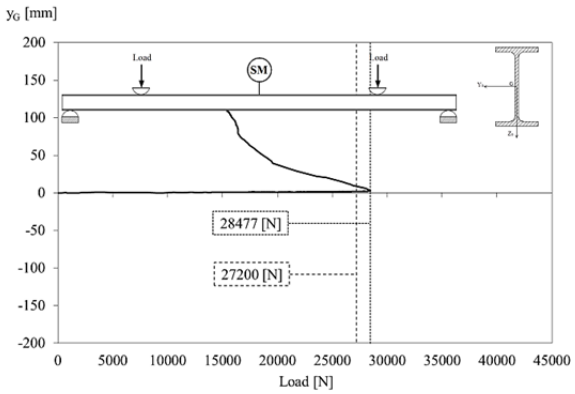


Figura B 148 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

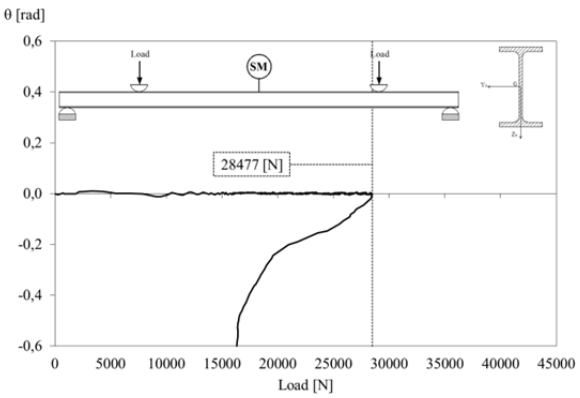


Figura B 149 - Rotação da secção SM.

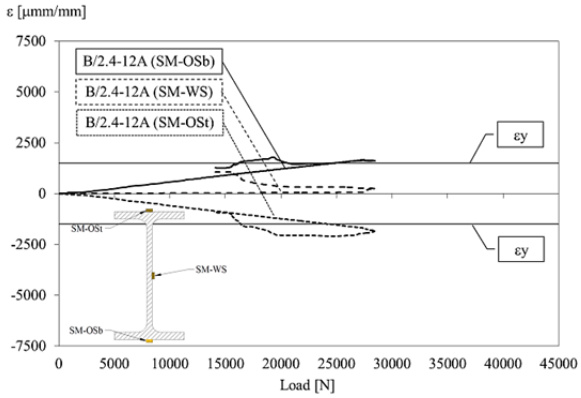


Figura B 150 - Extensometria da Secção SM.

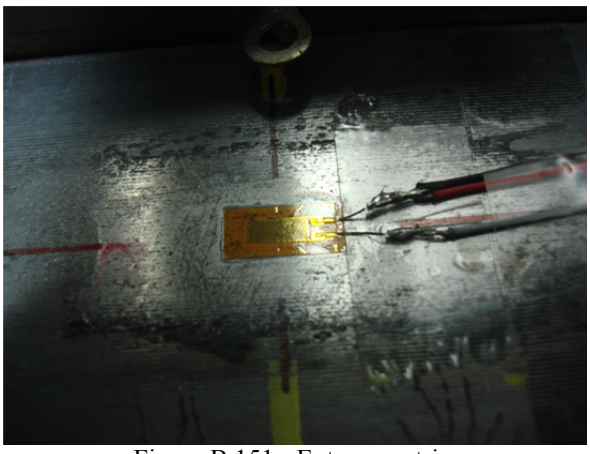


Figura B 151 - Extensometria.

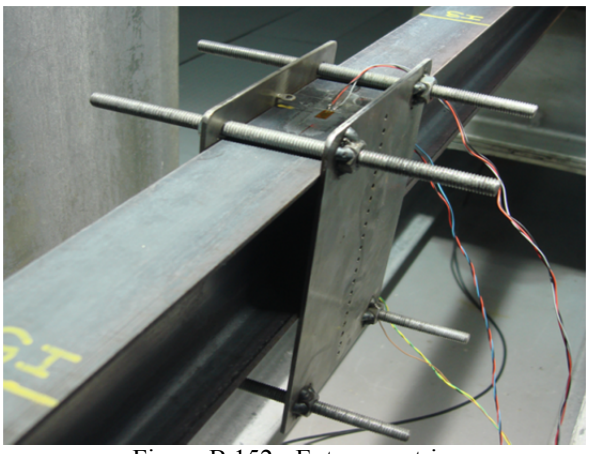


Figura B 152 - Extensometria.

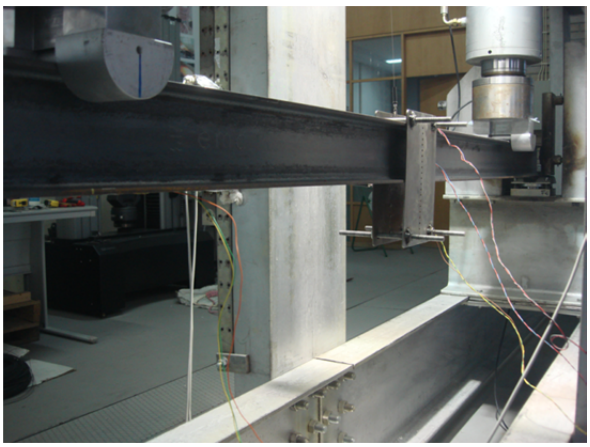


Figura B 153 - Inicio da aplicação da carga.

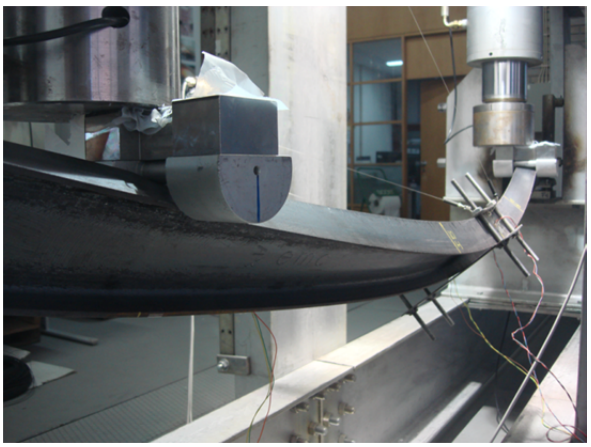


Figura B 154 - Fim da aplicação da carga.

Tabela B 70 - Observações / Comentários.

Observações / Comentários:
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB).

SÉRIE 6 (ENSAIO - B/3.9-01)

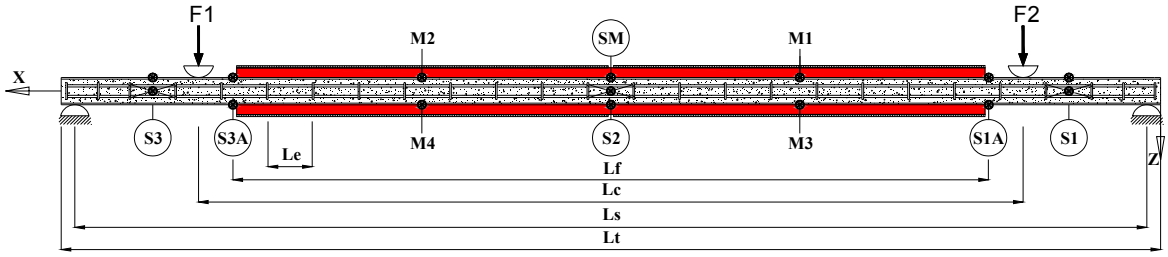


Figura B 155 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

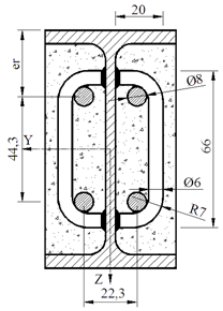


Figura B 156 - Secção da viga.

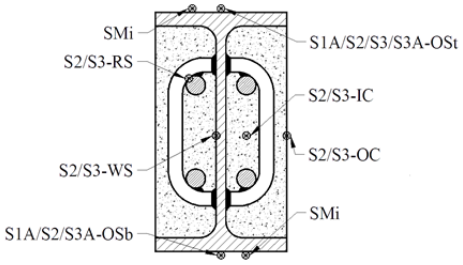


Figura B 157 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi.

Tabela B 71 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{vk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck.cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 72 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Lf [m]	Le [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
4,0	3,9	3,0	2,8	0,167	W	400	2=L/2000

Tabela B 73 - Imperfeições laterais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	3,95
Imperfeições (Y) [mm]	0	0	1	2	0	0	1	1	0

Tabela B 74 - Eventos de carga.

F_p [N]	F_v [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
11190	16370	22126	30204

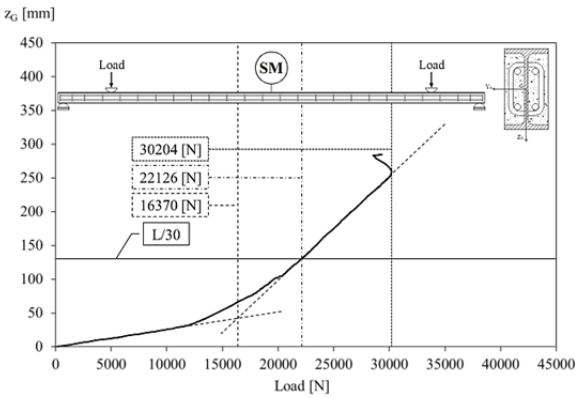


Figura B 158 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

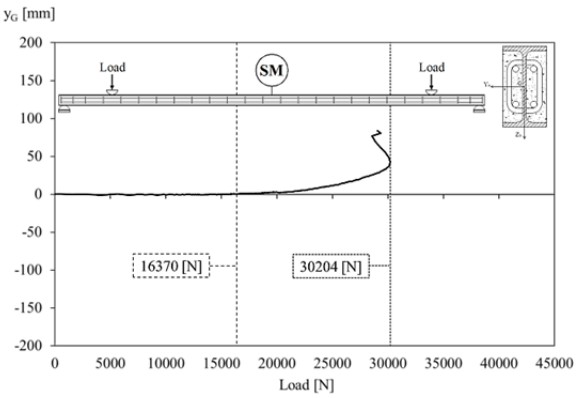


Figura B 159 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

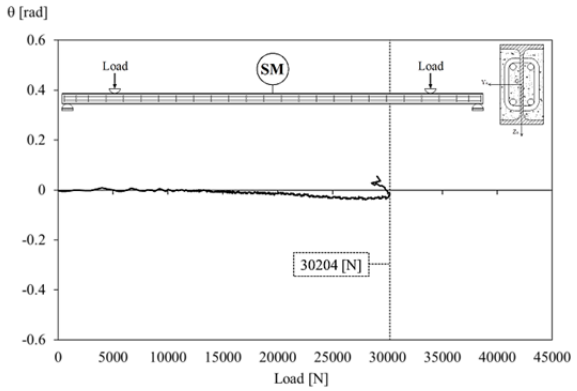


Figura B 160 - Rotação da secção SM.

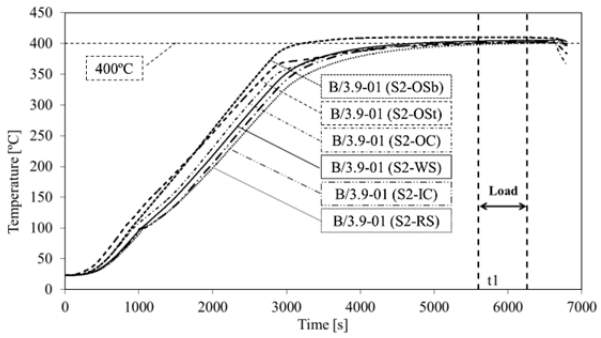


Figura B 161 - Aquecimento da Secção S2.

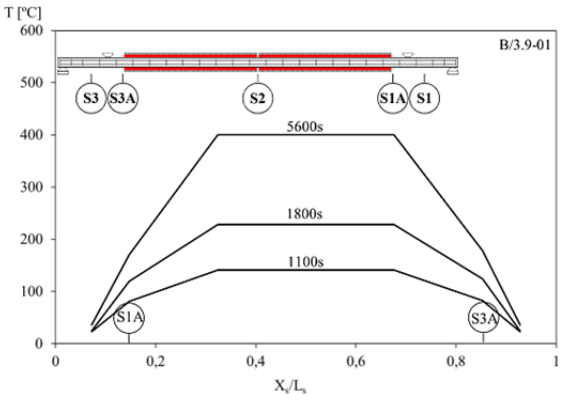


Figura B 162 - Evolução da distribuição de temperatura.

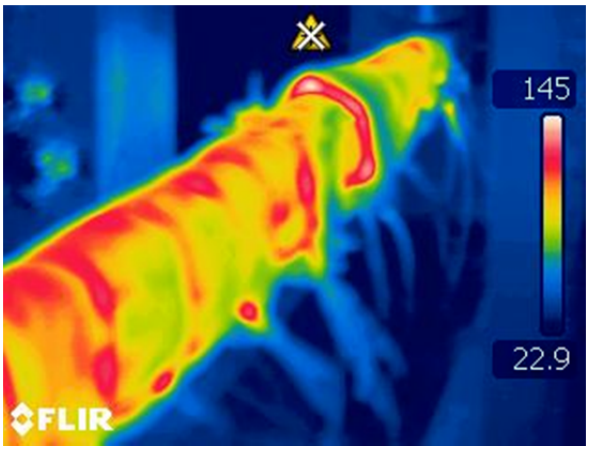


Figura B 163 - Termografia antes de remover isolamento.

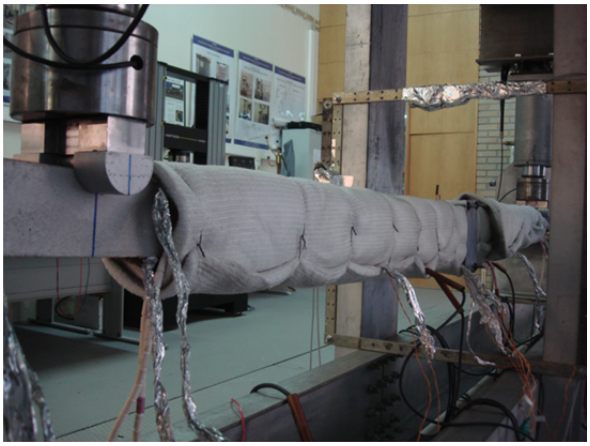


Figura B 164 - Inicio da aplicação da carga.

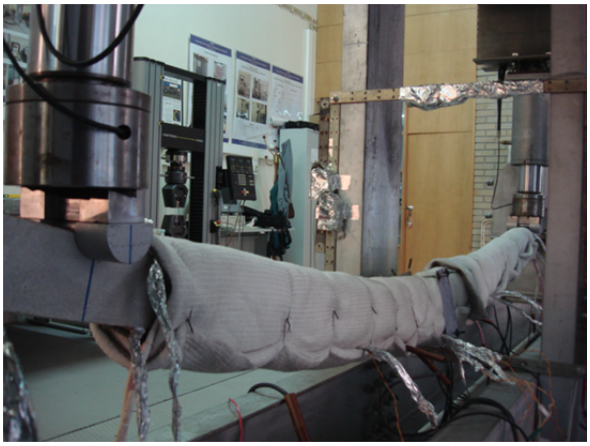


Figura B 165 - Fim da aplicação da carga.

