



**ESTUDO EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES
APARAFUSADAS AUTOPERFURANTES DE
CHAPAS FINAS A TEMPERATURAS ELEVADAS**

Armandino Moreira Parente

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em:

Engenharia Industrial

Ramo Engenharia Mecânica

Novembro, 2016



**ESTUDO EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES
APARAFUSADAS AUTOPERFURANTES DE CHAPAS
FINAS A TEMPERATURAS ELEVADAS**

Armandino Moreira Parente

Relatório Final da Dissertação apresentado à

ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA E DE GESTÃO

INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA

para obtenção do grau de Mestre em

Engenharia Industrial

Área de Especialização de Engenharia Mecânica

Orientador:

Luis M. R. Mesquita

Novembro, 2016

Dedico este trabalho ao meus pais e irmão.

Agradecimentos

Começo por agradecer ao meu orientador, Prof Doutor Luís Manuel Ribeiro Mesquita pela ajuda fornecida ao longo da realização deste estudo, assim como a disponibilidade a resolução de problemas.

Quero também agradecer a ajuda fornecida à Mestre Luisa Barreira pelo apoio prestando na execução dos ensaios experimentais e ao Mestre Jorge Meireles pelo apoio na conceção do sistema de amarração para os ensaios dos parafusos.

Quero também agradecer aos meus familiares e amigos que direta ou indiretamente incentivaram e motivaram a levar este projeto a bom porto.

Por fim, agradeço à SFS Intec pelo fornecimento dos parafusos autoperfurantes e à Lusosider pelo fornecimento da chapa de aço.

ESTUDO EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES APARAFUSADAS AUTOPERFURANTES DE CHAPAS FINAS A TEMPERATURAS ELEVADAS

por

Armandino Moreira Parente

Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre em:

Engenharia Industrial Ramo Engenharia Mecânica

Realizada sob a supervisão de:

Prof. Doutor Luis Mesquita

Resumo

A aplicação de perfis estruturais de aço enformados a frio na construção metálica, tem um conjunto de vantagens das quais se destacam a elevada eficiência estrutural destes perfis, com uma elevada relação de resistência estrutural em função do peso, a possibilidade de criação rápida de perfis de formas variadas e adaptadas às necessidades, assim como a economia no transporte e a elevada rapidez de execução da obra. O dimensionamento destes elementos estruturais e dos seus elementos de ligação devem ser dimensionados à temperatura ambiente e também numa situação acidental de incêndio, onde o valor de cálculo da resistência da ligação é função da temperatura resultante da sua exposição ao fogo.

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre o efeito da ação da temperatura nas ligações aparafusadas de chapas de aço utilizadas na produção dos perfis enformados a frio.

Foram efetuados ensaios de tração aos parafusos SFS SD6-H15 Ø5,5 x 22 [mm] para varias temperaturas com o objetivo de se estudar o comportamento do aço e a sua resistência. A temperatura foi aplicada recorrendo a um forno elétrico resistivo. Dos resultados obtidos foi possível classificar o parafuso como sendo da classe 10.9, segundo a norma ISO898 [1].

As ligações estudadas neste trabalho são ligações simples sujeitas ao corte compostas por duas chapas de aço leve ligadas através de um parafuso autoperfurante. Foram utilizadas chapas das classes SGD 220, SGD 250, SGD 280, SGD320 e SGD350 com espessuras de 0.5 [mm], 1 [mm] e 1.5 [mm]. Os testes compreendem uma análise paramétrica dos

diferentes modos de colapso da ligação para os diferentes níveis de temperatura, classe de resistência das chapas de aço e a influência do efeito de bordo da ligação. Dos ensaios verificou-se que a temperatura é um fator crucial na resistência da ligação.

A comparação dos resultados experimentais com as metodologias de cálculo simplificadas apresentadas nos Eurocódigos permitem concluir que os resultados obtidos pelo Eurocódigo 3 parte 1.3 são demasiado conservativos e os obtidos pelo Eurocódigo 3 parte 1.8 sobredimensionam a resistência da ligação, mostrando-se inseguros.

***Palavras Chave:** Ligações de chapas finas; Parafusos autoperfurantes; Ensaios experimentais; Temperaturas elevadas.*

EXPERIMENTAL STUDY ON SELF-DRILLING SCREW CONNECTIONS OF THIN SHEETS AT HIGH TEMPERATURES

by

Armandino Moreira Parente

Thesis submitted for the fulfilment of Ms.C degree in:

Industrial Engineering branch Mechanical Engineering

Supervised by:

Prof. Doutor Luis Mesquita

Abstract

The application of cold-formed steel structural members in steel construction, has a number of advantages that includes its high structural efficiency of these profiles, elevated structural resistance/weight ratio, possibility of rapid creation of varied shapes and profiles adapted to needs, economy in transportation and high speed of execution of the work. The design of cold-formed sections and their connection elements must be performed at room temperature and also in an accidental fire situation, for which the connection strength design value must be determined at elevated temperatures.

This work presents a study about the effect of elevated temperatures in cold formed steel sheet connections made from self drilling screws.

A set of experimental tensile tests on the screw SFS SD6-H15 Ø5,5 x 22 [mm] is performed at elevated temperatures to determine the screw steel mechanical resistance. The tests were done at different temperature levels, but the one at ambient temperature enable to classify the screw as being of the classe 10.9, as specifies by the standard ISO898.

The study of cold-formed connections presented in this thesis are single connections subject to shear loads. The specimen is composed of two cold-formed steel sheets connected by a self-drilling screw. Different steel grades were used, namely SGD 220, SGD 250, SGD 280, SGD320 and SGD350 with thicknesses varying 0.5 [mm], 1 [mm] and 1.5 [mm]. The set of tests enable to performe and analyse the different collapse modes in function of the

temperature, steel sheet material class, steel sheet thickness and edge effect of the screw position. From the test results it can be verified that the temperature is the main parameter that affects the connection resistance.

Comparing the experimental results with the ones obtained from the simplified calculation method of the Eurocodes, it can be concluded that the ones determined from the Eurocode 3 part 1.3 are conservative and the ones from the Eurocode 3 part 1.8 overestimate the connection resistance, being unsafe.

Keywords: Cold-formed steel sheet; Screwed connections; Elevated temperatures; Experimental tests.

Índice

| | |
|--|-------------|
| AGRADECIMENTOS..... | I |
| RESUMO | III |
| ABSTRACT | V |
| ÍNDICE | VII |
| LISTA DE FIGURAS | IX |
| LISTA DE TABELAS..... | XIII |
| NOMENCLATURA..... | XVII |
| CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO..... | 1 |
| 1.2 APLICAÇÕES EM ESTRUTURAS DE AÇO LEVE..... | 2 |
| 1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE..... | 5 |
| CAPÍTULO 2: ESTADO DA ARTE..... | 7 |
| 2.1 INTRODUÇÃO | 7 |
| 2.2 CARATERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO AÇO | 7 |
| 2.3 CARATERIZAÇÃO DAS LIGAÇÕES | 8 |
| CAPÍTULO 3: MÉTODOS SIMPLIFICADOS DE VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA DAS LIGAÇÕES APARAFUSADAS..... | 11 |
| 3.1 INTRODUÇÃO | 11 |
| 3.2 VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA DE LIGAÇÕES APARAFUSADAS | 11 |
| 3.3 VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA DE LIGAÇÕES APARAFUSADAS AUTOPERFURANTES..... | 15 |
| 3.4 VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA DE LIGAÇÕES APARAFUSADAS A TEMPERATURAS ELEVADAS | 17 |
| CAPÍTULO 4: CARATERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS E MECÂNICAS À TEMPERATURA AMBIENTE E A TEMPERATURAS ELEVADAS..... | 19 |
| 4.1 INTRODUÇÃO | 19 |
| 4.1 VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS COM A TEMPERATURA | 20 |
| 4.1.1 Calor específico | 20 |
| 4.1.2 Conductividade térmica..... | 21 |

| | | |
|--|---|-----|
| 4.2 | VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS COM A TEMPERATURA | 22 |
| 4.2.1 | <i>Coeficiente de dilatação térmica</i> | 25 |
| 4.2.2 | <i>Tensão de cedência</i> | 26 |
| 4.2.3 | <i>Módulo de elasticidade</i> | 28 |
| CAPÍTULO 5: ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DAS LIGAÇÕES APARAFUSADAS 31 | | |
| 5.1 | INTRODUÇÃO..... | 31 |
| 5.2 | CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS PARAFUSOS | 32 |
| 5.2.1 | <i>Instalação experimental dos testes de tração aos parafusos</i> | 32 |
| 5.2.2 | <i>Resultados dos testes de tração aos parafusos</i> | 34 |
| 5.3 | ESTUDO EXPERIMENTAL DAS LIGAÇÕES AUTOPERFURANTES | 38 |
| 5.3.1 | <i>Instalação experimental dos testes das ligações</i> | 40 |
| 5.3.2 | <i>Influência da classe das chapas na resistência da ligação</i> | 43 |
| 5.3.3 | <i>Influência da espessura das chapas na resistência da ligação</i> | 51 |
| 5.3.4 | <i>Influência do efeito de bordo na resistência da ligação</i> | 56 |
| 5.3.5 | <i>Influência da temperatura na resistência da ligação</i> | 63 |
| 5.4 | COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM OS MÉTODOS SIMPLIFICADOS | 73 |
| CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....77 | | |
| 6.1 | CONCLUSÕES GERAIS | 77 |
| 6.2 | LINHAS FUTURAS DE INVESTIGAÇÃO | 79 |
| REFERÊNCIAS.....81 | | |
| ANEXOS.....85 | | |
| A1. | COMUNICAÇÕES APRESENTADAS EM ENCONTROS CIENTÍFICOS NACIONAIS E INTERNACIONAIS 87 | |
| A2. | PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO DAS CHAPAS | 89 |
| A3. | GRÁFICOS DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA RESISTÊNCIA DAS LIGAÇÕES | 91 |
| A4. | RESULTADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS DADOS PELOS MÉTODOS SIMPLIFICADOS | 113 |
| A5. | DESENHOS TÉCNICOS | 121 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1- Utilização de elementos de aço leve na construção de um a nave industrial [2]. | 2 |
| Figura 2- Moradia construída em aço enformado a frio [3]. | 2 |
| Figura 3- Pormenor dos sistemas de fixação mecânicos utilizados na construção em aço leve [3]. | 3 |
| Figura 4- Colocação de rede de tubagens [3]. | 3 |
| Figura 5- Aplicação do isolamento térmico e acústico [5]. | 4 |
| Figura 6- Exemplos de perfis enformados a frio [6]. | 4 |
| Figura 7- Utilização de elementos de aço leve na reabilitação de edifícios [3]. | 5 |
| Figura 8- Utilização de elementos de aço leva na construção de coberturas [3]. | 5 |
| Figura 9- Esquema de furação para a ligação. | 14 |
| Figura 10- Representação gráfica da variação do calor específico em função da temperatura. | 21 |
| Figura 11- Representação gráfica da variação da condutividade térmica do aço com a temperatura. | 22 |
| Figura 12- Representação Gráfica da relação tensão versus deformação do aço a temperaturas elevadas, [19]. | 23 |
| Figura 13- Representação gráfica da variação do coeficiente de dilatação térmica com a temperatura. | 26 |
| Figura 14- Representação dos fatores de redução da tensão de cedência para o aço. | 27 |
| Figura 15- Representação gráfica da variação do fator de redução do módulo de elasticidade com a temperatura. | 28 |
| Figura 16- Instalação experimental para os ensaios de tração dos parafusos. | 32 |
| Figura 17- Parafusos SFS SD6-H15 Ø5,5 x 22 [mm] após maquinagem. | 33 |

| | |
|--|----|
| Figura 18- Desenho de definição do provete dos parafusos..... | 33 |
| Figura 19- Instalação experimental. a) Modelo CAD. b) Instalação no início do teste experimental. c) Componentes do teste experimental após o ensaio. | 34 |
| Figura 20- Gráficos obtidos para a carga aplicada versus deslocamento para as diversas temperaturas: a) 20°C; b) 200; c) 400; d) 500; e) 600; f) 800. | 35 |
| Figura 21- Gráfico carga versus deslocamentos de todos os provetes para as temperaturas de 20, 200 e 400 [°C]. | 36 |
| Figura 22- Gráfico carga versus deslocamentos de todos os provetes para as temperaturas de 500, 600 e 800 [°C]. | 36 |
| Figura 23- Comparação do coeficiente de redução dos parafusos fornecidos pelo Eurocódigo ($k_{b,\theta}$) e os resultados experimentais ($k_{u,\theta,Exp}$). | 38 |
| Figura 24- Modos de rotura: a) Modo de rotura por corte (SFM), b) Modo de rotura esmagamento (BFM), c) Modo de rotura por arrancamento e rotação do parafuso (TFM). | 40 |
| Figura 25- Instalação experimental para ensaio de ligações aparafusadas. | 41 |
| Figura 26- Unidade de controlo da temperatura no forno. | 41 |
| Figura 27- Definição do limite da resistência da ligação, [24]. | 42 |
| Figura 28- Sistema de acoplamento do extensómetro mecânico no exterior do forno. | 42 |
| Figura 29- Geometria do provete utilizado com diferentes distâncias e_1 , distâncias em [mm] | 43 |
| Figura 30- Gráfico de resultados dos provetes com diferentes tipos de chapas, com espessura 0.5 [mm] e diferentes distâncias de bordo da furação a 20 [°C]. | 44 |
| Figura 31- Gráfico de resultados dos provetes com diferentes tipos de chapas, com espessura 1 [mm] e diferentes distâncias de bordo da furação a 20 [°C]. | 44 |
| Figura 32- Gráfico de resultados dos provetes com diferentes tipos de chapas, com espessura 0.5 [mm] e diferentes distâncias de bordo da furação a 200 [°C]. | 45 |
| Figura 33- Gráfico de resultados dos provetes com diferentes tipos de chapas, com espessura 1 [mm] e diferentes distâncias de bordo da furação a 200 [°C]. | 46 |
| Figura 34- Gráfico de resultados dos provetes com diferentes tipos de chapas, com espessura 0.5 [mm] e diferentes distâncias de bordo da furação a 500 [°C]. | 47 |
| Figura 35- Gráfico de resultados dos provetes com diferentes tipos de chapas, com espessura 1 [mm] e diferentes distâncias de bordo da furação a 500 [°C]. | 47 |
| Figura 36- Gráfico de resultados dos provetes com diferentes tipos de chapas, com espessura 0.5 [mm] e diferentes distâncias de bordo da furação a 800 [°C] | 48 |

| | |
|---|----|
| Figura 37- Gráfico de resultados dos provetes com diferentes tipos de chapas, com espessura 1 [mm] e diferentes distâncias de bordo da furação a 800 [°C]. | 49 |
| Figura 38- Apresentação do modo de rotura após ensaio à temperatura 20 [°C], a) provete 280_05_05_10_T20 (BFM), b) 280_05_05_20_T20 (BFM + TFM). | 50 |
| Figura 39- Apresentação do modo de rotura após ensaio à temperatura 500 [°C], a) provete 280_05_05_10_T500 (BFM), b) 280_05_05_20_T500 (BFM + TFM). | 50 |
| Figura 40- Apresentação do modo de rotura após ensaio à temperatura 500 [°C], a) provete 280_05_05_10_T800 (BFM), b) 280_05_05_20_T800 (BFM + TFM). | 50 |
| Figura 41- Gráficos força versus deslocamento dos provetes com diferentes espessuras de chapa para a temperatura de 20 [°C]. | 51 |
| Figura 42- Gráficos força versus deslocamento dos provetes com diferentes espessuras de chapa para a temperatura de 200 [°C]. | 52 |
| Figura 43- Gráficos força versus deslocamento dos provetes com diferentes espessuras de chapa para a temperatura de 500 [°C]. | 53 |
| Figura 44- Gráficos força versus deslocamento dos provetes com diferentes espessuras de chapa para a temperatura de 800 [°C]. | 53 |
| Figura 45- Apresentação do modo de rotura após ensaio à temperatura 20 [°C], a) provete 280_10_10_10_T20 (BFM), b) 280_10_10_20_T20 (BFM + TFM). | 55 |
| Figura 46- Apresentação do modo de rotura após ensaio à temperatura 500 [°C], a) provete 280_10_10_10_T500 (BFM), b) 280_10_10_20_T500 (BFM + TFM). | 55 |
| Figura 47- Apresentação do modo de rotura após ensaio à temperatura 500 [°C], a) provete 280_10_10_10_T800 (BFM), b) 280_10_10_20_T800 (BFM + TFM). | 55 |
| Figura 48- Gráficos de resultados dos provetes com referência 250_10_10 com diferentes distâncias e_l para as temperaturas de 20, 400, 600 e 800 [°C]. | 56 |
| Figura 49- Gráficos de resultados dos provetes com referência 280_10_10 com diferentes distâncias e_l para as temperaturas de 20, 400, 600 e 800 [°C]. | 58 |
| Figura 50- Gráficos de resultados dos provetes com referência 350_10_10 com diferentes distâncias e_l para as temperaturas de 20, 400, 600 e 800 [°C]. | 59 |
| Figura 51- Apresentação do modo de rotura após ensaio à temperatura 200 [°C], a) provete 350_10_10_10_T200 (BFM), b) 350_10_10_15_T200 (BFM + TFM), c) 350_10_10_20_T200 (BFM + TFM). | 60 |
| Figura 52- Apresentação do modo de rotura após ensaio à temperatura 800 [°C], a) provete 350_10_10_10_T800 (BFM), b) 350_10_10_15_T800 (BFM + TFM), c) 350_10_10_20_T800 (BFM + TFM). | 61 |
| Figura 53- Gráficos de resultados dos provetes com referência 280_05_10 com diferentes distâncias e_l para as temperaturas de 20, 400, 600 e 800 [°C]. | 62 |

| | |
|--|----|
| Figura 54- Apresentação do modo de rotura após ensaio à temperatura 800 [°C], a) provete 280_05_10_10_T800 (BFM), b) 280_05_10_15_T800 (BFM + TFM), c) 280_05_10_20_T800 (BFM + TFM)..... | 63 |
| Figura 55- Gráficos de resultados dos provetes com referência 280_05_05_10 e 280_05_05_20 com distâncias e_l igual a 10 e 20 [mm] para as temperaturas de 20, 200, 400, 600, 500 e 800 [°C]..... | 64 |
| Figura 56- Gráficos de resultados dos provetes com referência 320_05_05_10 e 320_05_05_20 com distâncias e_l igual a 10 e 20 [mm] para as temperaturas de 20, 200, 400, 600, 500 e 800 [°C]..... | 65 |
| Figura 57- Gráficos de resultados dos provetes com referência 280_10_10_10 e 280_10_10_20 com distâncias e_l igual a 10 e 20 [mm] para as temperaturas de 20, 200, 400, 600, 500 e 800 [°C]..... | 66 |
| Figura 58- Gráficos de resultados dos provetes com referência 350_10_10_10 e 350_10_10_20 com distâncias e_l igual a 10 e 20 [mm] para as temperaturas de 20, 200, 400, 600, 500 e 800 [°C]..... | 67 |
| Figura 59- Gráficos de resultados dos provetes com referência 220_15_15_10 e 220_15_15_20 com distâncias e_l igual a 10 e 20 [mm] para as temperaturas de 20, 200, 400, 600, 500 e 800 [°C]..... | 68 |
| Figura 60- Gráficos de resultados dos provetes com referência 280_05_10_10 e 280_05_10_20 com distâncias e_l igual a 10 e 20 [mm] para as temperaturas de 20, 200, 400, 600, 500 e 800 [°C]..... | 69 |
| Figura 61- Três modos de falha obtidos para o provete 220_15_15_20 para as temperaturas de 20, 400 e 800 [°C] respetivamente, a) TFM + SFM, b) BFM + TFM, c) BFM. | 70 |
| Figura 62- Gráficos do fator de redução para provetes com espessura de chapa de 0.5 [mm] e diferentes classes de chapas e e_l igual a 10 e 20 [mm]. | 71 |
| Figura 63- Gráficos do fator de redução para provetes com espessura de chapa de 1 [mm] e diferentes classes de chapas e e_l igual a 10 e 20 [mm]. | 71 |
| Figura 64- Gráficos do fator de redução para provetes com diferentes espessuras de chapa, iguais classes de chapas e e_l igual a 10 e 20 [mm]. | 72 |
| Figura 65- Comparação entre os valores experimentais e os determinados pelo EC3 à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas para os provetes da classe SGD220 e espessura 1.5 [mm]. | 74 |
| Figura 66- Comparação entre os valores experimentais e os determinados pelo EC3 à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas para os provetes da classe SGD280 e espessura 0.5 [mm]. | 74 |
| Figura 67- Comparação entre os valores experimentais e os determinados pelo EC3 à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas para os provetes da classe SGD350 e espessura 1 [mm]. | 75 |

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1- Valores nominais da tensão de cedência e da tensão última para diferentes classes do parafuso. | 12 |
| Tabela 2- Propriedades mecânicas dos parafusos SFS SD6-H15 Ø5,5 x 22 [mm]..... | 16 |
| Tabela 3- Fatores de redução da resistência para parafusos, [8]. | 17 |
| Tabela 4- Valores do coeficiente de redução da tensão de cedência. | 26 |
| Tabela 5- Valores do coeficiente de redução do Módulo de elasticidade proposto pelo Eurocódigo 3 parte 1.2..... | 29 |
| Tabela 6- Tabela de resultados dos ensaios de tração dos parafusos autoperfurantes. | 37 |
| Tabela 7- Valor médio dos resultados dos ensaios de tração dos parafusos autoperfurantes. | 37 |
| Tabela 8- Dados dos provetes utilizados nos ensaios experimentais para cada temperatura. | 40 |
| Tabela 9- Resultados da carga máxima [kN] antes de se obter 3 [mm] de deslocamento e para o deslocamento de 3 [mm] dos ensaios a 20 [°C]. | 45 |
| Tabela 10- Resultados da carga máxima [kN] antes de se obter 3 [mm] de deslocamento e para o deslocamento de 3 [mm] dos ensaios a 200 [°C]. | 46 |
| Tabela 11- Resultados da carga máxima [kN] antes de se obter 3 [mm] de deslocamento e para o deslocamento de 3 [mm] dos ensaios a 500 [°C] | 48 |
| Tabela 12- Resultados da carga máxima [kN] antes de se obter 3 [mm] de deslocamento e para o deslocamento de 3 [mm] dos ensaios a 800 [°C]. | 49 |
| Tabela 13- Resultados da carga máxima [kN] antes de se obter 3 [mm] de deslocamento e para o deslocamento de 3 [mm] para os provetes de diferentes espessuras a 20 [°C]..... | 52 |
| Tabela 14- Resultados da carga máxima [kN] antes de se obter 3 [mm] de deslocamento e para o deslocamento de 3 [mm] para os provetes de diferentes espessuras a 200 [°C]..... | 52 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 15- Resultados da carga máxima [kN] antes de se obter 3 [mm] de deslocamento e para o deslocamento de 3 [mm] para os provetes de diferentes espessuras a 500 [°C]. | 53 |
| Tabela 16- Resultados da carga máxima [kN] antes de se obter 3 [mm] de deslocamento e para o deslocamento de 3 [mm] para os provetes de diferentes espessuras a 800 [°C]. | 54 |
| Tabela 17- Tabela de resultados da carga máxima antes de se obter 3 [mm] de deslocamento e para o deslocamento de 3 [mm] para os provetes com referência 250_10_10 a 20, 400, 600 e 800 [°C]. | 57 |
| Tabela 18- Tabela de resultados da carga máxima antes de se obter 3 [mm] de deslocamento e para o deslocamento de 3 [mm] para os provetes com referência 280_10_10 a 20, 400, 600 e 800 [°C]. | 58 |
| Tabela 19- Tabela de resultados da carga máxima [kN] antes de se obter 3 [mm] de deslocamento e para o deslocamento de 3 [mm] para os provetes com referência 350_10_10 a 20, 400, 600 e 800 [°C]. | 59 |
| Tabela 20- Tabela de resultados da carga máxima [kN] antes de se obter 3 [mm] de deslocamento e para o deslocamento de 3 [mm] para os provetes com combinação de espessuras a 20, 400, 600 e 800 [°C]. | 62 |
| Tabela 21- Resultados da carga máxima [kN] antes e para o deslocamento de 3 [mm] dos provetes com espessura de 0,5 [mm] das classes de chapa SGD 280. | 64 |
| Tabela 22- Resultados da carga máxima [kN] antes e para o deslocamento de 3 [mm] dos provetes com espessura de 0,5 [mm] das classes de chapa SGD 320. | 65 |
| Tabela 23- Resultados da carga máxima antes e para o deslocamento de 3 [mm] dos provetes com espessura de 1 [mm] das classes de chapa SGD 280. | 66 |
| Tabela 24- Resultados da carga máxima antes e para o deslocamento de 3 [mm] dos provetes com espessura de 1 [mm] das classes de chapa SGD 350. | 67 |
| Tabela 25- Resultados da carga máxima antes e para o deslocamento de 3 [mm] dos provetes com espessura de 1,5 [mm] da classe de chapa SGD 220. | 68 |
| Tabela 26- Resultados da carga máxima antes e para o deslocamento de 3 [mm] dos provetes com combinação de espessura de chapa de 0.5 e 1 [mm] da classe de chapa SGD 280. | 69 |
| Tabela 27- Resultados obtidos para os provetes da classe de chapa SGD220. | 113 |
| Tabela 28- Resultados obtidos para os provetes da classe de chapa SGD250. | 114 |
| Tabela 29- Resultados obtidos para os provetes da classe de chapa SGD280 e espessura de chapa 0.5 [mm]. | 115 |
| Tabela 30- Resultados obtidos para os provetes da classe de chapa SGD280 e espessura de chapa 1 [mm]. | 116 |