Tabela B 75 - Observações / Comentários

Observações / Comentários:
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB).

SÉRIE 6 (ENSAIO - B/3.9-02)

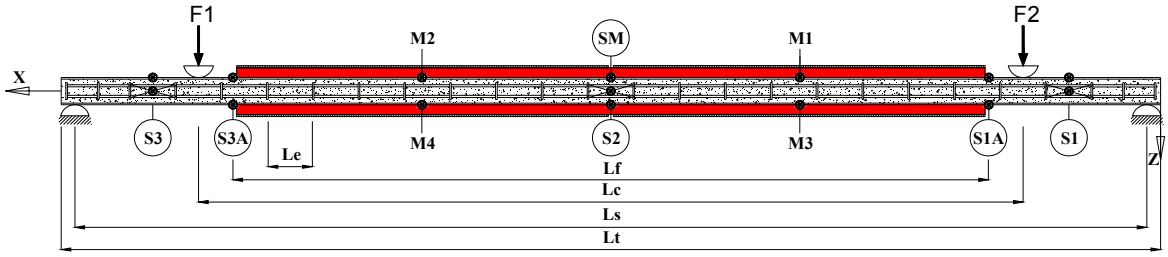


Figura B 166 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

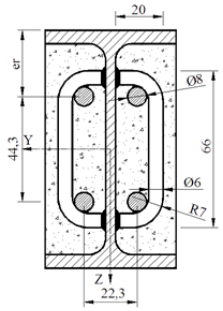


Figura B 167 - Secção da viga.

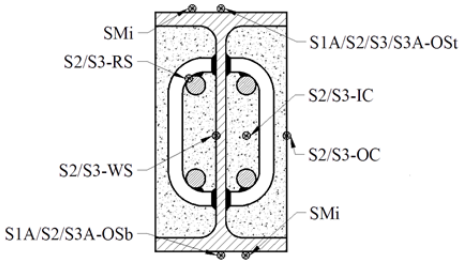


Figura B 168 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi.

Tabela B 76 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{vk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck.cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 77 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Lf [m]	Le [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
4,0	3,9	3,0	2,8	0,167	W	400	5=L/800

Tabela B 78 - Imperfeições laterais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	3,95
Imperfeições (Y) [mm]	0	0	3	5	5	4	4	3	0

Tabela B 79 - Eventos de carga.

F_p [N]	F_v [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
11920	16360	22715	27290

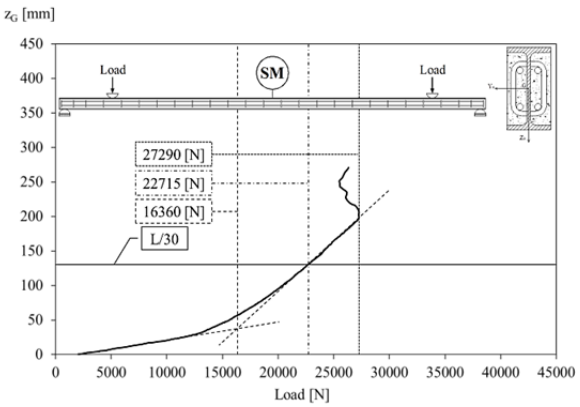


Figura B 169 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

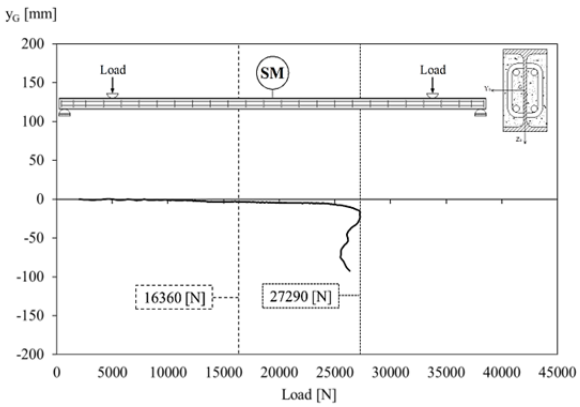


Figura B 170 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

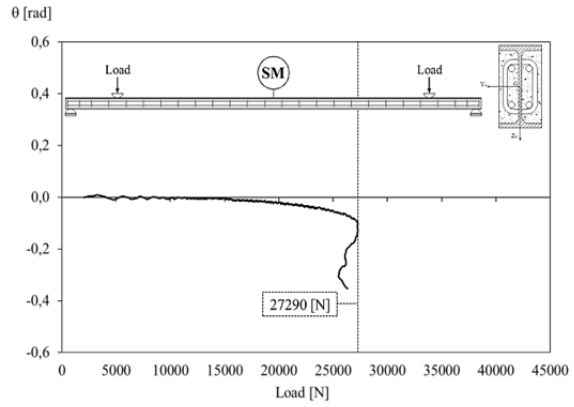


Figura B 171 - Rotação da secção SM.

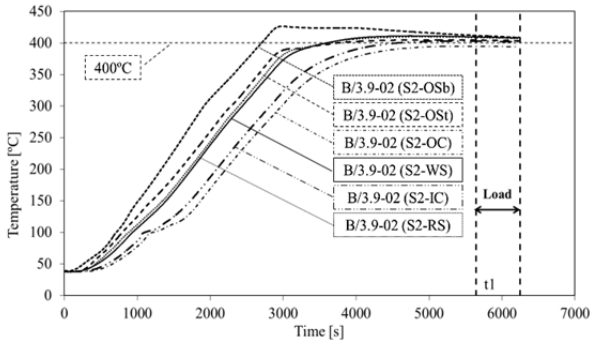


Figura B 172 - Aquecimento da Secção S2.

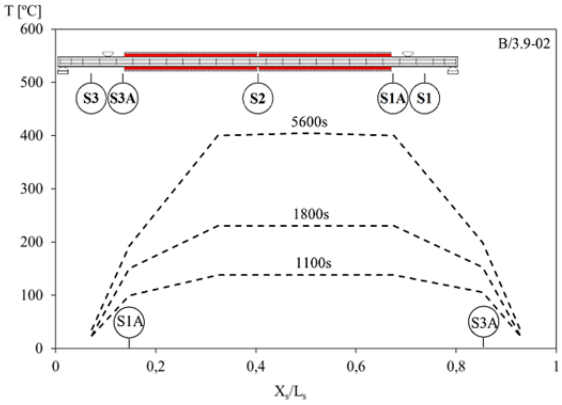


Figura B 173 - Evolução da distribuição de temperatura.

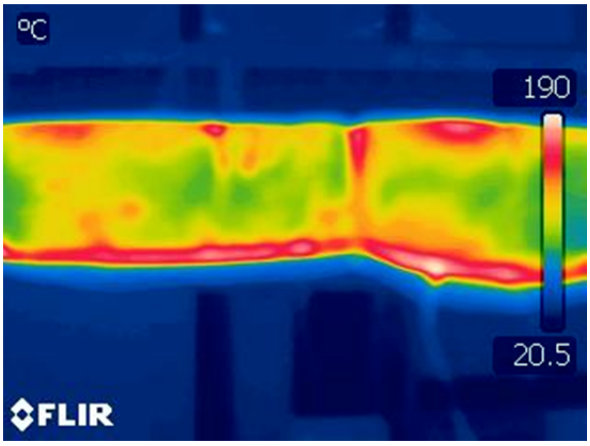


Figura B 174 - Termografia antes de remover isolamento.

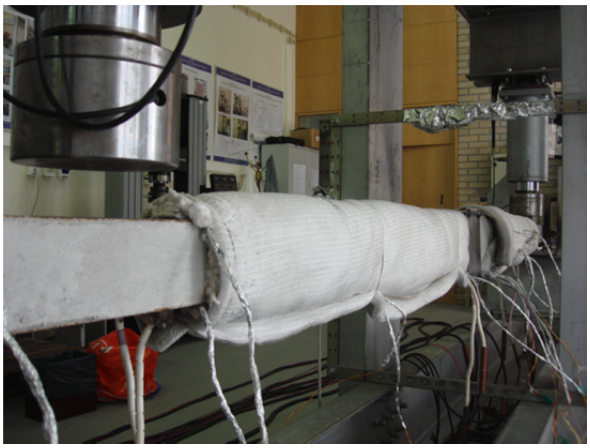


Figura B 175 - Início da aplicação da carga.

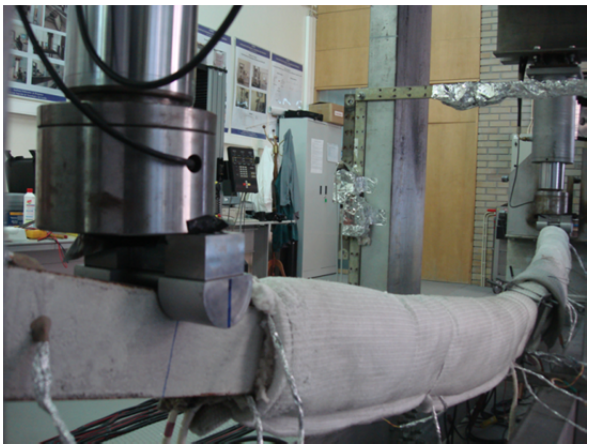


Figura B 176 - Fim da aplicação da carga.

Tabela B 80 - Observações / Comentários.

Observações / Comentários:
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB).

SÉRIE 6 (ENSAIO - B/3.9-03)

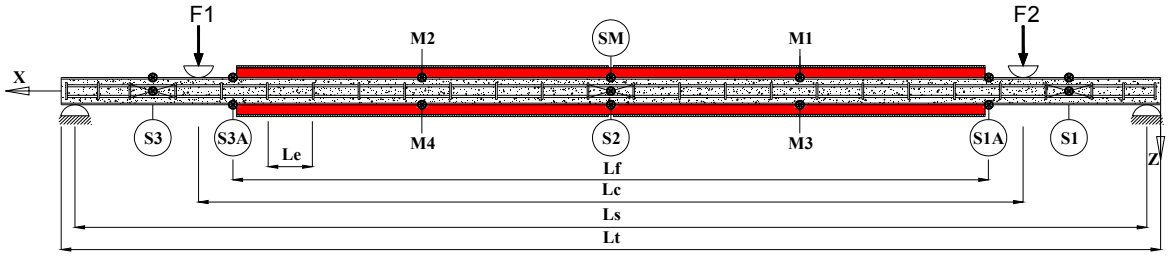


Figura B 177 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

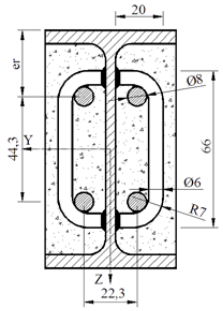


Figura B 178 - Secção da viga.

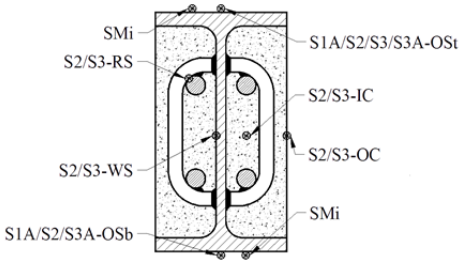


Figura B 179 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi.

Tabela B 81 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{vk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck.cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 82 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Lf [m]	Le [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
4,0	3,9	3,0	2,8	0,167	W	400	3=L/1333

Tabela B 83 - Imperfeições laterais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	3,95
Imperfeições (Y) [mm]	0	1	3	3	3	2	2	1	0

Tabela B 84 - Eventos de carga.

F_p [N]	F_v [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
11700	14850	22573	28337

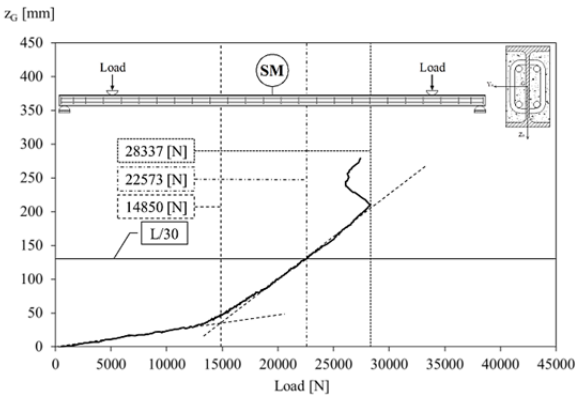


Figura B 180 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

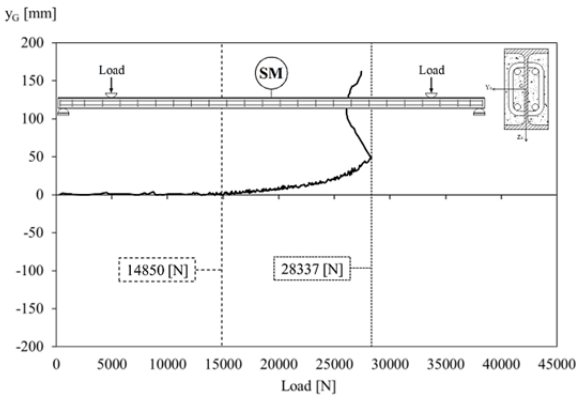


Figura B 181 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

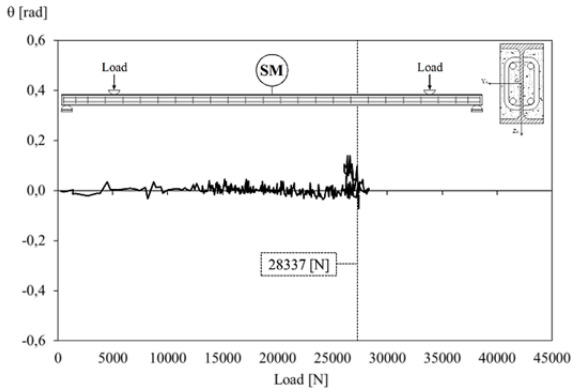


Figura B 182 - Rotação da secção SM.

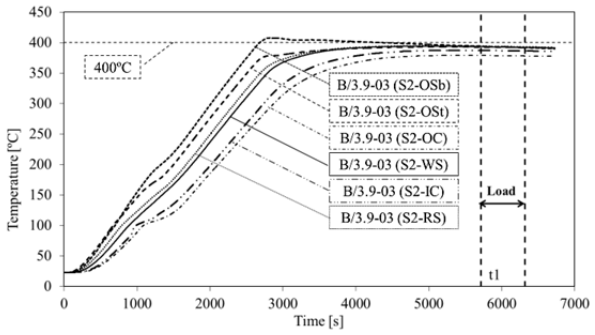


Figura B 183 - Aquecimento da Secção S2.