Tabela 31- Resultados obtidos para os provetes da classe de chapa SGD280 com
combinação de espessuras de chapa 0.5 [mm] e 1 [mm]..... 117

Tabela 32- Resultados obtidos para os provetes da classe de chapa SGD320. 118

Tabela 33- Resultados obtidos para os provetes da classe de chapa SGD350 119

Nomenclatura

Letras maiúsculas do alfabeto Latino

| | |
|----------------|---|
| A | Área da secção resistente do parafuso |
| C_a | Calor específico |
| E_a | Módulo de Elasticidade |
| $E_{a,\theta}$ | Módulo de Elasticidade para a temperatura θ |
| $F_{b,Ed}$ | Valor de cálculo da resistência ao esforço transversal do parafuso |
| $F_{b,Rd}$ | Valor de cálculo da resistência ao esmagamento por parafuso |
| $F_{v,Ed}$ | Valor de cálculo da resistência ao esforço transversal por parafuso no estado limite último |
| $F_{v,Rd}$ | Valor de cálculo da resistência ao esforço transversal por parafuso |
| $F_{v,Rk}$ | Valor característico da resistência ao corte para o parafuso autoperfurantes dado pela ETA |
| $F_{n,Rd}$ | Valor de resistência da secção para o tipo de fixação |
| $K_{y,\theta}$ | Fator de redução da tensão de cedência à temperatura θ |
| $K_{E,\theta}$ | Fator de redução para o módulo de elasticidade à temperatura θ |
| $K_{u,\theta}$ | Fator de redução para a tensão de rotura dos parafusos autoperfurantes à temperatura θ |
| $X_{fi,d}$ | Valor de cálculo da propriedade em situação de incêndio |
| X_k | Valor característico da propriedade mecânica à temperatura ambiente |
| $X_{k,\theta}$ | Valor característico das propriedades em situação de incêndio, função da temperatura |

Letras minúsculas do alfabeto latino

| | |
|----------------|---|
| c_a | Calor específico do aço |
| d | Diâmetro nominal do parafuso |
| d_0 | Diâmetro nominal do furo |
| e_2 | Distância para qualquer das peças da ligação, entre o centro do furo (furo de um parafuso) e o bordo adjacente, medido na direção da transmissão do esforço (Figura 9) |
| e_2 | Distância para qualquer das peças da ligação, entre o centro do furo (furo de um parafuso) e o bordo adjacente, medido na direção perpendicular à transmissão do esforço (Figura 9) |
| f_u | Tensão última |
| f_{ub} | Tensão última do parafuso |
| f_y | Tensão de cedência |
| $f_{y,\theta}$ | Tensão de cedência à temperatura θ |
| f_{yb} | Tensão de cedência do parafuso |
| $f_{p,\theta}$ | Tensão limite de proporcionalidade à temperatura θ |
| k_1 | Fator que representa a resistência na direção perpendicular à transmissão dos esforços |
| k_θ | Fator de redução do valor da propriedade mecânica em função da temperatura |
| $k_{b,\theta}$ | Fator de redução da resistência para os parafusos em função da temperatura |
| t | Espessura da chapa mais fina |
| t_1 | Espessura da chapa mais espessa |

Letras maiúsculas do alfabeto grego

θ_a Temperatura do aço

Letras minúsculas do alfabeto grego

α_b Fator de resistência ao esmagamento

α_c Coeficiente de transferência de calor por convecção

α_v Fator alusivo da classe.

γ_{M2} Coeficiente parcial de segurança para os parafusos

$\gamma_{M,fi}$ Fator parcial de segurança para a propriedade do material em causa na situação de incêndio

λ_a Variação da condutividade térmica

ε Deformação

$\varepsilon_{t,\theta}$ Deformação limite do aço para a tensão de cedência à temperatura θ

$\varepsilon_{u,\theta}$ Deformação última do aço, para a temperatura θ

$\varepsilon_{y,\theta}$ Deformação de cedência do aço, à temperatura θ

$\sigma_{a,\theta}$ Tensão no aço para a temperatura θ

Capítulo 1: Introdução

1.1 Contexto e motivação

Com a evolução da sociedade surge a necessidade de evolução de tudo o que a rodeia, como tal setor da construção também sofre desta evolução onde se procura desde sempre uma forma de construção rápida, fácil, com elevada resistência e economicamente viável.

Diversas técnicas de construção têm vindo a mostrar resultados neste sentido, contudo, a técnica que mais tem contribuído para este tipo de construção, é a construção recorrendo a estruturas de aço enformado a frio, também designada de construção em aço leve. Estes tipos de elementos são obtidos essencialmente por dobragem a frio de chapas finas e apresentam secções transversais de parede fina que torna estes elementos mais leves e mais fáceis de transportar. Além desta vantagem apresentam uma elevada relação de resistência em função do seu peso, assim como a possibilidade de produzir de forma rápida perfis adequados às necessidades da aplicação. A utilização destes é recorrente em estruturas de pequeno porte tais como habitações familiares e ainda em construções de médio porte como é o caso de pavilhões industriais entre outras aplicações.

Tendo em consideração que este tipo de construção é composta por diversos elementos como se de um puzzle se tratasse, são necessários sistemas de ligação capazes de fornecer rigidez e estabilidade há estrutura que se pretende construir. Uma vez que os elementos utilizados são perfis de chapa fina, as ligações são feitas recorrendo a parafusos autoroscantes e autoperfurantes, como tal é necessário dimensionar quer os elementos de ligação, quer os elementos das estruturas.

Desta forma torna-se imperativo conhecer o comportamento deste tipo de elementos quando sujeitos a ações mecânicas, à temperatura ambiente ou a temperaturas elevadas como é o caso das resultantes da ação de incêndios, assim como o valor da resistência das ligações em função da temperatura a que estas estão sujeitas.

1.2 Aplicações em estruturas de aço leve

A aplicação de elementos em aço leve (LSF) na construção teve origem nos Estados Unidos e hoje em dia é um processo cada vez mais recorrente na construção de edifícios quer industriais (Figura 1) como habitacionais (Figura 2).



Figura 1- Utilização de elementos de aço leve na construção de uma nave industrial [2].



Figura 2- Moradia construída em aço enformado a frio [3].

Este tipo de processo de construção apresenta incontestáveis vantagens quando comparado com os métodos tradicionais sendo elas: Rapidez de execução; Redução de custos; Versatilidade; Manutenção; Segurança; Conforto.

O facto de os materiais serem de baixo peso é um ponto de partida para o aumento da rapidez de execução assim como a utilização de sistemas de fixação mecânicos (Figura 3) em detrimento da aplicação de cimentos, argamassa ou qualquer outro tipo de solução de alvenaria. O facto de não ser utilizado alvenaria facilita também a colocação de qualquer tubagem e rede eléctrica, de comunicação ou redes estorturadas de dados (Figura 4).



Figura 3- Pormenor dos sistemas de fixação mecânicos utilizados na construção em aço leve [3].



Figura 4- Colocação de rede de tubagens [3].

A vantagem da utilização dos sistemas de aço leve reside na redução de pessoal necessário para a execução da obra, no entanto, são necessários profissionais especializados e experientes, o que representa custos de mão de obra unitários superiores. No entanto o rendimento dos mesmos é superior à média quando comparado com os restantes trabalhadores da construção civil, resultando na redução do valor dos custos de pessoal e a consequente diminuição do custo final [4].

Outro fator que influencia a redução do custo final é o facto de ser possível construir paredes e secções de pisos e telhados em estaleiro, reduzindo o desperdício de material uma vez que os elementos são fabricados segundo as dimensões necessárias.

A utilização deste tipo de construção deve-se essencialmente à sua versatilidade de construção e montagem aliada às variadas formas de secções disponíveis o que proporciona uma fácil adaptação a diferentes tipos de construção mantendo as suas características de resistência.

Também é importante referir que este tipo de edifícios construídos em aço leve apresenta baixos custos de manutenção devido à utilização de rebocos e tintas de elevada resistência, eliminando-se assim as fissuras nas paredes. O tipo de tubagem utilizado neste modo de construção é também um fator positivo, tendo em conta que garante o uso frequente durante décadas sem ser necessário manutenção. No que se refere ao conforto, as construções em aço leve destacam-se por apresentarem bons isolamentos térmicos e acústicos, proporcionando ainda um excelente equilíbrio da humidade ambiente, Figura 5.



Figura 5- Aplicação do isolamento térmico e acústico [5].

Os tipos de elementos estruturais mais utilizados neste género de construções são essencialmente divididos em dois grandes grupos: os perfis e as chapas. Dentro do grupo das chapas é ainda possível definir dois tipos de elementos, sendo eles painéis de chapa e chapas perfiladas. Devido a esta grande variedade, atualmente é possível contruir uma grande quantidade de estruturas apenas recorrendo a este tipo de elementos.

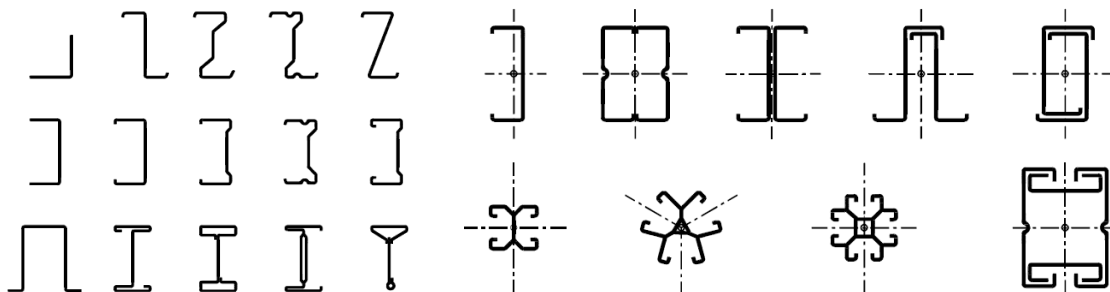


Figura 6- Exemplos de perfis enformados a frio [6].

Este tipo de construção é normalmente utilizado para a construção de coberturas (Figura 8), edifícios habitacionais (Figura 2), industriais (Figura 1) e ainda recuperação e reabilitação de edifícios (Figura 7).

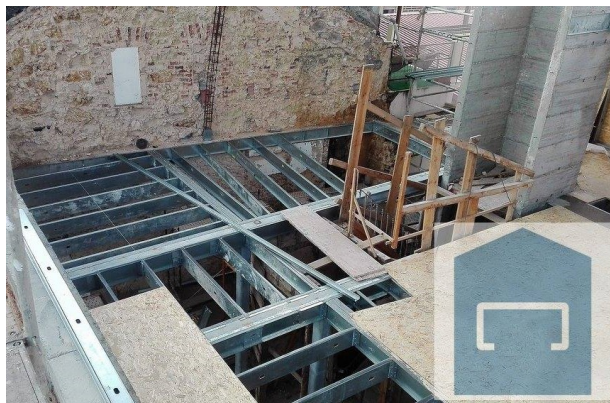


Figura 7- Utilização de elementos de aço leve na reabilitação de edifícios [3].



Figura 8- Utilização de elementos de aço leve na construção de coberturas [3].

1.3 Organização da tese

A presente tese encontra-se dividida em seis capítulos, no capítulo 1 é feita uma introdução ao tema abordado ao longo da tese.

No capítulo 2 é feita uma breve abordagem ao comportamento das estruturas em aço leve submetidas à ação de fogo considerando os estudos experimentais realizados por vários autores.

No capítulo 3 são apresentados os métodos simplificados de verificação de segurança das ligações aparafusadas. É apresentado o método para dimensionamento de ligações aparafusadas presente no Eurocódigo 3 parte 1-8 onde se classifica o tipo de ligação e a classe dos parafusos. Apresenta-se também regras adicionais de verificação de segurança para ligações aparafusadas aplicadas a chapas finas, parte 1-3 do Eurocódigo 3, [6]. Por fim é também apresentada a metodologia de cálculo, utilizada na verificação de segurança de ligações aparafusadas a temperaturas elevadas presente no anexo D do Eurocódigo 3 parte 1-2, assim como os coeficientes de redução da resistência dos parafusos.

No capítulo 4 é feita a caracterização das propriedades térmicas e mecânicas do aço quando submetido a elevadas temperaturas. É possível verificar a diminuição da resistência mecânica com o aumento da temperatura

No capítulo 5 é apresentada a instalação experimental utilizada nos ensaios dos parafusos e nos ensaios das ligações aparafusadas e descritas as etapas percorridas para realizar os ensaios experimentais de resistência das ligações. Por fim são apresentados os

resultados experimentais da resistência dos parafusos, assim como o comportamento das ligações a temperaturas elevadas.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões finais sobre todo o estudo desenvolvido e ainda algumas sugestões para linhas futuras de investigação.

Capítulo 2: Estado da arte

2.1 Introdução

A corrente necessidade de assegurar a resistência de qualquer tipo de construção em situações de incêndio obriga à realização de diversos trabalhos de investigação. Neste sentido é necessário conhecer o comportamento dos materiais utilizados, à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas. Considerando que neste estudo o material em análise é o aço é igualmente importante conhecer o comportamento das ligações utilizadas na construção com este tipo de material.

O estudo ao nível do comportamento do aço é atualmente vasto, porém a informação a nível das estruturas produzidas em LSF não é tão alargada o que leva este estudo a focar-se no comportamento de ligações metálicas deste material.

2.2 Caracterização do comportamento do aço

O aço ao carbono é o material metálico mais utilizado essencialmente devido ao facto de ser produzido em grandes quantidades, satisfazendo especificações das suas características precisas. Além disso é possível obtê-los com variadíssimas propriedades mecânicas tais como a ductilidade e tenacidade tornando-se importante identificar e caracterizar as suas características, [7].

Tendo este material as características bem definidas, o seu comportamento pode ser descrito pela variação das suas propriedades, nomeadamente o módulo de elasticidade (E_a), tensão de cedência (f_y) e tensão de rotura (f_u), e pelas propriedades térmicas. Estas propriedades são apresentadas no Eurocódigo 3 parte 1.2, [8], e no Eurocódigo 3 parte 1.1, [9], consideradas como valores característicos.

Kankanamge e Mahendran realizaram uma análise detalhada a todas as propriedades mecânicas do aço, nomeadamente em aço enformado a frio a temperatura elevadas. Abordaram a variação das propriedades mecânicas do aço com o aumento da temperatura, [10].

Lee et al apresentam um estudo de provetes de chapas de aço laminadas a frio com espessuras inferiores a 1 [mm] sujeitos a temperaturas elevadas. Estes concluem que os fatores de redução apresentados pelas normas para aços laminados a quente não são adequados quando aplicados em chapas finas de aço laminado a frio, [11].

Também Knobloch et al analisaram a influência da temperatura, focando-se no nível de velocidade de deformação, como fator importante no comportamento do material, verificando também os fatores de redução fornecidos pelas normas europeias e Americanas. Concluem que a taxa de deformação tem um efeito acentuado sobre a resposta de tensão-deformação e por fim demonstram que os fatores de redução dados pelas normas não refletem a duração de um incêndio e são ligeiramente mais elevados que os resultados observados no teste, [12].

2.3 Caraterização das ligações

Yan e Young realizam testes experimentais acerca do comportamento das ligações autoperfurantes a temperaturas elevadas em regime estacionário, nas quais a carga mecânica é aplicada após a estabilização da temperatura. A carga axial é aplicada lentamente com uma taxa de deformação de 0.15 [mm/min] até atingir a rotura do provete. Os ensaios foram realizados para diferentes níveis de temperatura. Neste estudo além de diferir a temperatura dos ensaios e as espessuras das chapas, foi ainda estudada a influência da combinação de um e dois parafusos em simultâneo com diferentes disposições e ainda parafusos de diâmetros diferentes. Através dos resultados, o autor identificou quatro modos de falha sendo eles: falha por rotura do parafuso, falha por arrancamento da chapa, falha por corte do parafuso e ainda a rotura da secção útil, [13].

Estes autores realizam também estes ensaios em regime transiente, no qual a ligação é sujeita a uma pré-carga mecânica constante e posterior aumento de temperatura a uma taxa constante, [14].

Também Wei Lu et al realizaram um estudo experimental sobre ligações aparafusadas com parafusos autoperfurantes a temperaturas elevadas e à temperatura ambiente. Os ensaios foram realizados para as temperaturas de 20 [°C], 200 [°C], 400 [°C] e 600 [°C]. Após estabilizar a temperatura é aplicado o carregamento mecânico a uma velocidade de 1 [mm/s]. O ensaio a temperaturas elevadas é dado como terminado quando se atinge um deslocamento máximo de 20 [mm], considerando a existência de grandes deslocamentos a altas temperaturas. No caso dos testes a temperatura ambiente o teste é concluído quando se obtém um deslocamento de 15 [mm]. Os resultados mostram a ocorrência de dois tipos de falha: (i) esmagamento das chapas para os ensaios abaixo dos 200 [°C] e (ii) rotura do parafuso para os ensaios de 400°C e 600°C. Para os ensaios a 20°C verificou que apenas 40% da carga aplicada é transferida para o parafuso. Por fim conclui que o fator de redução definido pela norma EN 1993-1-8, para a falha por tensão de corte à temperatura ambiente pode ser mantido. O autor propõe ainda uma revisão nas equações de projeto quando o rácio entre a distância do furo à extremidade e o diâmetro do furo está compreendido entre 1.00-1.75 ($1.00 \leq e_2/d \leq 1.75$), [15].

Os mesmos autores também realizaram um estudo numérico das ligações através do método dos elementos finitos no software Abaqus utilizando análises de solução numérica explícita, [16].

Capítulo 3: Métodos simplificados de verificação de segurança das ligações aparafusadas

3.1 Introdução

Nos últimos anos a crescente exigência dos parâmetros de segurança, refletidos nas diversas normas de dimensionamento, impulsionou o estudo do comportamento dos materiais em condições extremas, nomeadamente em condições de temperaturas elevadas como as provenientes da ação de incêndios.

O dimensionamento das ligações aparafusadas deve ser efetuado à temperatura ambiente e também numa situação accidental de incêndio, no qual é necessário conhecer o valor de cálculo da resistência da ligação em função da temperatura. À temperatura ambiente, as ligações aparafusadas, segundo a EN 1993-1-8, devem verificar os critérios de segurança em relação à sua resistência ao corte e ao esmagamento. Esta metodologia difere da apresentada na EN 1993-1-3, que fornece regras adicionais de cálculo da verificação de segurança de ligações aparafusadas autoperfurantes aplicadas a chapas finas de perfis enformados a frio. A temperaturas elevadas, o anexo D da norma EN 1993-1-2 apresenta a metodologia de cálculo da resistência das ligações ao corte e ao esmagamento das ligações aparafusadas afetando unicamente a resistência à temperatura ambiente de um fator de redução determinado para a temperatura dos parafusos.

3.2 Verificação de segurança de ligações aparafusadas

Na norma europeia EN 1993-1-8, [17], é possível encontrar a metodologia proposta para o correto dimensionamento das ligações aparafusadas à temperatura ambiente.

Numa primeira fase a norma faz uma breve referência à classe dos parafusos, tensão de cedência, f_{yb} , e tensão última, f_{ub} . Estes valores podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1- Valores nominais da tensão de cedência e da tensão última para diferentes classes do parafuso.

| Classe do Parafuso | 4.6 | 4.8 | 5.6 | 5.8 | 6.8 | 8.8 | 10.9 |
|---------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| f_{yb} [Mpa] | 240 | 320 | 300 | 400 | 480 | 640 | 900 |
| f_{ub} [Mpa] | 400 | 400 | 500 | 500 | 600 | 800 | 1000 |

Os valores apresentados devem ser adotados como valores característicos da resistência dos parafusos quando se procede ao dimensionamento de ligações aparafusadas.

O dimensionamento das ligações deve atender às características técnicas do parafuso, mas também à tipologia da ligação. O Eurocódigo 3 parte 1.8 distingue cinco categorias distintas (categoria A, B, C, D e E) agrupadas em dois grupos, ligações ao corte e ligações tracionadas.

Para as ligações ao corte estas devem ser dimensionadas como pertencentes à Categoria A, ligação resistente ao esmagamento, Categoria B, ligação resistente ao escorregamento no estado limite de utilização ou Categoria C, Ligação resistente ao esmagamento no estado limite último. Nas ligações tracionadas são incluídas duas categorias para dimensionamento, Categoria D, ligações não pré-esforçadas e Categoria E, ligações pré-esforçadas, [17].

Tendo em consideração que todos os elementos deste estudo se encontram na Categoria A, apenas será abordado o método de dimensionamento referente a essa categoria.

A Categoria A, começa por limitar o uso a parafusos que estejam compreendidos entre a classe 4.6 e 10.9, não sendo necessário a aplicação de qualquer tipo de pré-esforço ou mesmo características para as superfícies de contacto. As verificações necessárias para validar a segurança deste tipo de ligação são: o valor de cálculo do esforço transversal no estado de limite último deve ser inferior que o valor de cálculo da resistência ao esforço transversal do parafuso ($F_{v,Ed} < F_{v,Rd}$) e o valor de cálculo do esforço transversal no estado de limite último do parafuso deve ser inferior ao valor do cálculo da resistência ao esmagamento do parafuso ($F_{v,Ed} < F_{b,Rd}$).

Para o cálculo da resistência ao esforço transversal do parafuso é utilizada a expressão abaixo representada onde α_v representa o fator associado à classe dos parafusos ($\alpha_v = 0.6$ para classes 4.6, 5.6 e 8.8, $\alpha_v = 0.5$ para classes 4.8, 5.8 e 10.9), caso o plano de corte atravesse a parte não roscada do parafuso assume-se $\alpha_v = 0.6$, f_{ub} representa a tensão de ruptura à tração do parafuso, A representa a área da secção resistente do parafuso e γ_{M2} representa o coeficiente parcial de segurança para as ligações.

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} \quad (1)$$

O valor do cálculo da resistência ao esmagamento do parafuso é determinada através da seguinte expressão:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u (d t)}{\gamma_{M2}} \quad (2)$$

Onde α_b é dado pelo menor dos valores de $\frac{f_{ub}}{f_u}$, α_d ou 1. O valor de α_d deve ser calculado para os parafusos da extremidade e interiores de forma independente pelas seguintes expressões, respetivamente:

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0} \quad (3)$$

$$\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} \quad (4)$$

O fator k_1 representa a resistência na direção perpendicular à transmissão dos esforços e o seu valor é determinado de forma distinta caso se trate de parafusos de extremidade ou interior. Para os parafusos da extremidade o valor a utilizar é o menor dos resultados das equações (5), (6) e do valor de 2.5.

$$2.8 \frac{e_2}{d_0} - 1.7 \quad (5)$$

$$1.4 \frac{p_2}{d_0} - 1.7 \quad (6)$$

No caso dos parafusos interiores k_1 é dado pelo menor valor entre a equação (5) e 2.5.

Os valores referentes aos coeficientes e_1 e e_2 devem ser determinados conforme mostra a Figura 9.

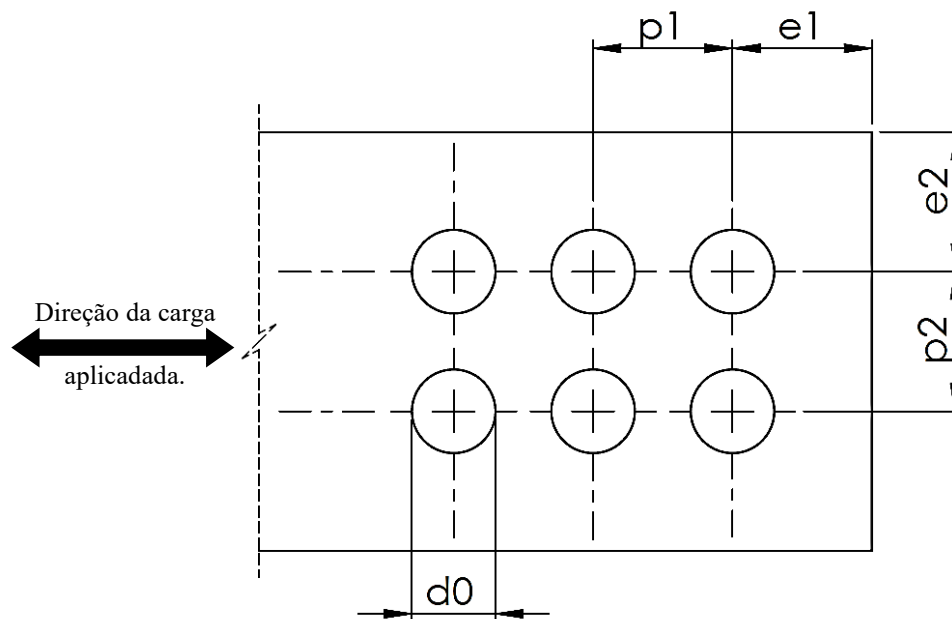


Figura 9- Esquema de furação para a ligação.

Os furos onde são colocados os elementos de ligação representam um fator que reduz a resistência da ligação, uma vez que reduzem a secção transversal e podem levar à rotura da ligação não pelo parafuso, mas pelos elementos que se pretendem ligar.

De forma a contornar o problema da rotura da ligação por redução da área transversal e para fornecer espaço para apertar todos os parafusos necessários é sugerido pelo Eurocódigo 3 parte 1.8 a metodologia adequada para dimensionar o espaçamento entre os furos dos parafusos, assim como outras distâncias consideradas relevantes. Uma vez que no presente estudo não serão utilizadas todas as distâncias nele abordadas apenas far-se-á referência às medidas consideradas importantes.