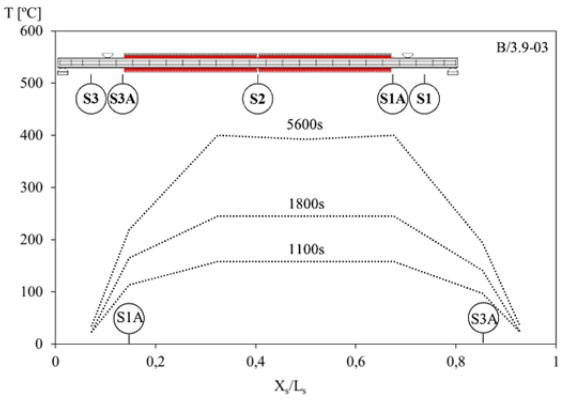


Figura B 184 - Evolução da distribuição de temperatura.

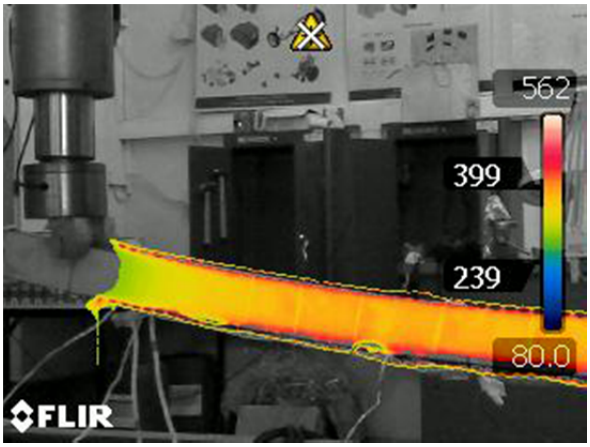


Figura B 185 - Termografia após remoção do isolamento.



Figura B 186 - Inicio da aplicação da carga.

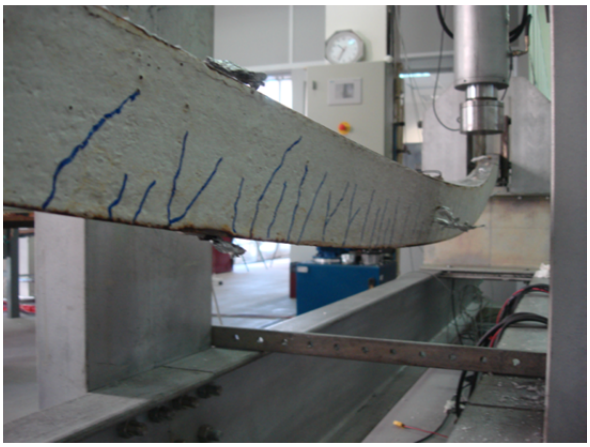


Figura B 187 - Final do ensaio.

Tabela B 85 - Observações / Comentários.

Observações / Comentários:
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB).

SÉRIE 7 (ENSAIO - B/3.9-04)

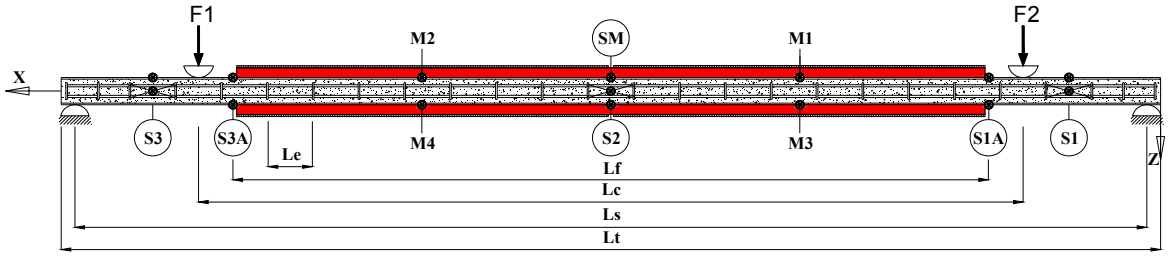


Figura B 188 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

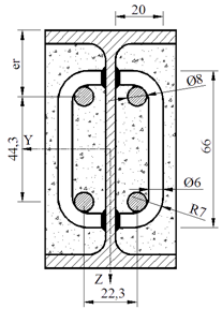


Figura B 189 - Secção da viga.

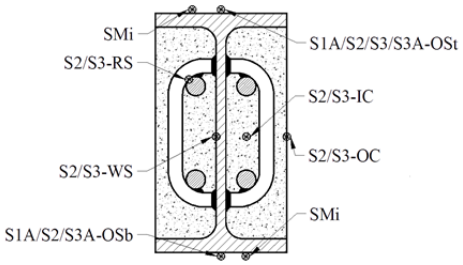


Figura B 190 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi.

Tabela B 86 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{yk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck,cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 87 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Lf [m]	Le [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
4,0	3,9	3,0	2,8	0,167	W	600	2=L/2000

Tabela B 88 - Imperfeições laterais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	3,95
Imperfeições (Y) [mm]	0	1	1	2	1	1	1	1	0

Tabela B 89 - Eventos de carga.

F_p [N]	F_y [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
4110	9620	12641	22456

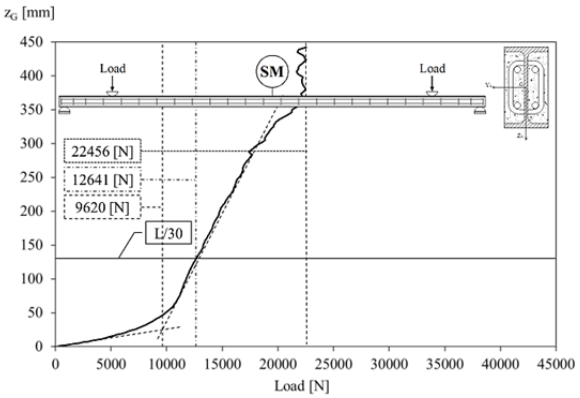


Figura B 191 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

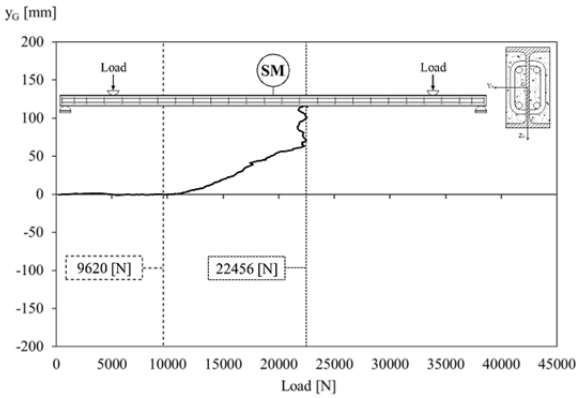


Figura B 192 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

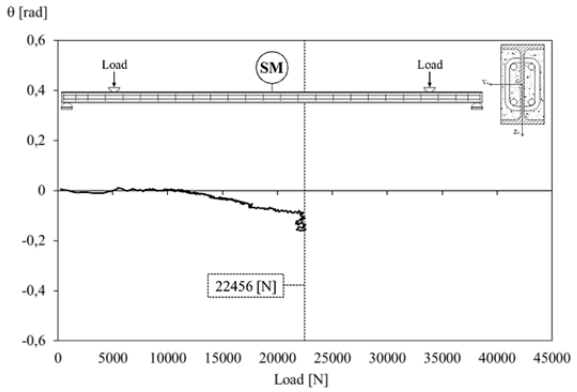


Figura B 193 - Rotação da secção SM.

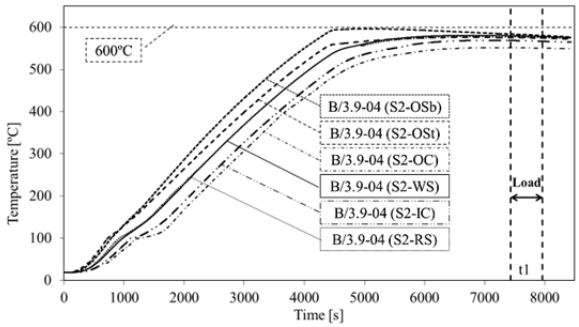


Figura B 194 - Aquecimento da Secção S2.

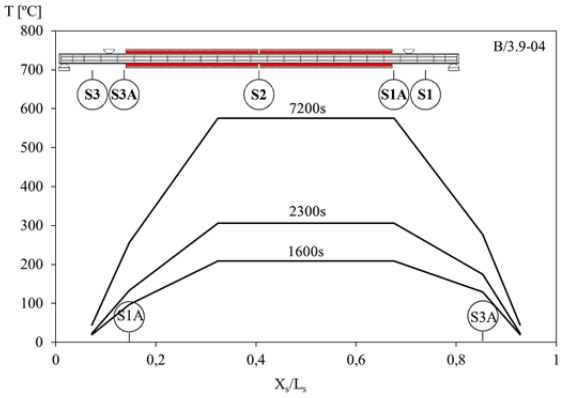


Figura B 195 - Evolução da distribuição de temperatura.

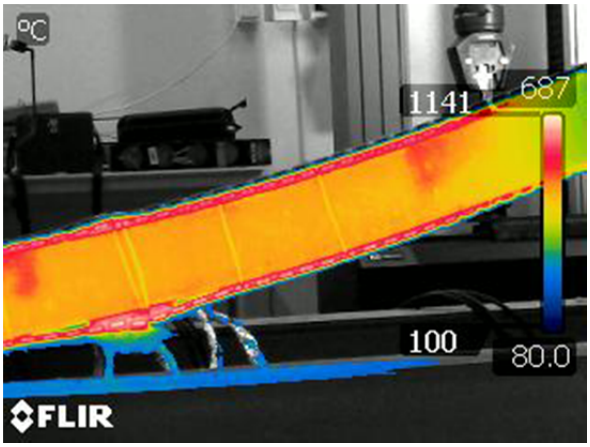


Figura B 196 - Termografia após remoção do isolamento.

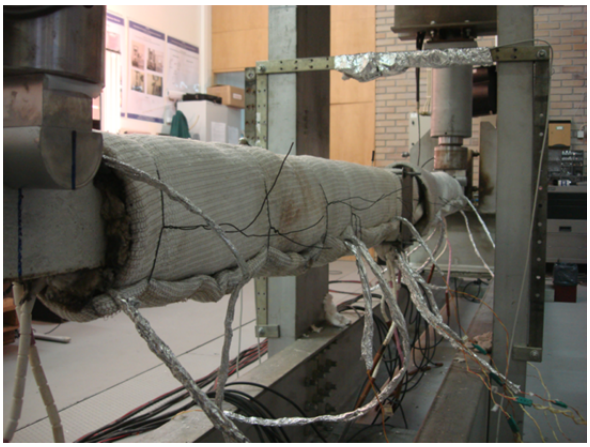


Figura B 197 - Inicio da aplicação da carga.

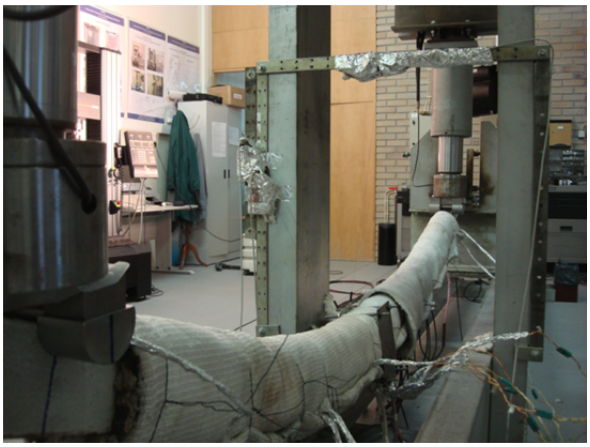


Figura B 198 - Fim da aplicação da carga.

Tabela B 90 - Observações / Comentários.

Observações / Comentários: Menor imperfeição lateral pode justificar menor rotação.
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB), com eventual formação de rótula plástica (PH).

SÉRIE 7 (ENSAIO - B/3.9-05)

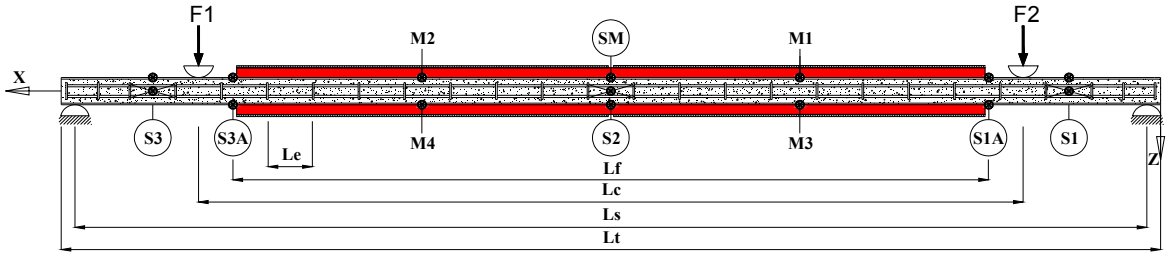


Figura B 199 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

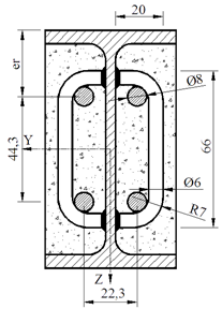


Figura B 200 - Secção da viga.

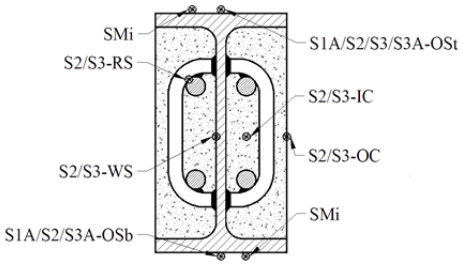


Figura B 201 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi.

Tabela B 91 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{yk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck,cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 92 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Lf [m]	Le [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
4,0	3,9	3,0	2,8	0,167	W	600	2=L/2000

Tabela B 93 - Imperfeições laterais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	3,95
Imperfeições (Y) [mm]	0	1	1	1	1	2	1	1	0

Tabela B 94 - Eventos de carga.

F_p [N]	F_y [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
4360	9750	12996	21662

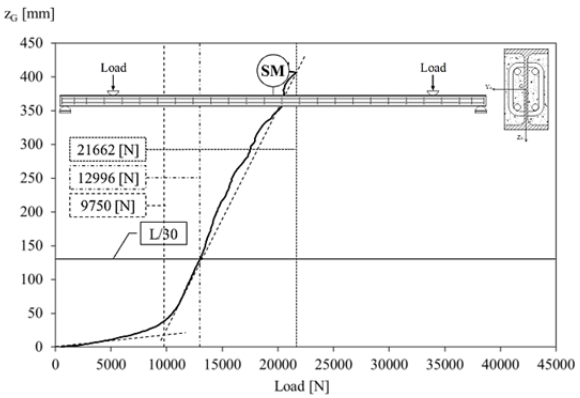


Figura B 202 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

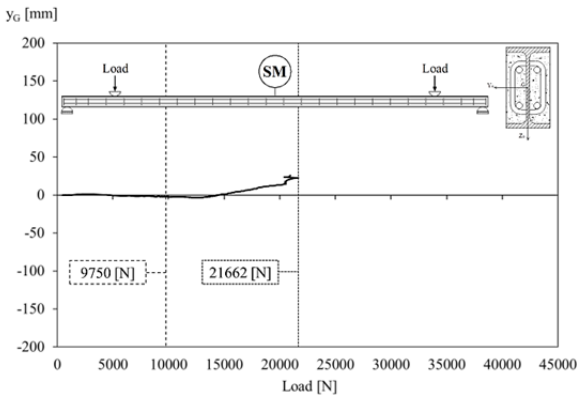


Figura B 203 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

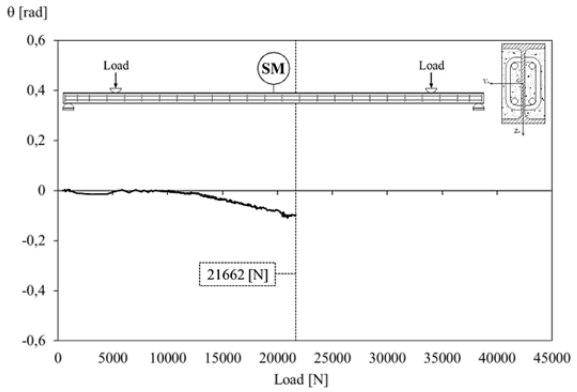


Figura B 204 - Rotação da secção SM.