O valor mínimo para a distância entre o centro do furo e a extremidade adjacente, medida na direção da transmissão do esforço (e_1) e na direção perpendicular da transmissão

do esforço (e_2) são calculados de modo equivalente, multiplicando o diâmetro do furo por um fator 1.2.

A distância mínima entre eixos de cada fileira de parafusos na direção da transmissão do esforço (p_1) é igualmente importante e é obtida multiplicando o diâmetro do furo por um fator de valor 2.2.

Para a distância mínima entre eixos de cada fileira de parafusos na direção perpendicular da transmissão do esforço (p_2), o cálculo é idêntico ao anterior diferindo o fator de multiplicação, 2.4.

No que diz respeito ao diâmetro dos furos, segundo o Eurocódigo 3 parte 1.8 o diâmetro dos furos deve ser superior ao diâmetro dos parafusos para permitir imperfeições e ajustes, desta forma, os furos para parafusos com diâmetro igual ou inferior a 24 [mm] devem se feitos com 2 [mm] de folga, os furos para parafusos com diâmetro superior a 24 [mm] devem ter uma folga de 3 [mm].

3.3 Verificação de segurança de ligações aparafusadas autoperfurantes

A parte 1-3 do Eurocódigo 3, [6], fornece adicionalmente regras de cálculo da verificação de segurança de ligações aparafusadas aplicadas a chapas finas e perfis enformados a frio, aplicadas a parafusos autoperfurantes. Neste caso a resistência ao esmagamento da ligação é determinada pela equação seguinte.

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha f_u (dt)}{\gamma_{M2}} \quad (7)$$

O valor de α é determinado em função da espessura das chapas a ligar seguindo as seguintes expressões:

$$\alpha = 3.2 \sqrt{t/d} \leq 2.1 \quad \text{para } t = t_1 \quad (8)$$

$$\alpha = 3.2 \sqrt{t/d} \leq 2.1 \quad \text{para } t_1 \geq 2.5t \text{ e } t < 1.0mm \quad (9)$$

$$\alpha = 2.1 \quad \text{para } t_1 \geq 2.5t \text{ e } t \geq 1.0mm \quad (10)$$

t representa a espessura da chapa mais fina e t_1 a espessura da chapa mais espessa.

Nos casos não apresentados, α é obtido por interpolação ($t < t_1 < 2.5t$). Adicionalmente é necessário verificar a resistência ao corte do parafuso. Contudo esta parte do Eurocódigo 3 parte 1.3 define que esta resistência é determinada através de ensaios experimentais, dividindo o valor característico da resistência ao corte ($F_{v,Rk}$) pelo fator parcial de segurança. Este valor determinado experimentalmente, no caso de uma ligação composta por um parafuso, está sujeito às condições apresentadas na equação (11).

$$F_{v,Rd} = \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_{M2}} \quad (11)$$

$$F_{v,Rd} \geq 1.2F_{b,Rd} \text{ ou } F_{v,Rd} \geq 1.2F_{n,Rd} \quad (12)$$

É importante referir que os valores experimentais são determinados através de ensaios experimentais realizados pelos fabricantes dos parafusos aquando da certificação do produto e obtenção da marcação CE, baseando-se num documento de aprovação técnica Europeia (ETA). No caso dos parafusos utilizados neste estudo, os valores característicos da resistência ao corte dos parafusos, à temperatura ambiente, são apresentados pela SFS INTEC na ETA-10/0198, [18].

Segundo o fabricante o parafuso de cabeça sextavada, com a referência SFS SD6-H15 Ø5,5 por 22 [mm] é caracterizado com as seguintes propriedades mecânicas:

Tabela 2- Propriedades mecânicas dos parafusos SFS SD6-H15 Ø5,5 x 22 [mm].

| | |
|------------------------------|-------|
| Força de rotura à tração [N] | 15900 |
| Força de rotura ao corte [N] | 10000 |

Estes parafusos são fabricados em aço ao carbono endurecido e galvanizado que confere uma maior resistência à corrosão. É utilizado para ligações de chapas e perfis enformados a frio com o máximo de 6 [mm] de espessura.

3.4 Verificação de segurança de ligações aparafusadas a temperaturas elevadas

Para a situação de temperaturas elevadas o anexo D da norma NP EN 1993-1-2, [8], apresenta a metodologia de cálculo da resistência das ligações ao corte e ao esmagamento dos parafusos a temperaturas elevadas. Não se considera o colapso da secção útil nos furos da ligação, existindo um elemento de ligação, por se considerar que aí a temperatura é inferior. A resistência ao corte e ao esmagamento dos parafusos é determinada pelas equações (13) e (14), nas quais $F_{v,Rd}$ e $F_{b,Rd}$ correspondem à resistência do parafuso à temperatura ambiente.

$$F_{v,t,Rd} = F_{v,Rd} k_{b,\theta} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M,fi}} \quad (13)$$

$$F_{b,t,Rd} = F_{b,Rd} k_{b,\theta} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M,fi}} \quad (14)$$

$k_{b,\theta}$ representa o valor de redução determinado para a temperatura dos parafusos (Tabela 3). Este valor de redução é independente da classe de resistência do parafuso e da resistência das chapas a ligar. Assim a resistência ao esmagamento da ligação a temperaturas elevadas é determinada em função deste parâmetro e da sua resistência à temperatura ambiente.

Tabela 3- Fatores de redução da resistência para parafusos, [8].

| Temperatura θ_a | Fator de redução para parafusos, $k_{b,\theta}$ (tração e corte) |
|---------------------------|---|
| 20 | 1,000 |
| 100 | 0,968 |
| 150 | 0,952 |
| 200 | 0,935 |
| 300 | 0,903 |
| 400 | 0,775 |
| 500 | 0,550 |
| 600 | 0,220 |
| 700 | 0,100 |
| 800 | 0,067 |
| 900 | 0,033 |
| 1000 | 0,000 |

Capítulo 4: Caracterização das propriedades térmicas e mecânicas à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas

4.1 Introdução

A caracterização das propriedades térmicas e mecânicas do aço à temperatura ambiente e para temperaturas elevadas é de grande importância devido ao comportamento estrutural dos elementos. As propriedades térmicas e mecânicas do aço são apresentadas no Eurocódigo 3 parte 1.1 e na parte 1.2, sendo estas consideradas como valores característicos.

Desta forma os valores de cálculo das propriedades para as situações de incêndio devem ser expressas a partir da equação (15).

$$X_{fi,d} = \frac{X_{k,\theta}}{\gamma_{M,fi}} \quad (15)$$

Segundo o Eurocódigo 3 parte 1.2 sempre que a variação de uma propriedade tem efeito desfavorável na resistência estrutural, deve ser determinada através da equação (16) onde $X_{k,\theta}$ representa o valor característico das propriedades para a situação de incêndio em função da temperatura e $\gamma_{M,fi}$ representa o fator parcial de segurança.

$$X_{fi,d} = \gamma_{M,fi} \cdot X_{k,\theta} \quad (16)$$

Para o caso das propriedades mecânicas, $X_{k,\theta}$ é determinado pela seguinte equação (17), onde X_k representa o valor característico da propriedade mecânica para a temperatura ambiente e k_θ refere-se ao fator de redução para a temperatura em análise.

$$X_{k,\theta} = k_{\theta} \cdot X_k \quad (17)$$

4.1 Variação das propriedades térmicas com a temperatura

4.1.1 Calor específico

O calor específico é uma grandeza física utilizada para caracterizar a capacidade térmica dos materiais. Assim o calor específico de um material representa a sua capacidade para armazenar calor ou energia, que quantitativamente, é a energia necessária para elevar em um grau um quilograma de aço, [19].

Como é de esperar o calor específico é das propriedades térmicas do aço cuja variação com a temperatura é mais acentuada. Segundo o Eurocódigo 3 parte 1.2, [8], a variação com a temperatura é dada pela equação (18).

$$\begin{aligned} C_a &= 425 + 0.773\theta_a - 1.69 \times 10^{-3}\theta_a^2 + 2.22 \times 10^{-6}\theta_a^3 & 20 \leq \theta_a \leq 600^\circ C \\ C_a &= 666 + \frac{13002}{(738 - \theta_a)} & 600 \leq \theta_a \leq 735^\circ C \\ C_a &= 545 + \frac{17820}{(\theta_a - 731)} & 735 \leq \theta_a \leq 900^\circ C \\ C_a &= 650 & 900 \leq \theta_a \leq 1200^\circ C \end{aligned} \quad (18)$$

onde θ_a representa a temperatura do aço.

A variação desta propriedade encontra-se representada na Figura 10.

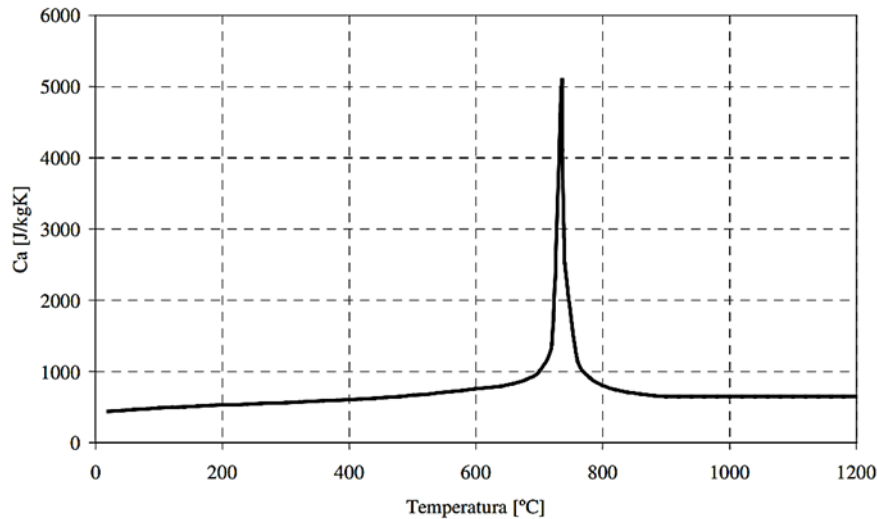


Figura 10- Representação gráfica da variação do calor específico em função da temperatura.

Como é possível verificar no gráfico, a descontinuidade que se verifica para temperaturas próximas de 735 [°C] corresponde à mudança de fase do aço, de ferrite para austenite. Este aumento do calor específico está diretamente associado ao calor latente existente durante esta transformação. Esta propriedade para os elementos estruturais que se encontram pouco solicitados e estejam sujeitos a uma temperatura crítica, esta alteração pode provocar um efeito não desprezável na duração da resistência ao fogo, [20].

4.1.2 Condutividade térmica

Tal como em todos os materiais presentes na superfície terrestre o aço tem capacidade de conduzir calor, esta propriedade denomina-se por condutividade térmica que difere de material para material, estando na lista dos mais condutores os materiais metálicos e na lista dos menos condutores as fibras e as cerâmicas.

A condutividade térmica do aço é elevada, contudo este valor tende a diminuir assim que a temperatura do material aumenta, [20], como é possível verificar na seguinte Figura 11. Segundo o Eurocódigo 3 Parte 1.2 a variação da condutividade térmica deve ser contabilizada, λ_a , em função da temperatura do aço, θ_a , conforme apresentado na equação (19)

$$\begin{aligned} \lambda_a &= 54 - 3.33 \left(\frac{\theta_a}{100} \right) & 20 < \theta_a \leq 800 [^\circ C] \\ \lambda_a &= 27.3 & 800 < \theta_a \leq 1200 [^\circ C] \end{aligned} \quad (19)$$

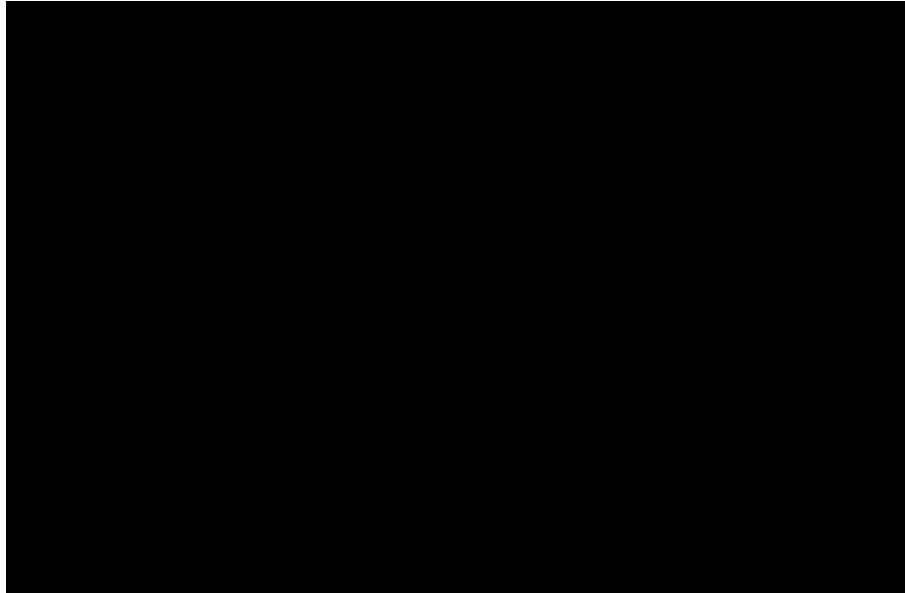


Figura 11- Representação gráfica da variação da condutividade térmica do aço com a temperatura.

Como é possível averiguar a condutividade térmica assume um comportamento monótono decrescente numa primeira fase, assumindo um comportamento constante para valores da temperatura acima do 800°C.

4.2 Variação das propriedades mecânicas com a temperatura

Tomando em consideração que as propriedades mecânicas são os parâmetros mais importantes no dimensionamento de estruturas torna-se importante conhecer todas as propriedades mecânicas, assim como, as suas variações na situação de elevadas temperaturas como é caso de uma potencial situação de incêndio accidental.

Os primeiros modelos utilizados para representar o comportamento do aço em situações de incêndio, utilizavam métodos de cálculo simples, [20], contudo, o comportamento estrutural de estruturas sujeitas ao fogo depende de inúmeras variáveis tais como a degradação das propriedades do material a temperaturas elevadas e a rigidez da estrutura no decorrer do incêndio, [19]. É de notar que os elementos estruturais sujeitos a

temperaturas elevadas provocam grandes deslocamentos e esforços axiais resultantes dos constrangimentos axiais.

O modelo que o Eurocódigo 3 Parte 1.2 sugere, apresenta uma serie de expressões elípticas analíticas que inclui de uma forma implícita a fluência do material nas relações tensão versus deformação. Estas equações foram adotadas dos modelos propostos por Rubert e Schaumann resultantes dos seus ensaios experimentais, [21].

A curva tensão deformação que o Eurocódigo 3 apresenta para o comportamento do aço é apresentada na Figura 12, onde é possível observar quatro fases distintas.

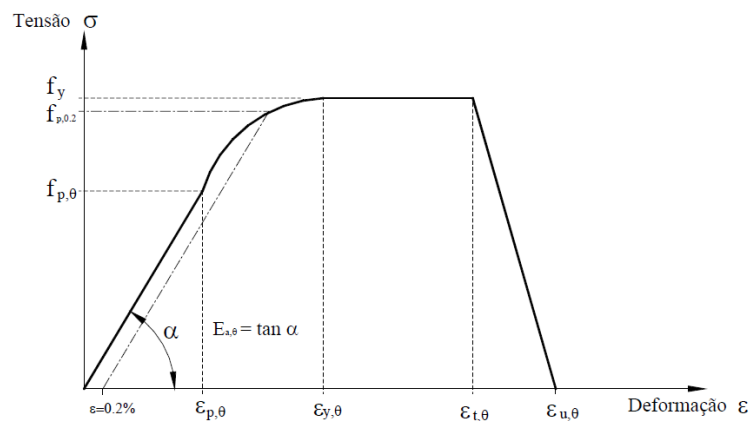


Figura 12- Representação Gráfica da relação tensão versus deformação do aço a temperaturas elevadas, [19].

A primeira fase observada na Figura 12 estabelece o limite elástico garantindo a proporcionalidade entre σ e ε , caracterizada pelo valor de $f_{p,\theta}$, tensão limite de proporcionalidade à temperatura θ e pelo valor E_{θ} que representa o módulo de elasticidade. A relação pode ser expressa pela seguinte equação (20) também denominada por lei de Hooke.

$$\sigma_{a,\theta} = E_{a,\theta} \times \varepsilon \quad (20)$$

A segunda fase da curva tensão versus deformação é caracterizada pelo início da cedência do material (zona de transição), e é convencionalmente referida por tensão de cedência, $f_{y,\theta}$. A relação tensão versus deformação nesta zona da curva é dada pela seguinte equação (21).

$$\sigma_{a,\theta} = f_{p,\theta} - c + \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2} \quad (21)$$

Os valores para as constantes a, b e c são determinados através das seguintes expressões (22), (23) e (24).

$$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) \cdot \left(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + \frac{c}{E_{a,\theta}} \right) \quad (22)$$

$$b^2 = E_{a,\theta} (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) \cdot c + c^2 \quad (23)$$

$$c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{E_{a,\theta} (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})} \quad (24)$$

Esta fase elíptica limitada por $\varepsilon_{y,\theta} = 2\%$. O módulo tangente deverá ser obtido pela expressão (25).

$$E_{a,\theta} = \frac{b(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)}{a \sqrt{a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2}} \quad (25)$$

Na terceira fase é observado um patamar designado por patamar de tensão constante em que é desprezado o endurecimento por deformação. Para temperaturas inferiores a 400 [°C] o Eurocódigo 3 Parte 1.2 estabelece expressões alternativas, incorporando o endurecimento por deformação. Neste caso o patamar é definido por uma tensão máxima dada por $f_{y,\theta}$, dependente da temperatura do aço.

Na quarta e última fase para não se obter uma ductilidade numericamente infinita, adiciona-se uma zona linear decrescente, entre $\varepsilon_{t,\theta} = 15\%$ e $\varepsilon_{u,\theta} = 20\%$ de deformação. Neste caso a tensão pode ser obtida pela seguinte equação (26).

$$\sigma_{a,\theta} = f_{y,\theta} \left[1 - \frac{(\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta})}{(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta})} \right] \quad (26)$$

4.2.1 Coeficiente de dilatação térmica

Tomando em consideração que o aço tal como a maioria dos materiais, sofre uma dilatação térmica quando aquecido é importante conhecer esse efeito quando se aborda de um elemento estrutural. A razão entre a deformação térmica e a temperatura denomina-se coeficiente de dilatação térmica e para valores de temperatura inferiores as 100 [°C] o aço possui um coeficiente de dilatação térmica aproximadamente constante com valor na ordem dos $\alpha = 1 \times 10^{-5} [^{\circ}C^{-1}]$. Para descrever este fenómeno, o Eurocódigo 3 Parte 1.2 apresenta um conjunto de expressões apresentadas abaixo nas equações (27).

$$\begin{aligned} \frac{\Delta l}{l} &= 1.2 \times 10^{-5} \theta_a + 0.4 \times 10^{-8} \theta_a^2 - 2.416 \times 10^{-4} & 20 < \theta_a \leq 750 [^{\circ}C] \\ \frac{\Delta l}{l} &= 1.1 \times 10^{-2} & 750 < \theta_a \leq 860 [^{\circ}C] \\ \frac{\Delta l}{l} &= 2 \times 10^{-5} \theta_a - 6.2 \times 10^{-3} & 860 < \theta_a \leq 1200 [^{\circ}C] \end{aligned} \quad (27)$$

Na Figura 13 é representada a variação da dilatação térmica com o aumento da temperatura. A dilatação aumenta de forma linear até se atingir aproximadamente os 750 [°C], a partir desse instante ocorre a mudança de fase que provoca uma contração do material na ordem dos 15% da expansão ocorrida entre a temperatura ambiente e os 750 [°C]. A contração referida é representada de forma simplificada no patamar representado na Figura 13. Após concluída a mudança de fase o material assume novamente um a variação linear.

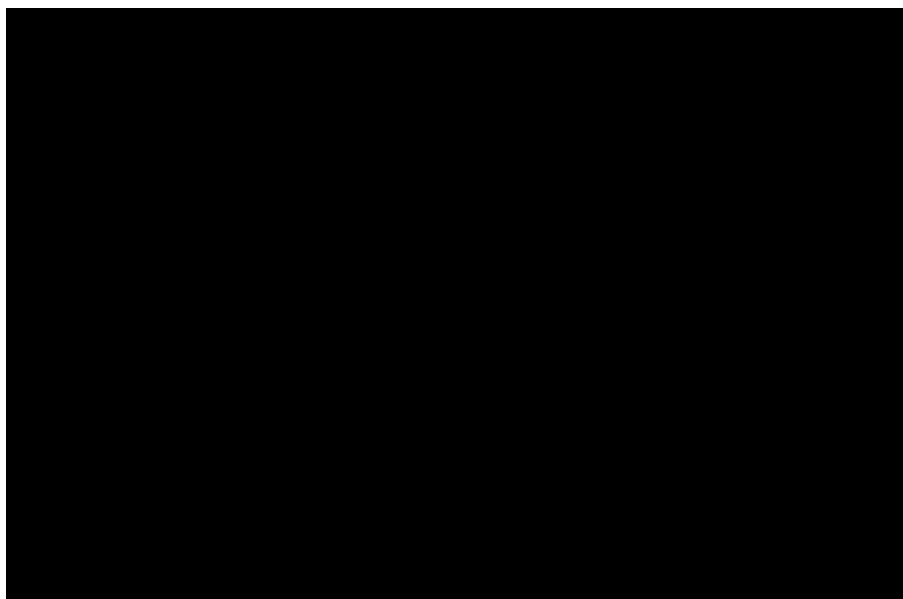


Figura 13- Representação gráfica da variação do coeficiente de dilatação térmica com a temperatura.

4.2.2 Tensão de cedência

Uma das propriedades do aço fortemente afetada pelo aumento da temperatura é a tensão de cedência, resultando na diminuição drástica da sua capacidade resistente. Devido a esta elevada perda de resistência o Eurocódigo refere a importância de contabilização desta perda e apresenta coeficientes de redução para diferentes valores de temperatura apresentados na seguinte Tabela 4.

Tabela 4- Valores do coeficiente de redução da tensão de cedência.

| Temperatura [°C] | $K_{y,\theta}$ |
|-------------------------|----------------------------------|
| 20 | 1.00 |
| 100 | 1.00 |
| 200 | 1.00 |
| 300 | 1.00 |
| 400 | 1.00 |
| 500 | 0.78 |
| 600 | 0.47 |
| 700 | 0.23 |
| 800 | 0.11 |
| 900 | 0.06 |
| 1000 | 0.04 |
| 1100 | 0.02 |
| 1200 | 0.00 |

A Tabela 4 fornece os valores dos coeficientes de redução $K_{y,\theta}$ da tensão de cedência, proposta no Eurocódigo, contudo, para valores intermédios aos apresentados nesta, deve ser usada a interpolação linear.

Na Figura 14 é demonstrada a representação gráfica dos fatores de redução, realçando alguns pormenores como o da tensão de cedência se manter constante até aos 400 [°C], contudo, a 700 [°C] o aço possui apenas 23% da capacidade resistente à temperatura ambiente, a 800 [°C] já só possui 11% e a 900 [°C] restam somente 6%.

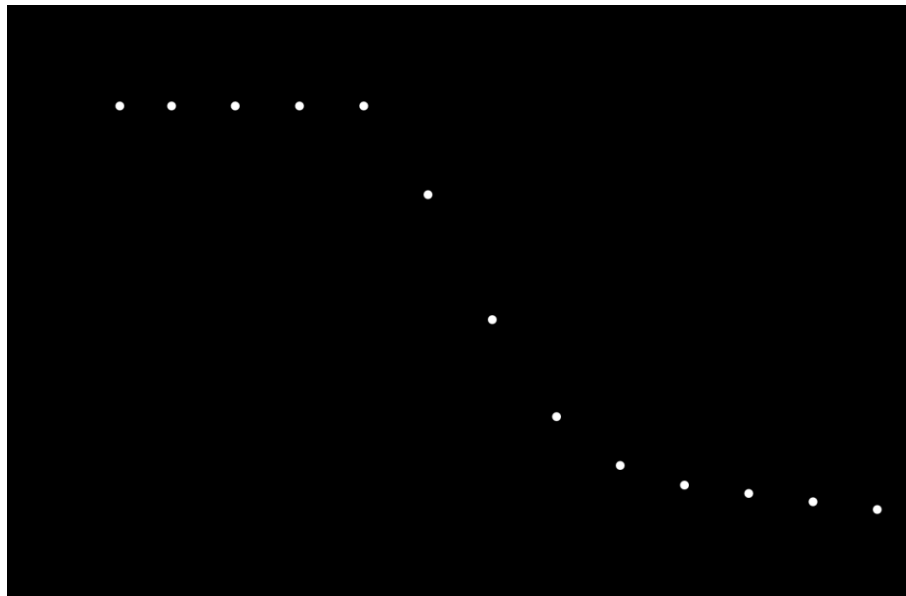


Figura 14- Representação dos fatores de redução da tensão de cedência para o aço.