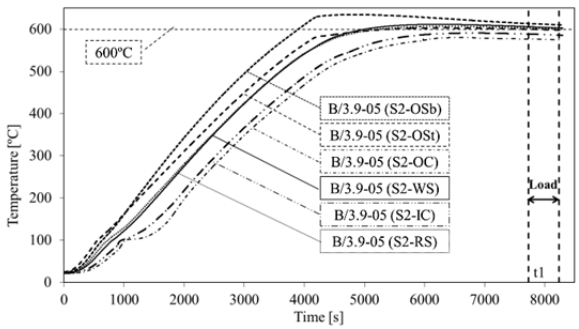


Figura B 205 - Aquecimento da Secção S2.

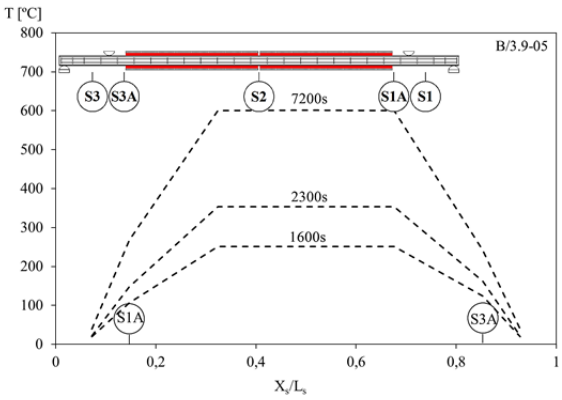


Figura B 206 - Evolução da distribuição de temperatura.

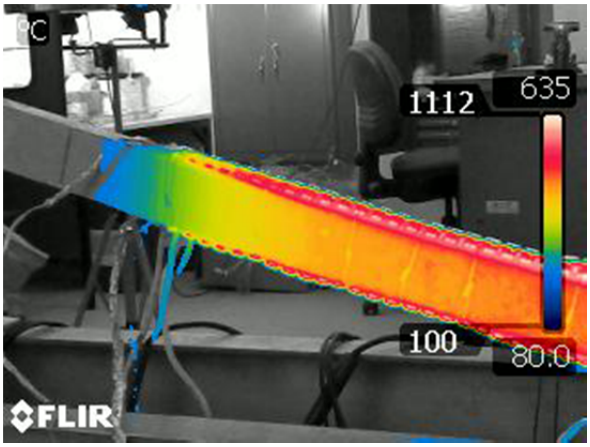


Figura B 207 - Termografia após remoção do isolamento.

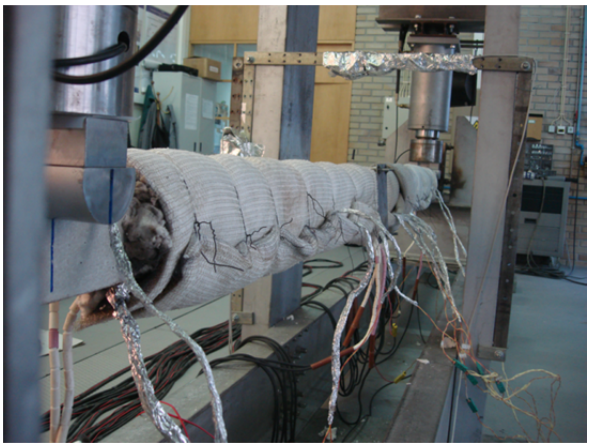


Figura B 208 - Inicio da aplicação da carga.

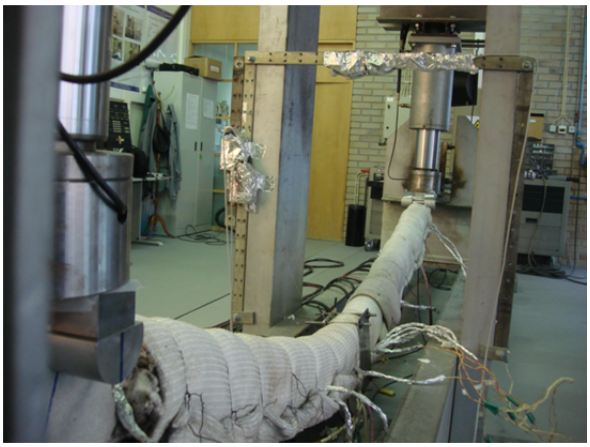


Figura B 209 - Fim da aplicação da carga.

Tabela B 95 - Observações / Comentários.

Observações / Comentários: Menor imperfeição lateral pode justificar menor rotação.
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB), com eventual formação de rótula plástica (PH).

SÉRIE 7 (ENSAIO - B/3.9-06)

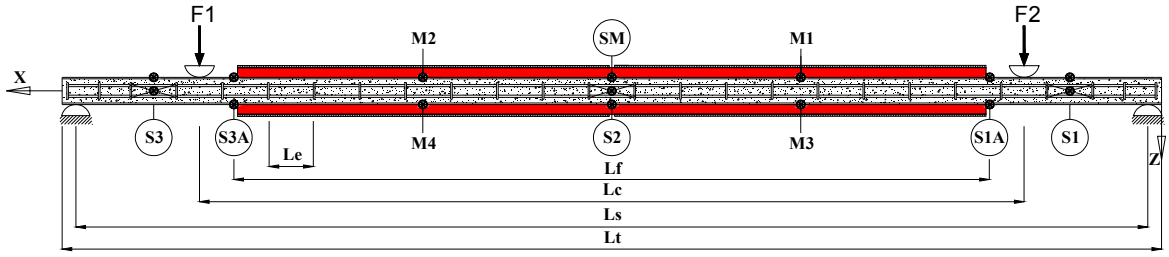


Figura B 210 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

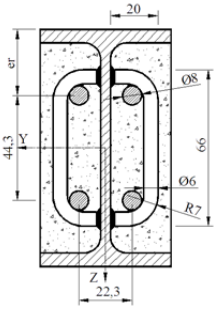


Figura B 211 - Secção da viga.

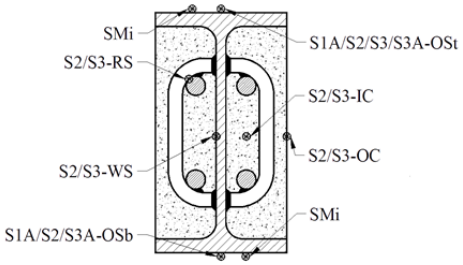


Figura B 212 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi.

Tabela B 96 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{yk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck,cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 97 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Lf [m]	Le [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
4,0	3,9	3,0	2,8	0,167	W	600	5=L/800

Tabela B 98 - Imperfeições laterais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	3,95
Imperfeições (Y) [mm]	0	2	4	4	5	5	4	3	0

Tabela B 99 - Eventos de carga.

F_p [N]	F_y [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
4090	9110	12025	22770

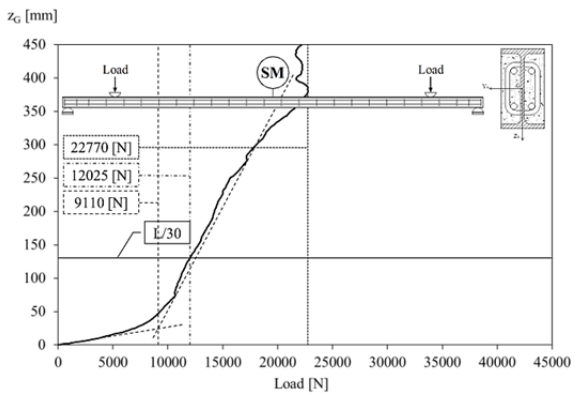


Figura B 213 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

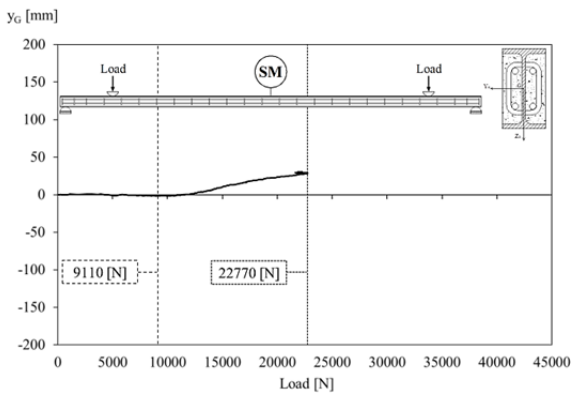


Figura B 214 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

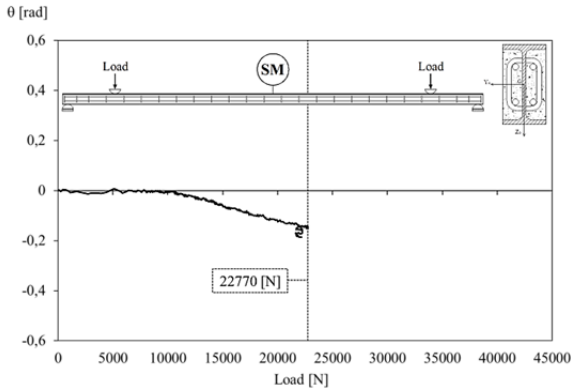


Figura B 215 - Rotação da secção SM.

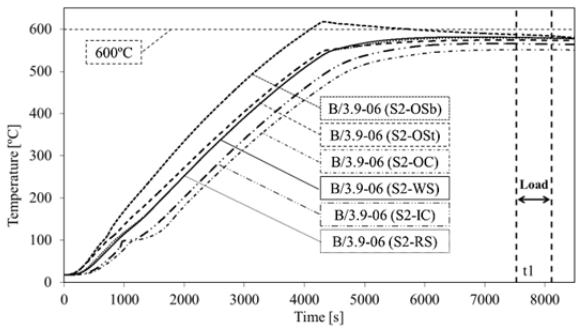


Figura B 216 - Aquecimento da Secção S2.

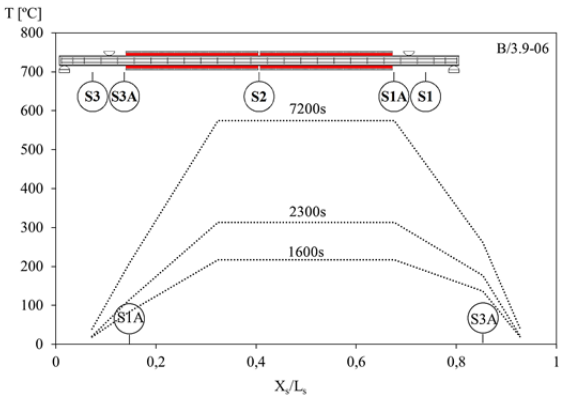


Figura B 217 - Evolução da distribuição de temperatura.

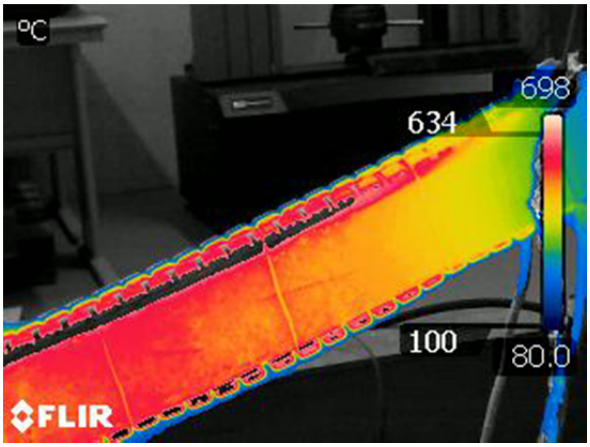


Figura B 218 - Termografia após remoção do isolamento.

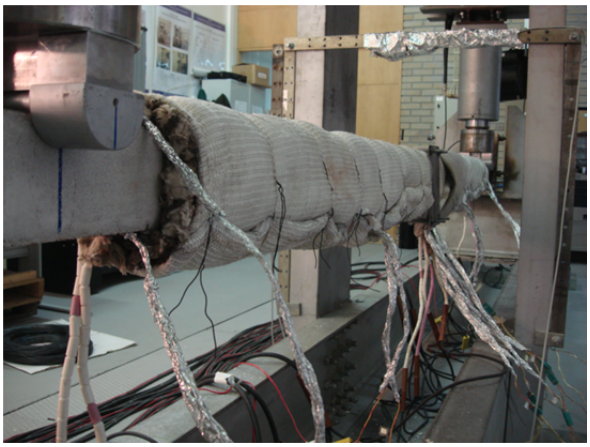


Figura B 219 - Inicio da aplicação da carga.

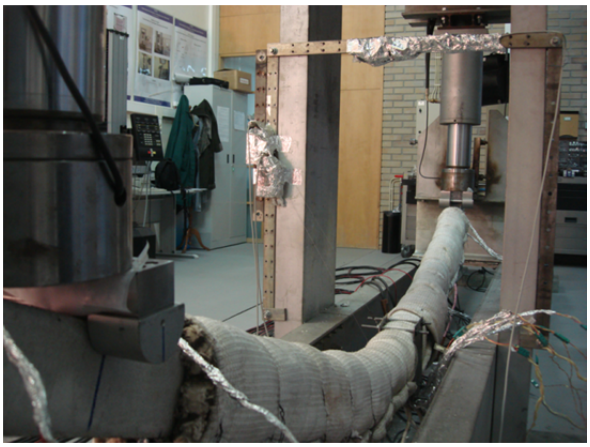


Figura B 220 - Fim da aplicação da carga.

Tabela B 100 - Observações / Comentários.

Observações / Comentários:
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB), com eventual formação de rótula plástica (PH).

SÉRIE 8 (ENSAIO - B/3.9-07)

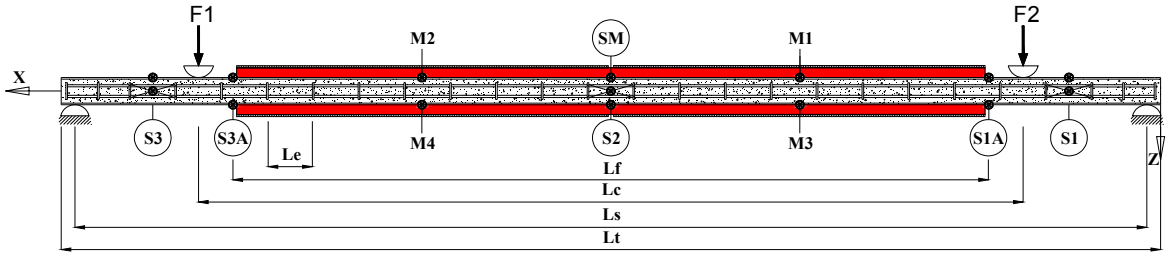


Figura B 221 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

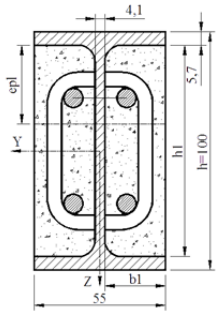


Figura B 222 - Secção da viga.

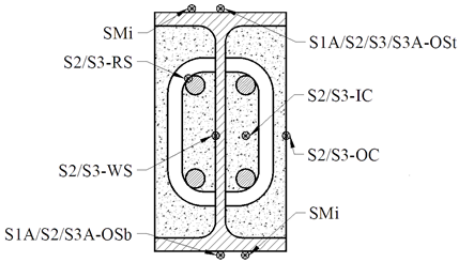


Figura B 223 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi.

Tabela B 101 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{vk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck.cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 102 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Lf [m]	Le [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
4,0	3,9	3,0	2,8	0,167	NW	400	5=L/800

Tabela B 103 - Imperfeições laterais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	3,95
Imperfeições (Y) [mm]	0	3	4	5	5	4	4	3	0

Tabela B 104 - Eventos de carga.

F_p [N]	F_v [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
11170	15000	22665	23591

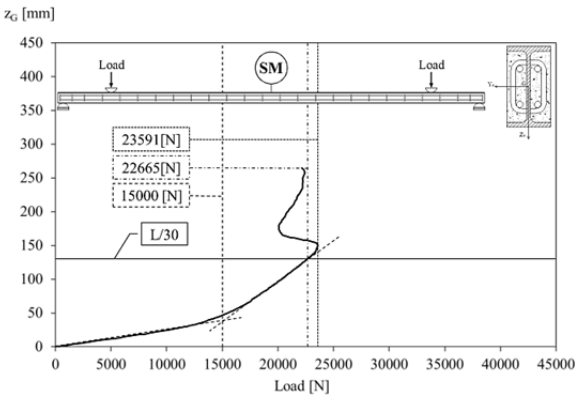


Figura B 224 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

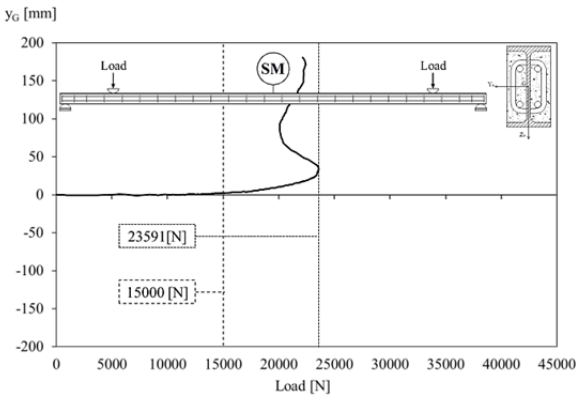


Figura B 225 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

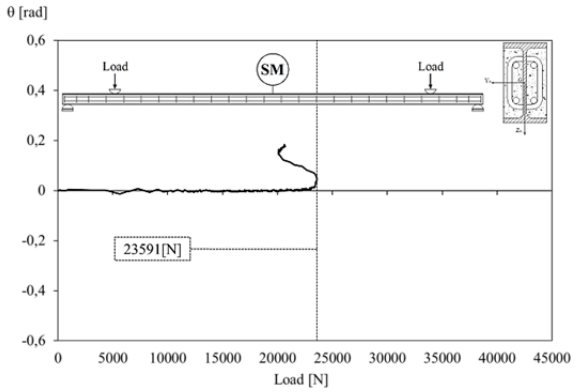


Figura B 226 - Rotação da secção SM.

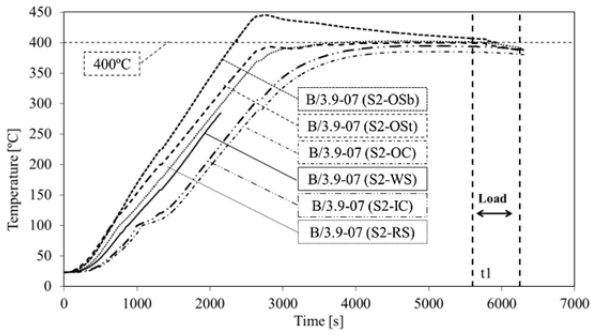


Figura B 227 - Aquecimento da Secção S2.

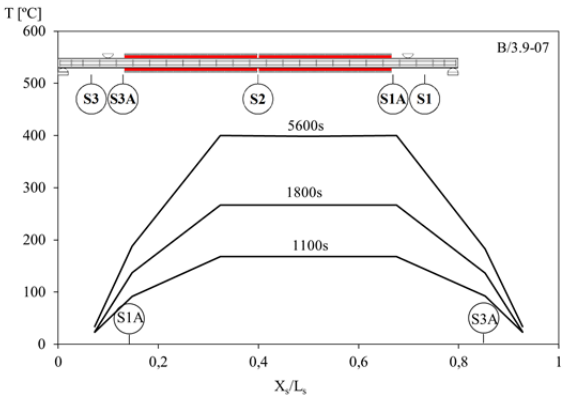


Figura B 228 - Evolução da distribuição de temperatura.

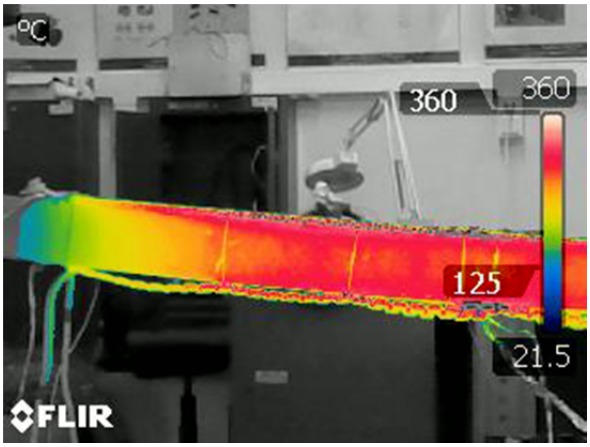


Figura B 229 - Termografia após remoção do isolamento.

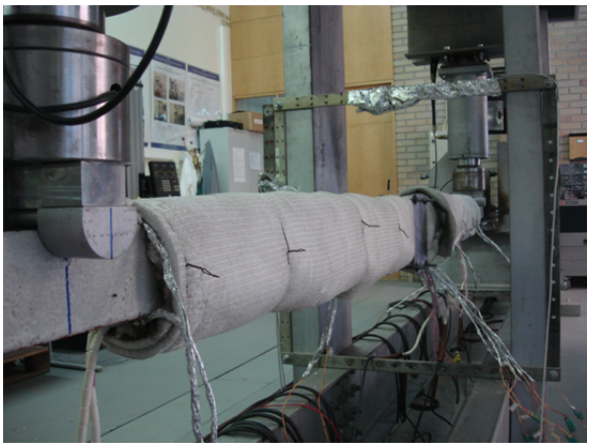


Figura B 230 - Inicio da aplicação da carga.

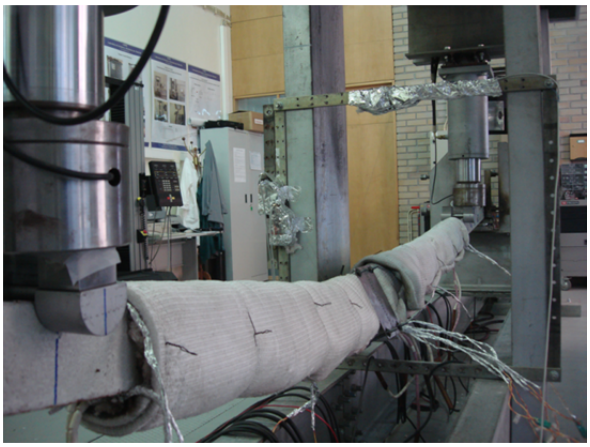


Figura B 231 - Fim da aplicação da carga.

Tabela B 105 - Observações / Comentários.

Observações / Comentários: Eventual restrição lateral da carga.
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB).

SÉRIE 8 (ENSAIO - B/3.9-08)

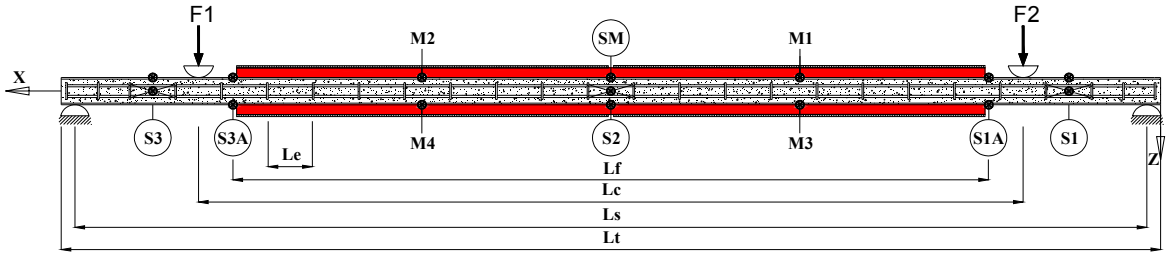


Figura B 232 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

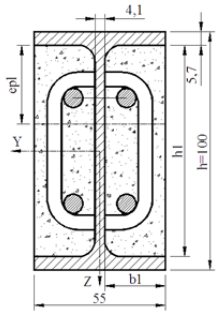


Figura B 233 - Secção da viga.

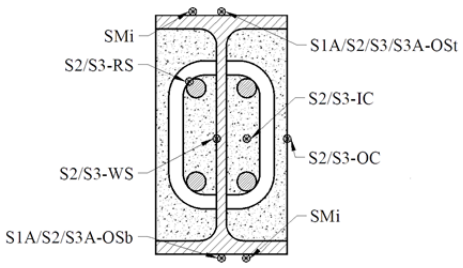


Figura B 234 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi.

Tabela B 106 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{vk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck.cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 107 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Lf [m]	Le [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
4,0	3,9	3,0	2,8	0,167	NW	400	5=L/800

Tabela B 108 - Imperfeições laterais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	3,95
Imperfeições (Y) [mm]	0	1	2	4	5	5	3	2	0

Tabela B 109 - Eventos de carga.

F_p [N]	F_v [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
13160	15600	24237	32642

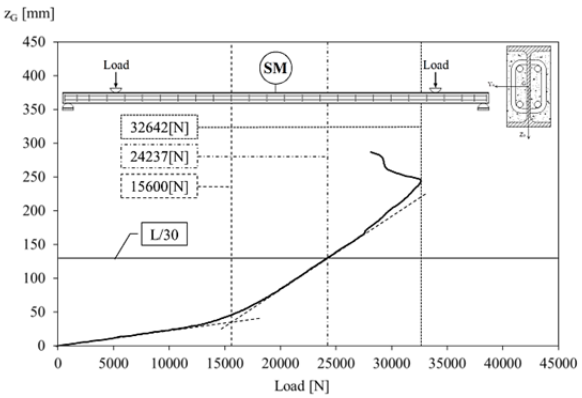


Figura B 235 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

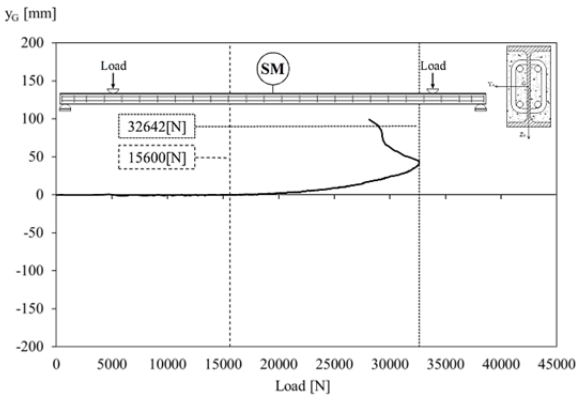


Figura B 236 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

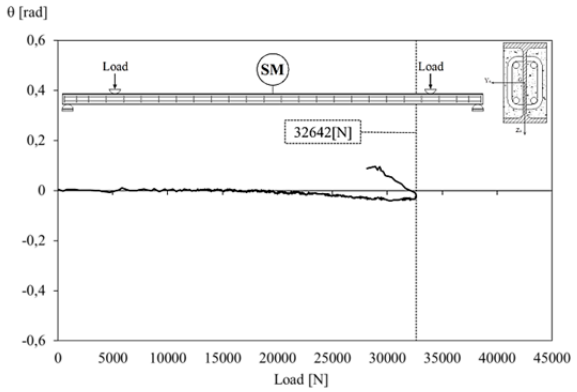


Figura B 237 - Rotação da secção SM.

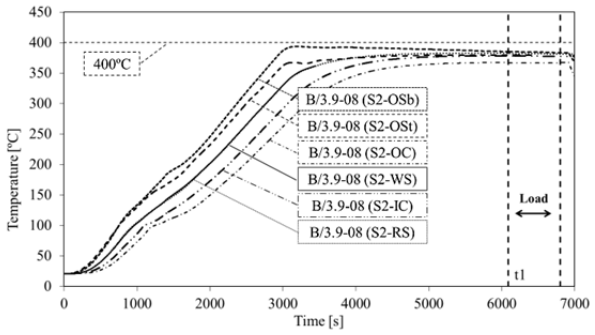


Figura B 238 - Aquecimento da Secção S2.

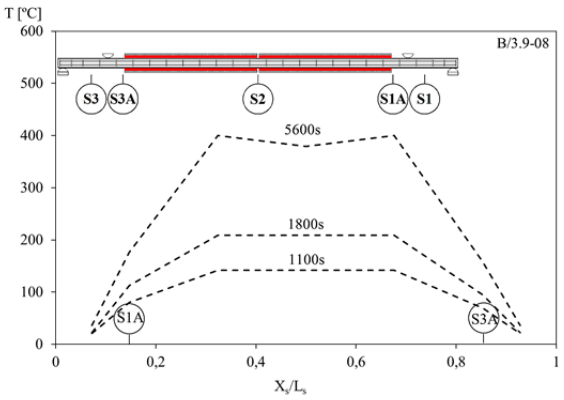


Figura B 239 - Evolução da distribuição de temperatura.