Os valores para o coeficiente de redução apresentados na Tabela 4 podem ser obtidos através da seguinte equação (28), desde que se obedeça à condição indicada.

$$K_{y,\theta} = \left[0.9674 \left(e^{\left(\frac{\theta - 482}{39.19} \right)} + 1 \right) \right]^{-1/3.833} \leq 1 \quad [19] \quad (28)$$

4.2.3 Módulo de elasticidade

Tal como a tensão de cedência o módulo de elasticidade diminui com o aumento da temperatura. Na seguinte Figura 15 é representada a variação do fator de redução desta propriedade com o aumento da temperatura. O fator de redução é obtido através do quociente entre o valor do módulo de elasticidade à temperatura que se pretende obter e o valor obtido para a temperatura ambiente de referência (20 [°C]).



Figura 15- Representação gráfica da variação do fator de redução do módulo de elasticidade com a temperatura.

Como é possível verificar através da Figura 15 a variação desta propriedade é acentuada para valores da temperatura inferiores a 700 [°C], tornando-se menos significativa para valores acima, contudo quando se atinge a temperatura de 500 [°C] apenas se dispõem de 60% do valor do módulo de elasticidade à temperatura ambiente.

Estes valores propostos pelo Eurocódigo 3 parte 1.2 são apresentados na seguinte Tabela 5, admitindo-se uma variação linear entre os valores.

Tabela 5- Valores do coeficiente de redução do Módulo de elasticidade proposto pelo Eurocódigo 3 parte 1.2.

| Temperatura [°C] | $K_{E,\theta}$ |
|------------------|----------------|
| 20 | 1.0000 |
| 100 | 1.0000 |
| 200 | 0.9000 |
| 300 | 0.8000 |
| 400 | 0.7000 |
| 500 | 0.6000 |
| 600 | 0.3100 |
| 700 | 0.1300 |
| 800 | 0.0900 |
| 900 | 0.0675 |
| 1000 | 0.0450 |
| 1100 | 0.0225 |
| 1200 | 0.0000 |

Os valores apresentados na Tabela 5 podem ser obtidos de forma alternativa através da seguinte equação (29) desde que obedçam à condição apresentada.

$$K_{E,\theta} = \frac{1.1-0.0001\theta_a}{e^{(\theta_a-500)+1}} + 220 \frac{e^{(-0.006\theta_a-3)}}{e^{(500-\theta_a)+1}} \leq 1 \quad [19] \quad (29)$$

Capítulo 5: Estudo experimental do comportamento das ligações aparafusadas

5.1 Introdução

Nos últimos anos a crescente exigência dos parâmetros de segurança, refletidos nas diversas normas de dimensionamento, impulsionou o estudo do comportamento dos materiais em condições extremas, nomeadamente em condições de temperaturas elevadas como as provenientes da ação de incêndios.

Quando se dimensiona ligações aparafusadas esta baseia-se na resistência mecânica dos parafusos e no material dos elementos a ligar. No caso das ligações com recurso a parafusos convencionais recorre-se ao valor mínimo da resistência do parafuso (tensão de cedência e tensão última) que é definida pelo material do parafuso e distinguida por classes, estabelecida pela norma BS EN ISO 898-1:1999 [22]. No entanto esta norma não define classes para o tipo de parafusos autoperfurantes, pelo que a classificação do parafuso SFS INTEC SD6-H15 Ø5,5 x 22 [mm] é desconhecida. Conforme fornecido pelo fabricante, este tipo de parafuso é produzido em aço o carbono endurecido 18B2 de acordo com a norma EN10263 e galvanizado para proporcionar uma maior resistência à corrosão.

Tomando em consideração que este tipo de elemento de ligação é utilizado nas ligações de chapas finas e tendo em conta que a especificidade da tipologia destas ligações origina um comportamento distinto em relação às ligações aparafusadas convencionais torna-se necessário conhecer o seu comportamento em qualquer situação.

5.2 Caracterização da resistência mecânica dos parafusos

Os parafusos autoperfurantes são parafusos que não necessitam de abertura prévia de um furo para a sua aplicação. A sua própria forma incorpora uma broca que permite a abertura do furo necessário ao mesmo tempo que este é colocado.

Segundo as tabelas das propriedades mecânicas do fabricante, a resistência à tração e de ao corte do parafuso, determinado experimentalmente é 16 e 10 [KN], respetivamente [23]. No entanto nada é referido em relação à caracterização do material dos parafusos, nomeadamente a tensão de cedência e a tensão última.

5.2.1 Instalação experimental dos testes de tração aos parafusos

A falta de informação relativa às propriedades mecânicas do parafuso impulsionou o desenvolvimento de um conjunto de testes experimentais para a sua caracterização.

Para a realização dos ensaios de tração dos parafusos foi desenvolvido uma instalação experimental composta por um sistema de aplicação de carga, ver a Figura 16, cuja força de tração é aplicada por uma máquina de ensaios de tração universal, exercendo no parafuso uma solitação de tração até à sua rotura.



Figura 16- Instalação experimental para os ensaios de tração dos parafusos.

Antes de se executar o ensaio, os parafusos são previamente maquinados de forma a remover os filetes da rosca e criar um comprimento de referência constante com 6 [mm] de

comprimento e 3 [mm] de diâmetro, ver a Figura 17, conforme especificado na norma ISO898-1:1999, [1].



Figura 17- Parafusos SFS SD6-H15 Ø5,5 x 22 [mm] após maquinagem.

Após maquinagem os parafusos são colocados no interior do sistema de amarração (Figura 16) que posteriormente é colocado no interior de um forno elétrico resistivo, cuja temperatura é medida por termopares do tipo K e controlada por um sistema de PID.

Após obtenção do provete do parafuso, ver a Figura 18, é efectuada a montagem no sistema de amarração e a colocação de termopares. É aplicada uma carga crescente ao parafuso na superfície inferior da anilha até que ocorra o colapso do mesmo. Na Figura 19 é possível observar toda a instalação experimental montada e pronta para o início de um teste. Na Figura 19 à direita pode-se ver o resultado de um ensaio realizado à temperatura de 800°C.

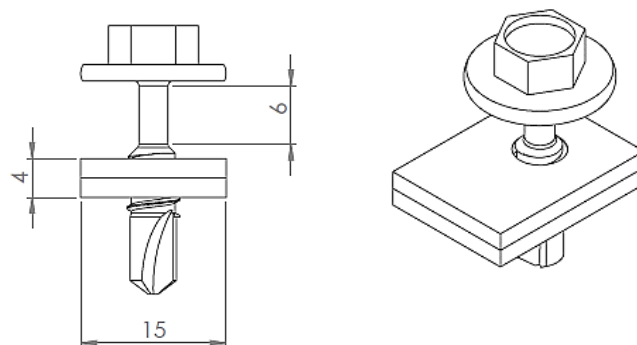


Figura 18- Desenho de definição do provete dos parafusos.

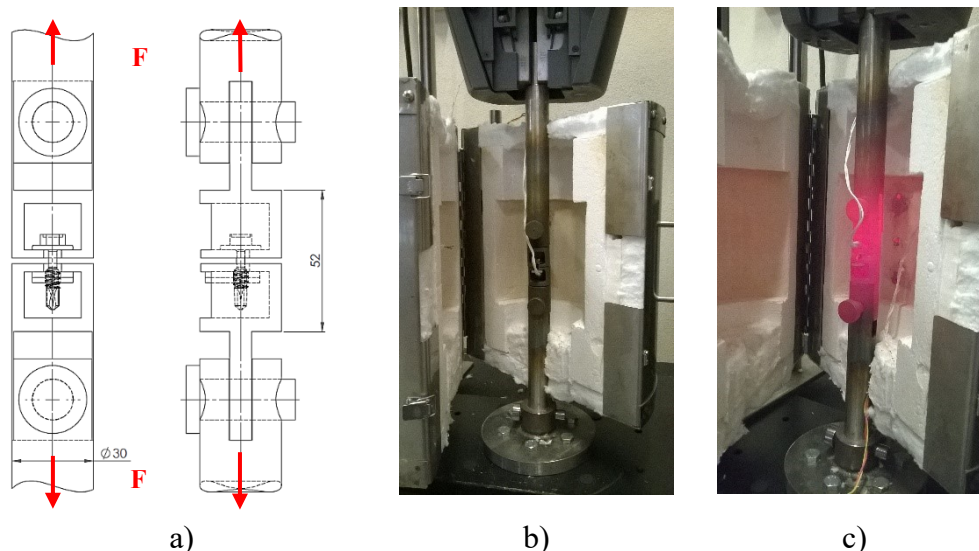


Figura 19- Instalação experimental. a) Modelo CAD. b) Instalação no início do teste experimental. c) Componentes do teste experimental após o ensaio.

Depois de terminara montagem dos sistemas de amarração e controlo de temperatura e posterior estabilização da temperatura, procede-se à aplicação de uma pré-carga inicial, de aproximadamente 0.1 [kN]. Nesse momento o valor do deslocamento é colocado a zero e é iniciado o teste com controlo de deslocamento à velocidade de 1 [mm/min], tendo como referência a documentação técnica da ECCS, [24].

5.2.2 Resultados dos testes de tração aos parafusos

Os testes experimentais realizados permitem a obtenção dos valores de resistência à tração dos parafusos autoperfurantes assim como os gráficos força (F) versus deslocamento (D), tensão última (f_u) e o fator de redução (K_u) em função da temperatura (T).

Os resultados obtidos com os ensaios experimentais são apresentados na Figura 20 para os vários níveis de temperatura analisados. Para cada nível de temperatura foram realizados três ensaios experimentais.

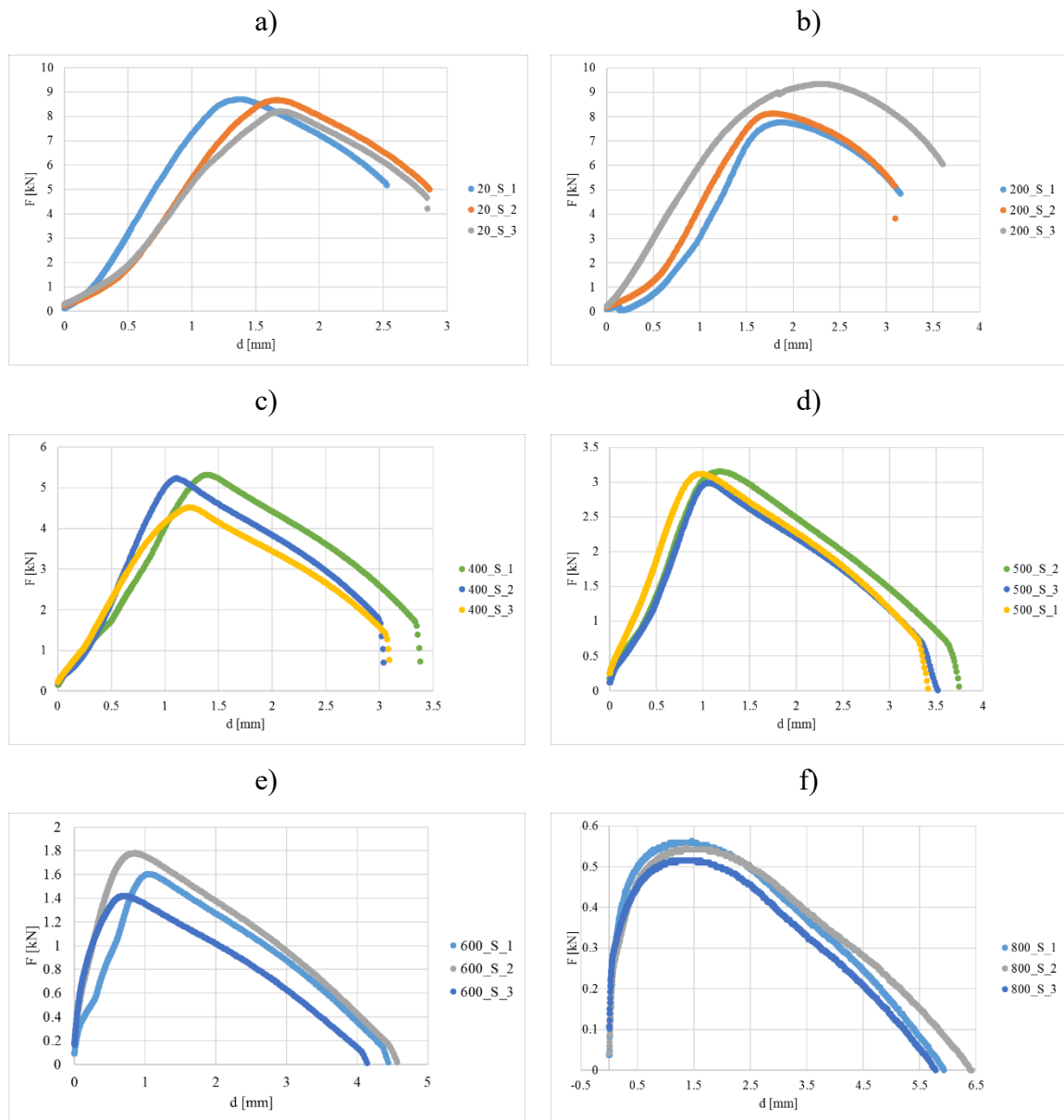


Figura 20- Gráficos obtidos para a carga aplicada versus deslocamento para as diversas temperaturas: a) 20°C; b) 200; c) 400; d) 500; e) 600; f) 800.