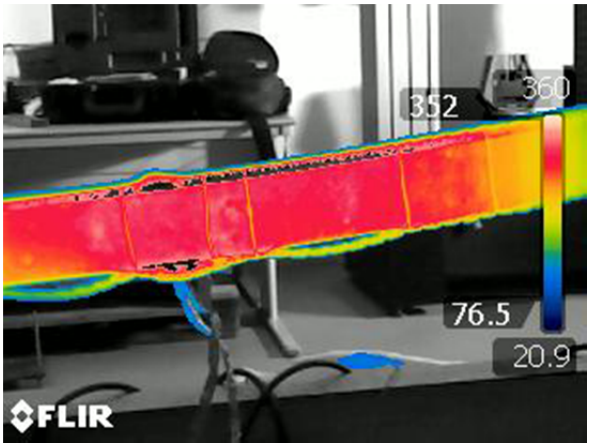


Figura B 240 - Termografia após remoção do isolamento.

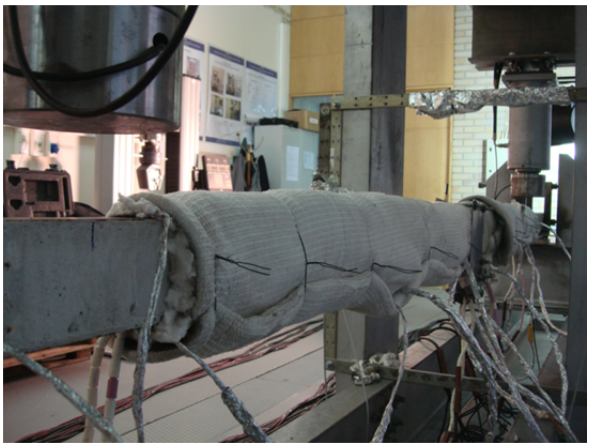


Figura B 241 - Inicio da aplicação da carga.

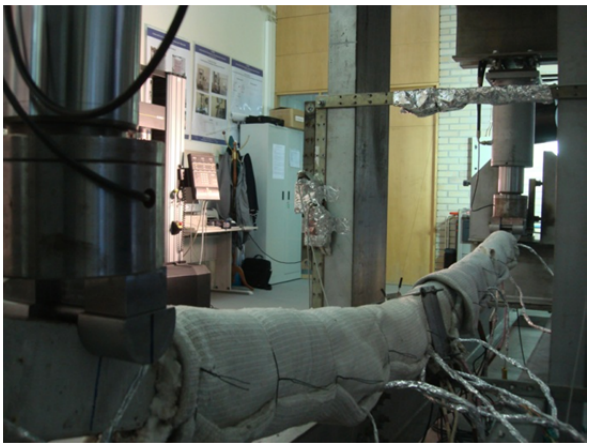


Figura B 242 - Fim da aplicação da carga.

Tabela B 110 - Observações / Comentários.

Observações / Comentários: Eventual restrição lateral da carga.
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB).

SÉRIE 8 (ENSAIO - B/3.9-09)

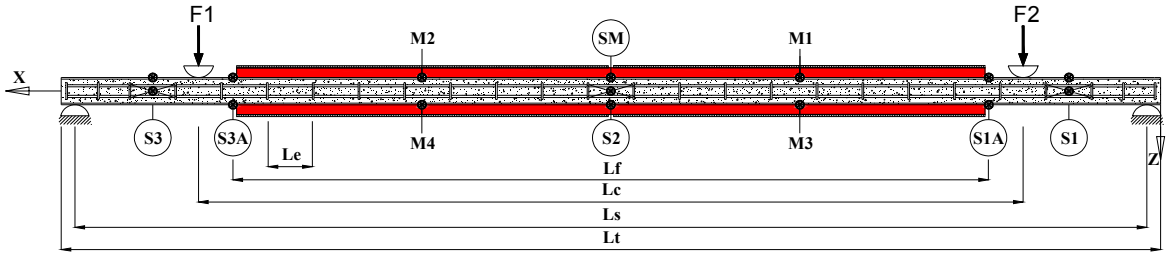


Figura B 243 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

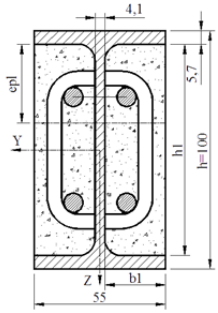


Figura B 244 - Secção da viga.

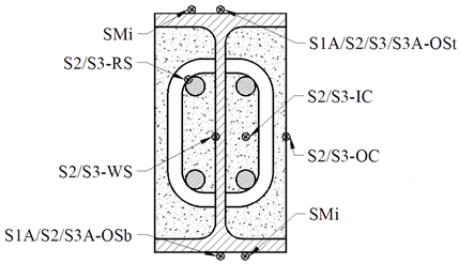


Figura B 245 - Instrumentação da secção S1/S1A/S2/S3/S3A/SMi.

Tabela B 111 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{yk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck,cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 112 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Lf [m]	Le [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
4,0	3,9	3,0	2,8	0,167	NW	400	2=L/2000

Tabela B 113 - Imperfeições laterais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	3,95
Imperfeições (Y) [mm]	0	1	1	2	2	2	1	1	0

Tabela B 114 - Eventos de carga.

F_p [N]	F_y [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
10720	15100	23207	24816

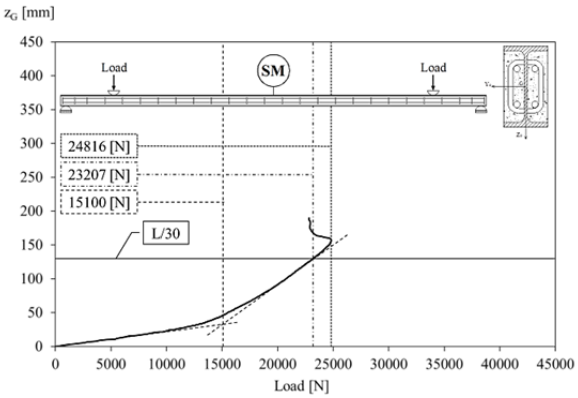


Figura B 246 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

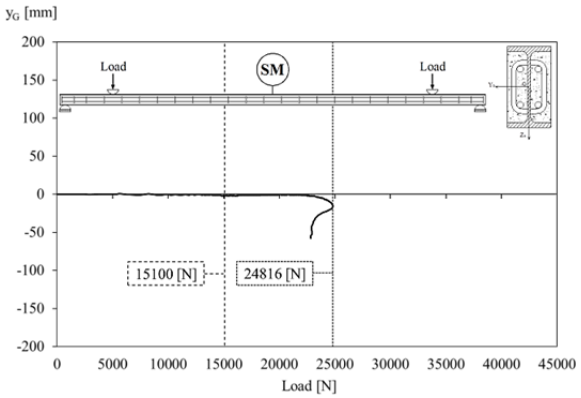


Figura B 247 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

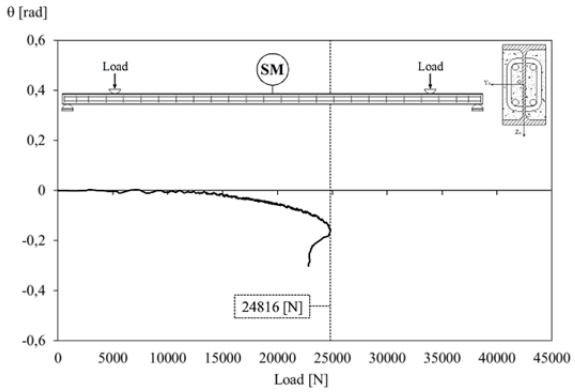


Figura B 248 - Rotação da secção SM.

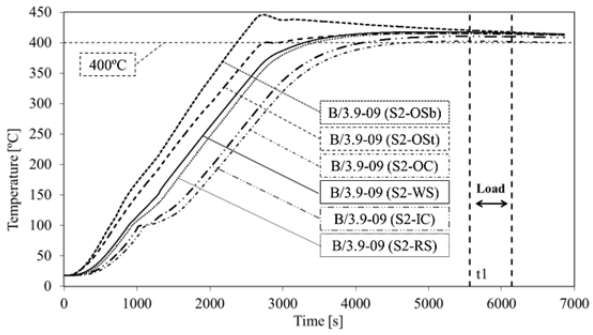


Figura B 249 - Aquecimento da Secção S2.

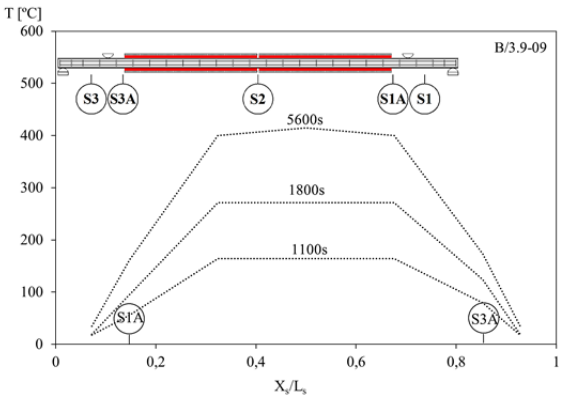


Figura B 250 - Evolução da distribuição de temperatura.

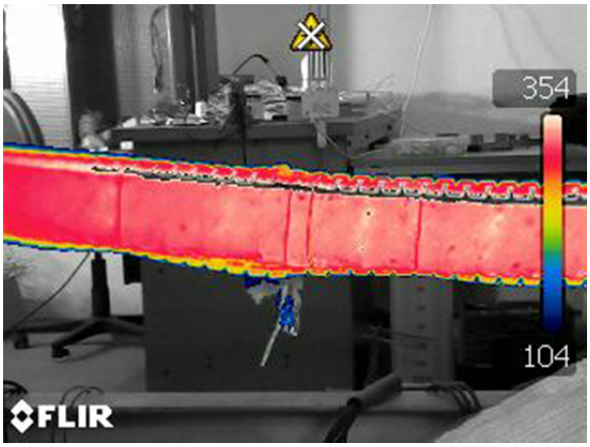


Figura B 251 - Termografia após remoção do isolamento.

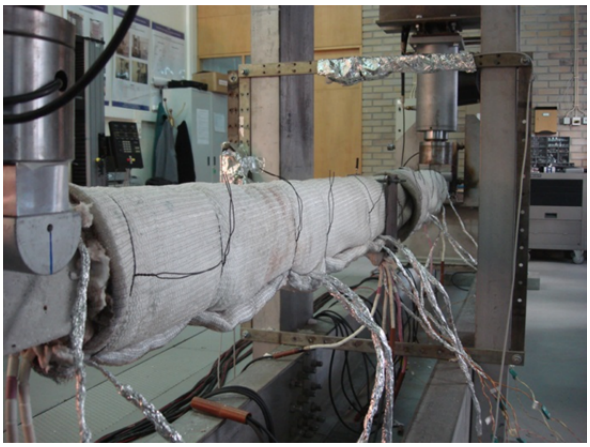


Figura B 252 - Inicio da aplicação da carga.



Figura B 253 - Fim da aplicação da carga.

Tabela B 115 - Observações / Comentários.

Observações / Comentários:
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB).

SÉRIE 9 (ENSAIO - B/3.9-11)

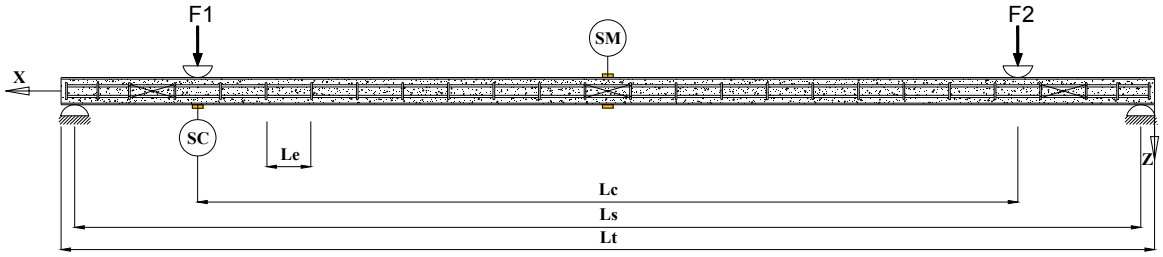


Figura B 254 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

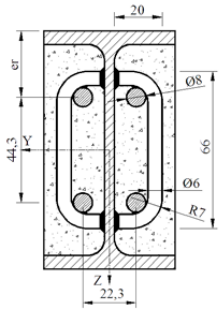


Figura B 255 - Secção da viga.

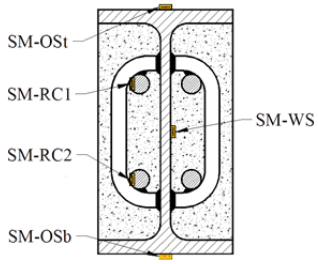


Figura B 256 - Instrumentação da secção SM.

Tabela B 116 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{yk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck,cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 117 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Le [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
4,0	3,9	3,0	0,167	W	Ambiente	2=L/2000

Tabela B 118 - Imperfeições laterais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	3,95
Imperfeições (Y) [mm]	0	0	1	2	1	0	1	1	0

Tabela B 119 - Eventos de carga.

F_p [N]	F_y [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
26500	31600	35428	38718

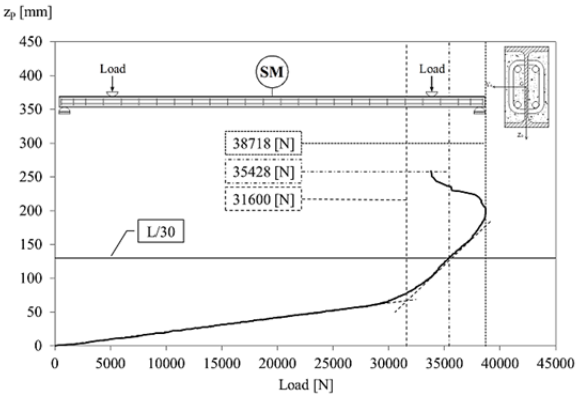


Figura B 257 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

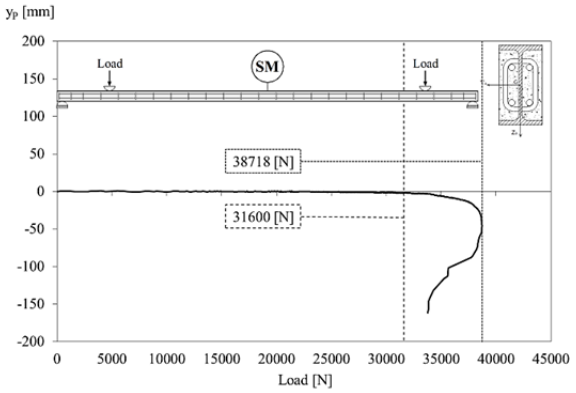


Figura B 258 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

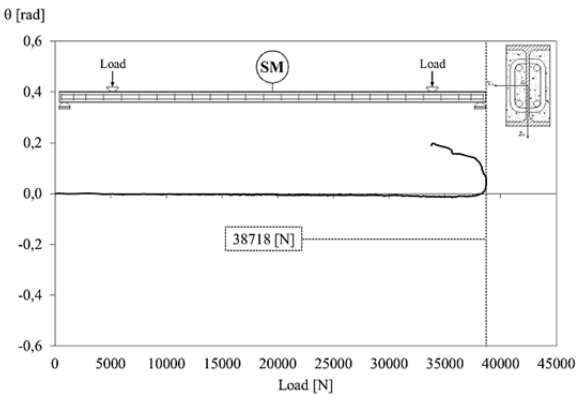


Figura B 259 - Rotação da secção SM.

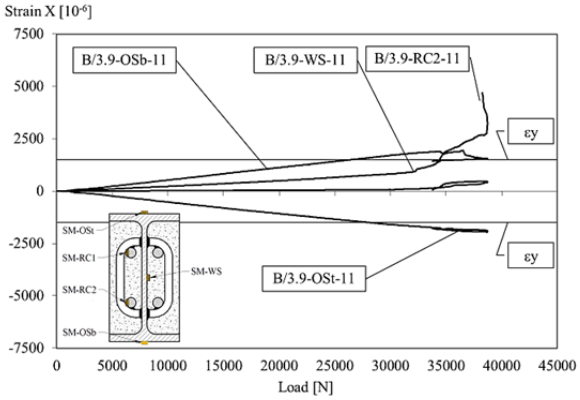


Figura B 260 - Extensometria da Secção SM.

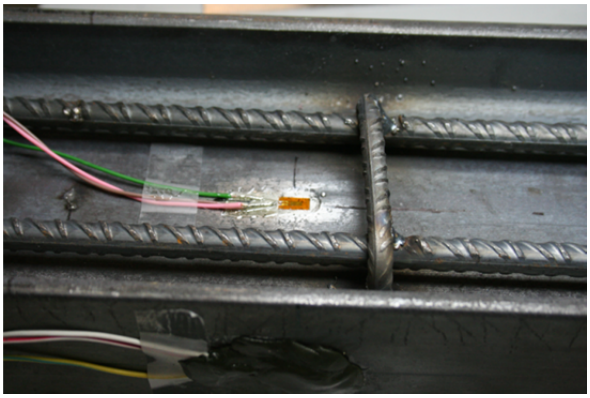


Figura B 261 - Extensometria no IPE.

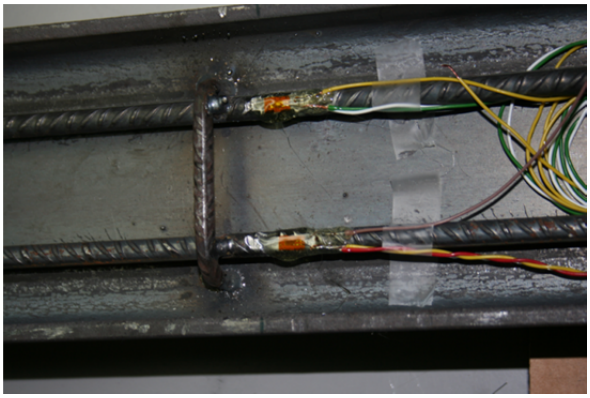


Figura B 262 - Extensometria no reforço.

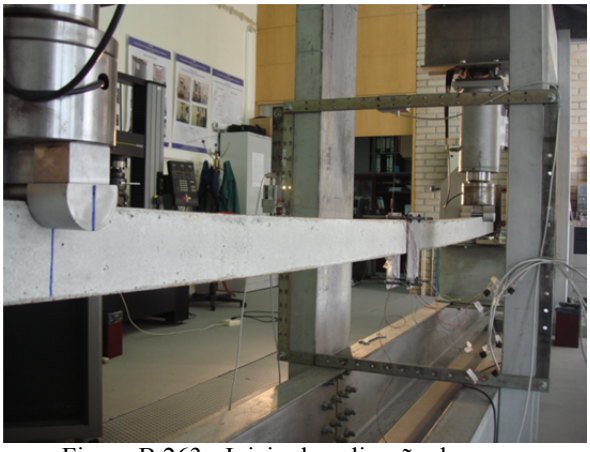


Figura B 263 - Inicio da aplicação da carga.



Figura B 264 - Fim da aplicação da carga.

Tabela B 120 - Observações / Comentários.

Observações / Comentários:
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB).

SÉRIE 9 (ENSAIO - B/3.9-12)

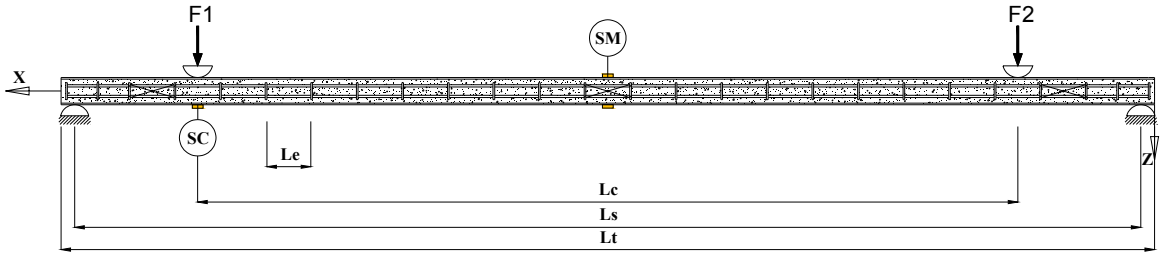


Figura B 265 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

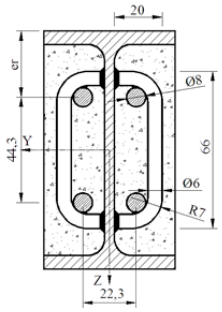


Figura B 266 - Secção da viga.

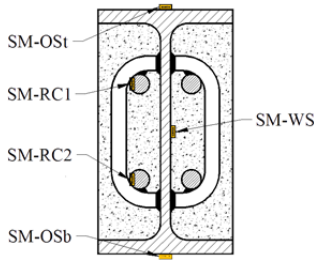


Figura B 267 - Instrumentação da secção SM.

Tabela B 121 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{yk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck,cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 122 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Le [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
4,0	3,9	3,0	0,167	W	Ambiente	5=L/800

Tabela B 123 - Imperfeições lateriais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	3,95
Imperfeições (Y) [mm]	0	3	4	5	5	4	3	1	0

Tabela B 124 - Eventos de carga.

F_p [N]	F_y [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
29020	32100	36161	36380

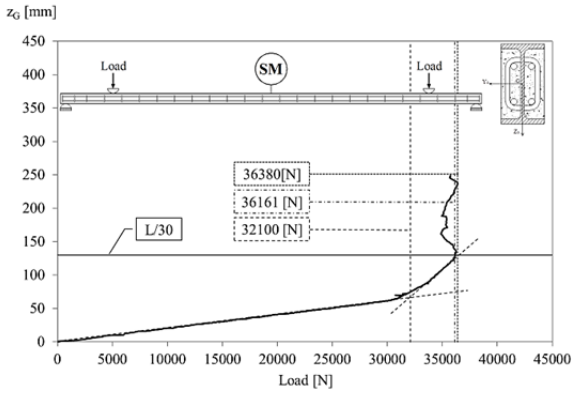


Figura B 268 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

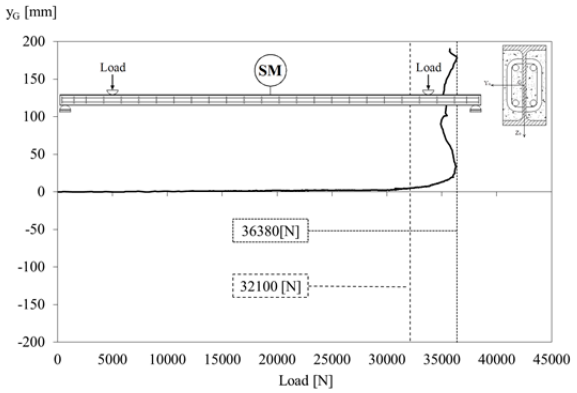


Figura B 269 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

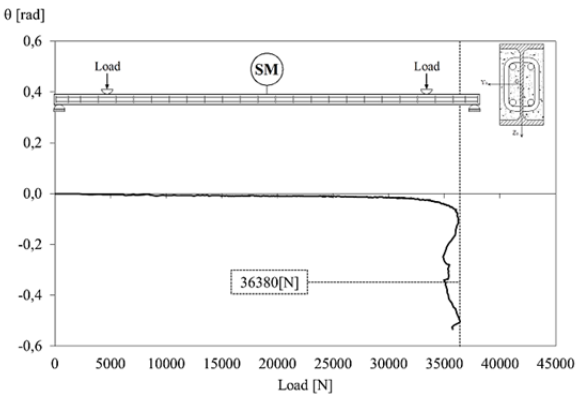


Figura B 270 - Rotação da secção SM.

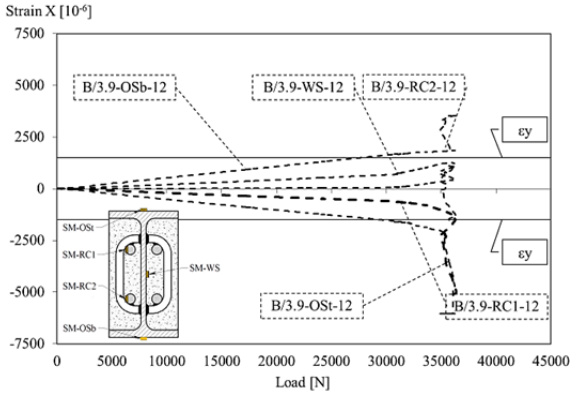


Figura B 271 - Extensometria da Secção SM.

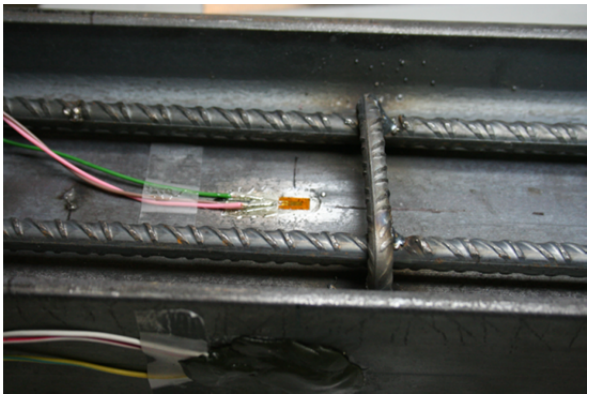


Figura B 272 - Extensometria no IPE.

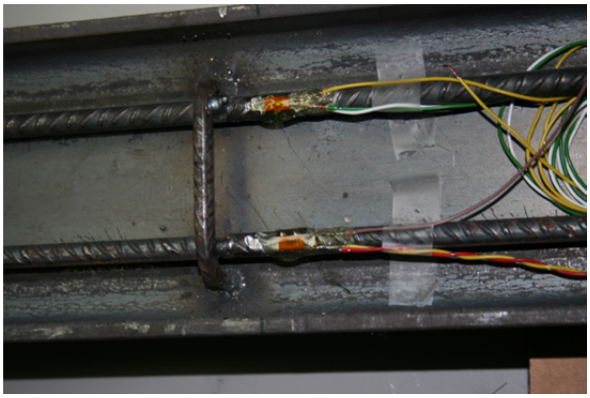


Figura B 273 - Extensometria no reforço.

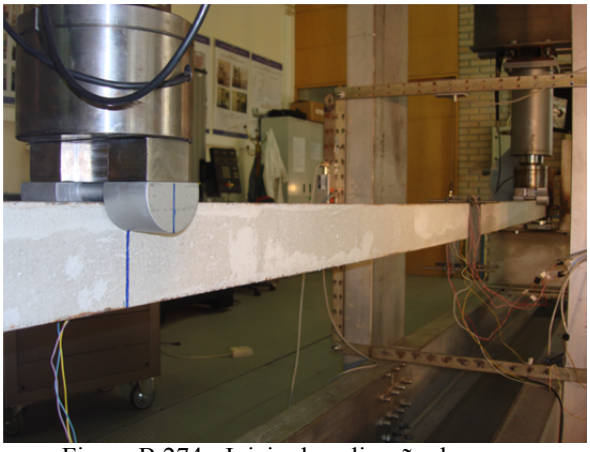


Figura B 274 - Inicio da aplicação da carga.

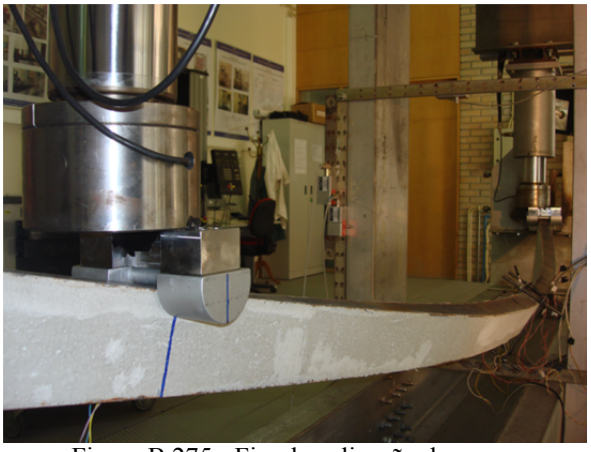


Figura B 275 - Fim da aplicação da carga.

Tabela B 125 - Observações / Comentários.

Observações / Comentários:
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB).

SÉRIE 10 (ENSAIO - B/3.9-11A)

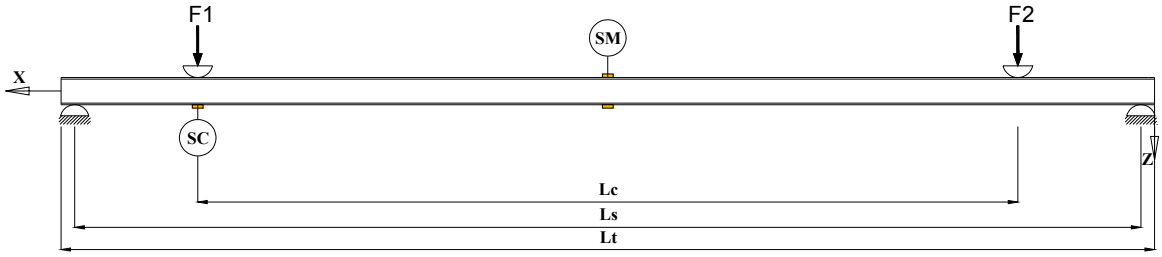


Figura B 276 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

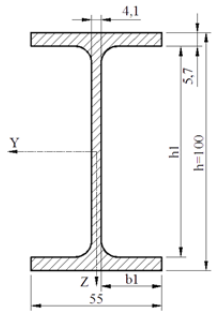


Figura B 277 - Secção da viga.

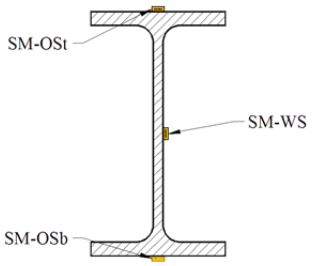


Figura B 278 - Instrumentação da secção SM.

Tabela B 126 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{yk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck,cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 127 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
4,0	3,9	3,0	-	Ambiente	1=L/4000

Tabela B 128 - Imperfeições laterais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	3,95
Imperfeições (Y) [mm]	0	1	0	1	1	0	0	1	0

Tabela B 129 - Eventos de carga.

F_p [N]	F_y [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
-	-	-	19436

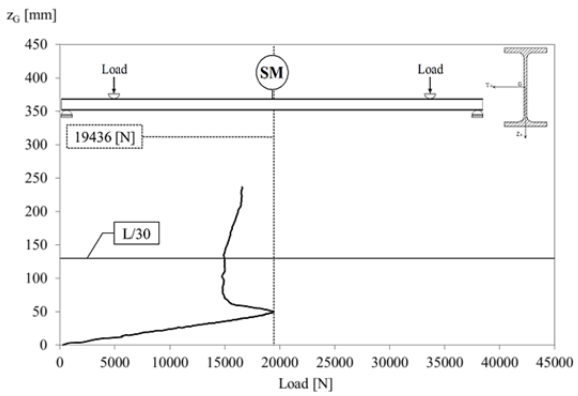


Figura B 279 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

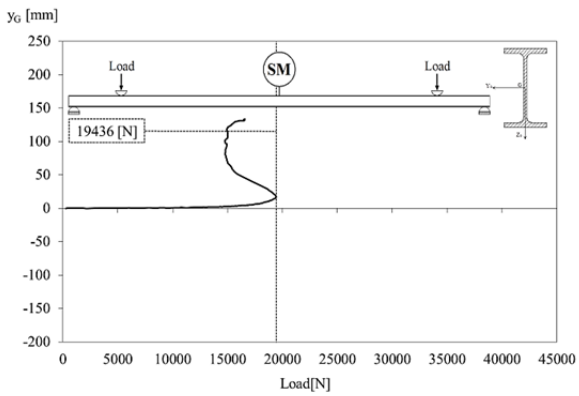


Figura B 280 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

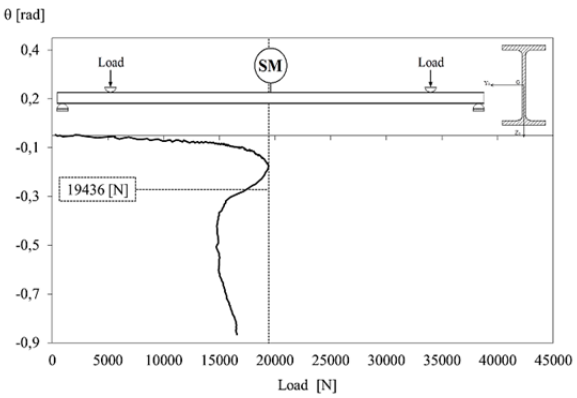


Figura B 281 - Rotação da secção SM.

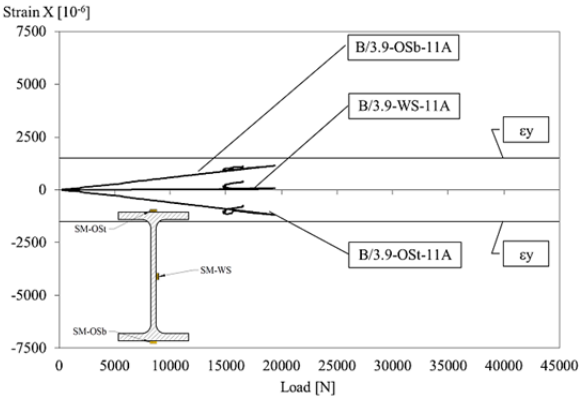


Figura B 282 - Aquecimento da Secção S2.

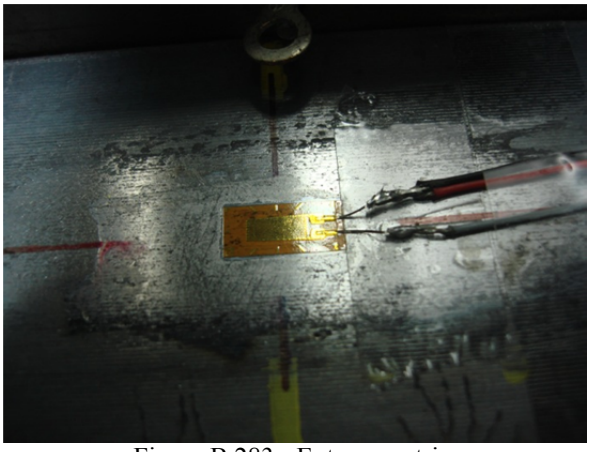


Figura B 283 - Extensometria.

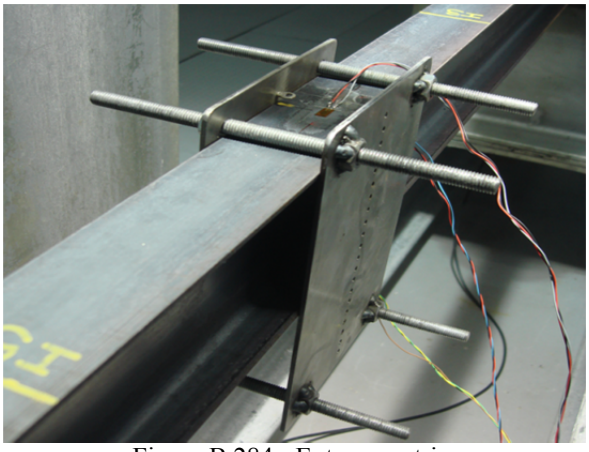


Figura B 284 - Extensometria.

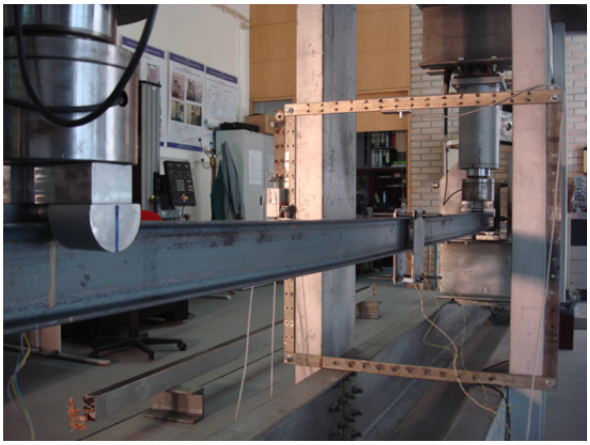


Figura B 285 - Inicio da aplicação da carga.

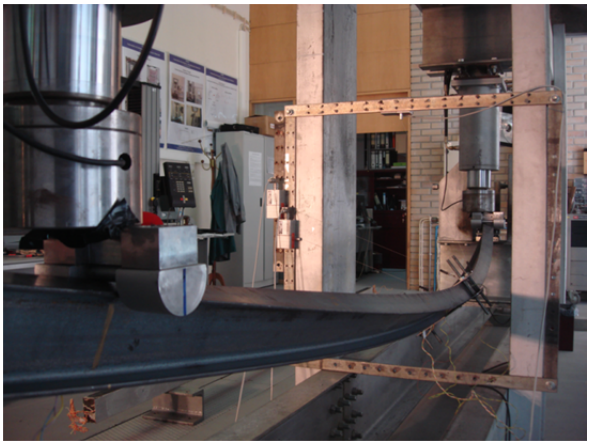


Figura B 286 - Fim da aplicação da carga.

Tabela B 130 - Observações / Comentários.

Observações / Comentários:
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB).

SÉRIE 10 (ENSAIO - B/3.9-12A)

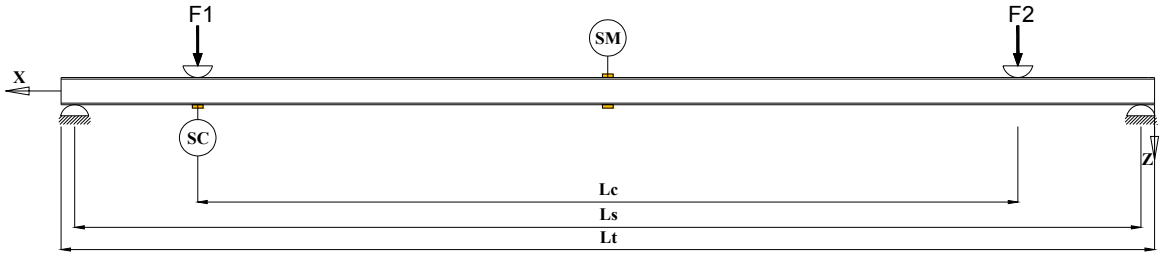


Figura B 287 - Flexão em quatro pontos. Secções principais.

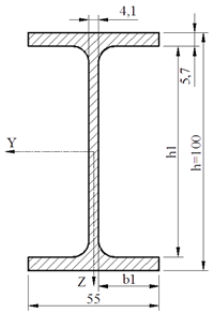


Figura B 288 - Secção da viga.

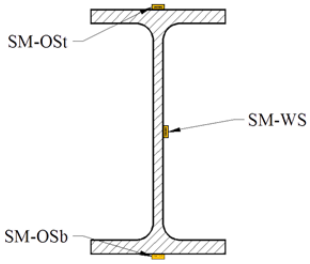


Figura B 289 - Instrumentação da secção SC/SMi.

Tabela B 131 - Propriedades características médias dos materiais (ensaios).

(f_{yk}) [MPa]	(f_{sk}) [MPa]	$f_{ck,cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]
302,47	531,51	21,45	20,36

Tabela B 132 - Características da viga.

Lt [m]	Ls [m]	Lc [m]	Estribos [W/NW]	Temperatura [ºC]	Imp. Máxima [mm]
4,0	3,9	3,0	-	Ambiente	3=L/1333

Tabela B 133 - Imperfeições laterais.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9
Posição (X) [m]	0,05	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	3,95
Imperfeições (Y) [mm]	0	2	3	3	2	2	2	1	0

Tabela B 134 - Eventos de carga.

F_p [N]	F_y [N]	$F_{L/30}$ [N]	F_u [N]
-	-	-	21272

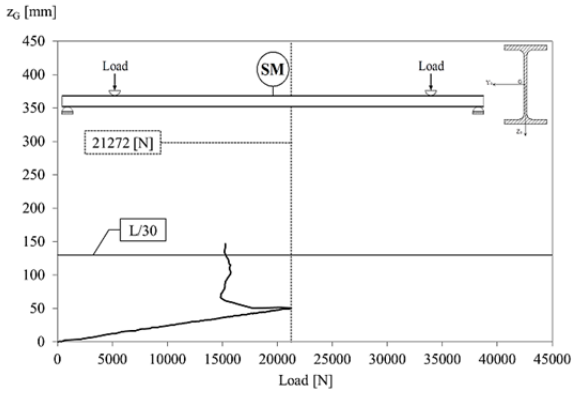


Figura B 290 - Deslocamento vertical Z_G da secção SM.

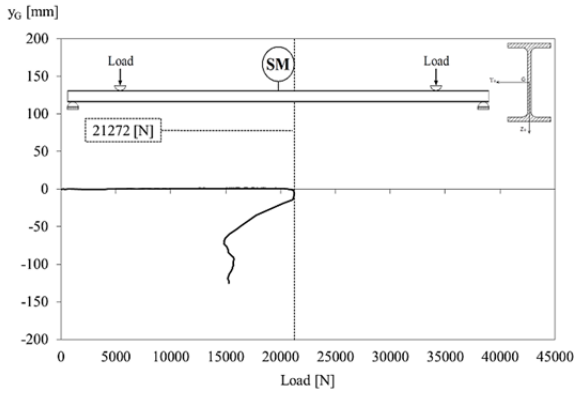


Figura B 291 - Deslocamento lateral Y_G da secção SM.

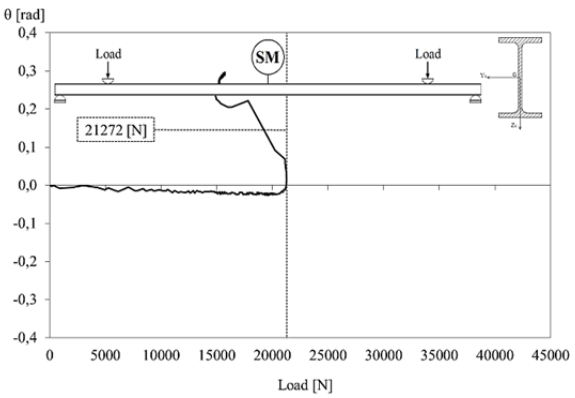


Figura B 292 - Rotação da secção SM.

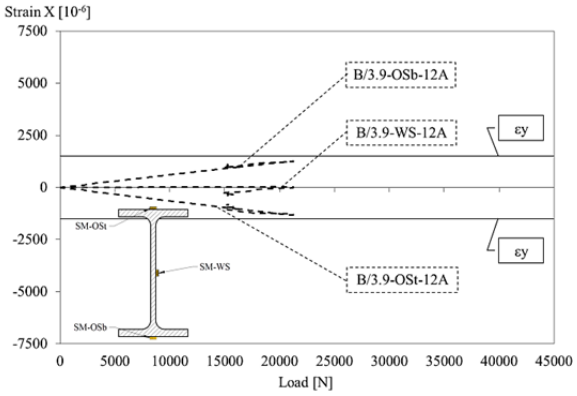


Figura B 293 - Extensometria da Secção SM.

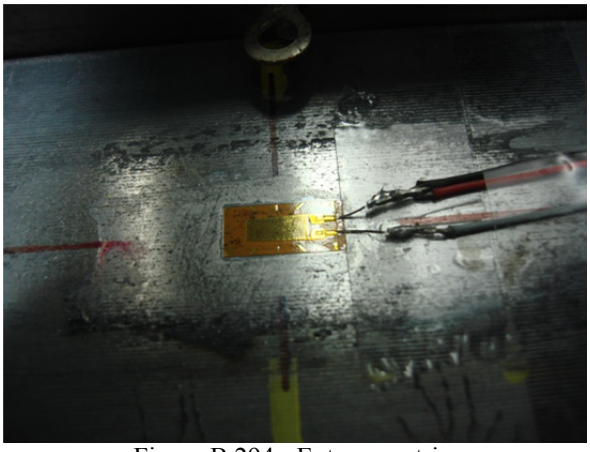


Figura B 294 - Extensometria.

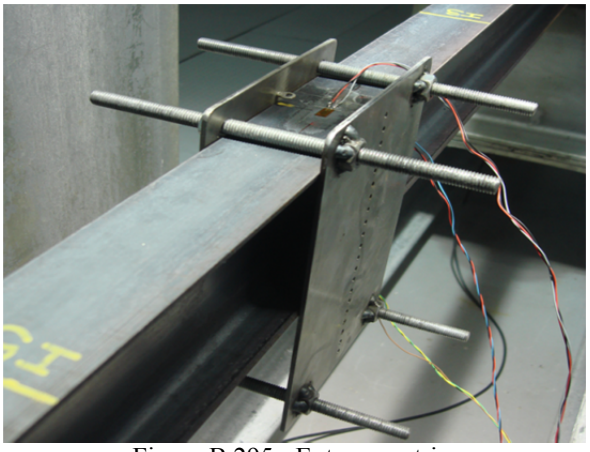


Figura B 295 - Extensometria.



Figura B 296 - Inicio da aplicação da carga.



Figura B 297 - Fim da aplicação da carga.

Tabela B 135 - Observações / Comentários.

Observações / Comentários:
Forma do modo de deformação: Encurvadura lateral torsional (LTB).