Como era de esperar e analisando-se a Figura 20 em termos médios verifica-se perda de propriedades mecânicas com o aumento da temperatura que resulta na conseqüente perda de resistência mecânica. Este resultado pode ser observado também na Figura 23 e com mais detalhe na Tabela 6 e Tabela 7.

Estes resultados são apresentados na Figura 21 e Figura 22 em termos comparativos para diferentes valores de temperatura, sendo possível verificar a perda de resistência e o aumento do alongamento do parafuso com o aumento da temperatura.

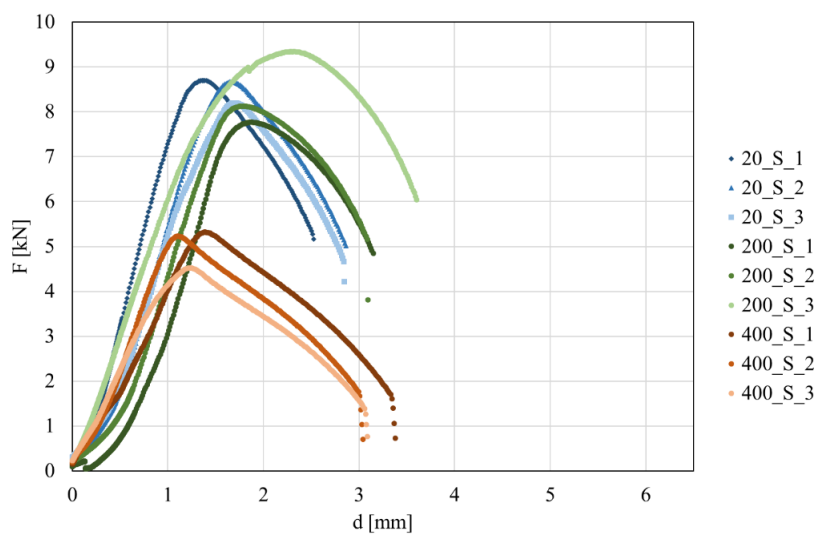


Figura 21- Gráfico carga versus deslocamentos de todos os provetes para as temperaturas de 20, 200 e 400 [°C].

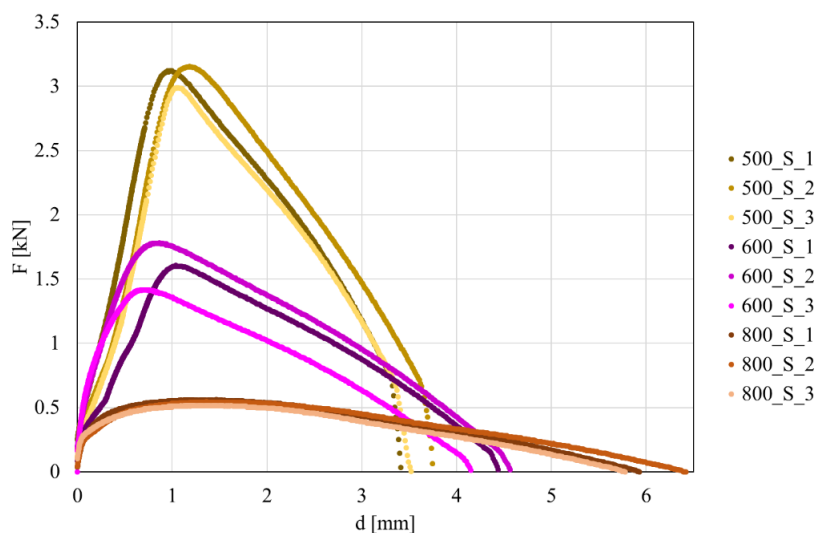


Figura 22- Gráfico carga versus deslocamentos de todos os provetes para as temperaturas de 500, 600 e 800 [°C].

Na Tabela 6 são apresentados os resultados da máxima força aplicada e a tensão de rotura para os diferentes níveis de temperatura, obtidos dos ensaios de tração dos parafusos autoperfurantes. A Tabela 7 apresenta os valores médios dos mesmos resultados para os vários níveis de temperatura.

Tabela 6- Tabela de resultados dos ensaios de tração dos parafusos autoperfurantes.

| Referência | Temp [°C] | F _{Max} [kN] | Tensão de Rotura [Mpa] |
|------------|-----------|-----------------------|------------------------|
| 20_S_1 | 20 | 8.7030 | 1231.00 |
| 20_S_2 | | 8.6710 | 1227.00 |
| 20_S_3 | | 8.1990 | 1160.00 |
| 200_S_1 | 200 | 7.7740 | 1100.00 |
| 200_S_2 | | 8.1290 | 1150.00 |
| 200_S_3 | | 9.3420 | 1322.00 |
| 400_S_1 | 400 | 5.3260 | 753.50 |
| 400_S_2 | | 5.2350 | 740.60 |
| 400_S_3 | | 4.5260 | 640.30 |
| 500_S_1 | 500 | 5.6400 | 441.20 |
| 500_S_2 | | 3.1570 | 446.60 |
| 500_S_3 | | 2.9960 | 423.80 |
| 600_S_1 | 600 | 1.6050 | 227.10 |
| 600_S_2 | | 1.7830 | 252.20 |
| 600_S_3 | | 1.4170 | 200.50 |
| 800_S_1 | 800 | 0.5638 | 79.76 |
| 800_S_2 | | 0.5476 | 77.47 |
| 800_S_3 | | 0.5154 | 72.91 |

Tabela 7- Valor médio dos resultados dos ensaios de tração dos parafusos autoperfurantes.

| Temp [°C] | F _{Max} [kN] | Tensão de Rotura [Mpa] | K _{u, 0} |
|-----------|-----------------------|------------------------|-------------------|
| 20 | 8.5243 | 1206.0000 | 1 |
| 200 | 8.4150 | 1190.6667 | 0.9872 |
| 400 | 5.0290 | 711.4667 | 0.5900 |
| 500 | 3.9310 | 437.2000 | 0.4612 |
| 600 | 1.6017 | 226.6000 | 0.1879 |
| 800 | 0.5423 | 76.7133 | 0.0636 |

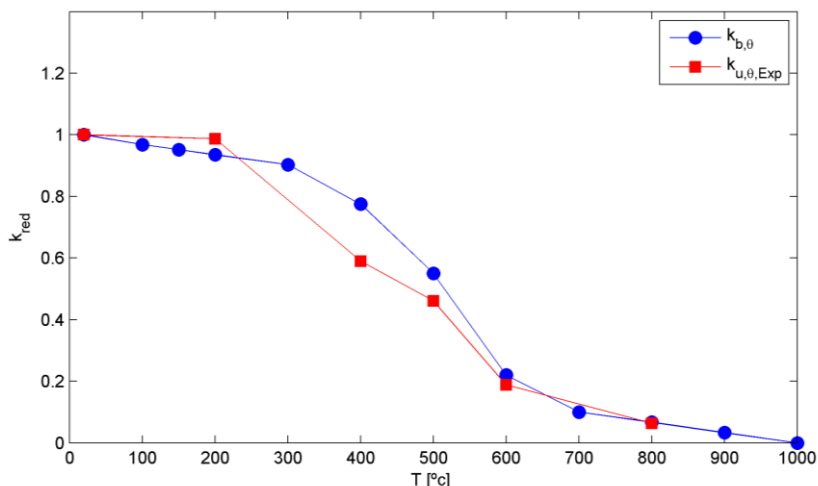


Figura 23- Comparação do coeficiente de redução dos parafusos fornecidos pelo Eurocódigo ($k_{b,\theta}$) e os resultados experimentais ($k_{u,\theta,Exp}$).

Comparando os coeficientes de redução obtidos experimentalmente ($k_{u,\theta,Exp}$) com os coeficientes fornecidos pelo Eurocódigo ($k_{b,\theta}$), representados na Figura 23, é possível verificar que os valores do Eurocódigo 3 parte 1.2 são superiores aos obtidos experimentalmente no intervalo de temperaturas entre 400 [°C] e 600 [°C]. Para a temperatura de 200 [°C] verifica-se através dos resultados obtidos um ligeiro aumento da resistência dos parafusos. No entanto o Eurocódigo não apresenta qualquer indicação sobre esse aumento.

Comparando o resultado da média dos três ensaios à temperatura ambiente com os valores presentes na norma ISO898-1:1999, [1], pode-se concluir que o parafuso em estudo corresponde aos requisitos mínimos de resistência à tração para ser classificado como sendo da classe 10.9.

5.3 Estudo experimental das ligações autoperfurantes

Devido à reduzida espessura dos elementos a ligar, as ligações de chapas finas possuem um comportamento distinto das ligações aparafusadas convencionais. Neste tipo de ligação a sua resistência está diretamente ligada à resistência ao esmagamento das chapas, pelo que só em casos de ligações de chapas mais espessas se considere a resistência do parafuso ao corte. Esta distinção é ainda mais evidenciada no caso de ligações sujeitas a

condições de incêndio, devendo-se essencialmente à taxa de aquecimento das chapas ser superior à dos parafusos, por possuírem uma capacitância térmica superior.

As ligações analisadas neste estudo são ligações aparafusadas sujeitas ao corte simples de chapas de aço finas galvanizadas, normalmente utilizadas na produção de perfis enformados a frio. As ligações são feitas com recurso a parafusos autoperfurantes, com a referência SFS SD6-H15 Ø5,5 x 22 [mm] e com um diâmetro de $d=5,5$ [mm]. Este é colocado ao longo da linha central das chapas e a diferentes distâncias da extremidade ao centro do furo, conforme as dimensões: 10 [mm], 15 [mm] e 20 [mm]. É também realizado um estudo paramétrico ao nível da espessura das chapas a ligar com combinações das chapas de 0.5+0.5, 0.5+1.0, 1.0+1.0 e 1.5+1.5 [mm], para diferentes níveis de resistência da classe do aço da chapa (SGD220, SGD250, SGD280, SGD320 e SGD350) e diferentes níveis de temperatura, representativas de uma ação de incêndio.

A Tabela 8 apresenta os dados dos ensaios experimentais realizados sendo cada provete testado para as temperaturas de 20, 200, 400, 500, 600 e 800 [°C].

Dos casos de estudo apresentados resultou a realização de 126 ensaios experimentais.

É importante referir que segundo a parte 1-3 do Eurocódigo 3 parte 1.3 [6] e os guias ECCS, [24] a chapa de menor espessura é a que deve estar sempre em contacto com a anilha/cabeça do parafuso autoprefurante.

As propriedades mecânicas e químicas das chapas utilizadas podem ser observadas com detalhe no anexo A2.

Nas ligações aparafusadas solicitadas ao corte, o modo de colapso deve-se essencialmente aos mecanismos de rotura por corte do parafuso (SFM) (Figura 24 a)), rotura por esmagamento da chapa (BFM) (Figura 24 b)), que pode ocorrer com ou sem rasgamento da chapa, e por arrancamento do parafuso devido ao seu escorregamento pelo furo acompanhado por uma rotação do parafuso (TFM) (Figura 24 c)). No caso de chapas a ligar de elevada espessura é de esperar um modo de rotura por corte do parafuso, enquanto que para chapas muito finas se obtém uma rotura por esmagamento da chapa. Outras situações podem incluir duas ou mais combinações de modos de rotura.

Os modos de rotura obtidos para todos os ensaios podem ser observados nas tabelas presentes no anexo A4.

Tabela 8- Dados dos provetes utilizados nos ensaios experimentais para cada temperatura.

| Referência | Material da Chapa | Altura [mm] | Largura [mm] | Espessura [mm] | e_1 [mm] |
|--------------|-------------------|-------------|--------------|----------------|------------|
| 220_15_15_10 | SGD220 | 280 | 50 | 1,5x1,5 | 10 |
| 220_15_15_15 | SGD220 | 270 | 50 | 1,5x1,5 | 15 |
| 220_15_15_20 | SGD220 | 260 | 50 | 1,5x1,5 | 20 |
| 250_10_10_10 | SGD250 | 280 | 50 | 1,0x1,0 | 10 |
| 250_10_10_15 | SGD250 | 270 | 50 | 1,0x1,0 | 15 |
| 250_10_10_20 | SGD250 | 260 | 50 | 1,0x1,0 | 20 |
| 280_05_05_10 | SGD280 | 280 | 50 | 0,5x0,5 | 10 |
| 280_05_05_15 | SGD280 | 270 | 50 | 0,5x0,5 | 15 |
| 280_05_05_20 | SGD280 | 260 | 50 | 0,5x0,5 | 20 |
| 280_05_10_10 | SGD280 | 280 | 50 | 0,5x1,0 | 10 |
| 280_05_10_15 | SGD280 | 270 | 50 | 0,5x1,0 | 15 |
| 280_05_10_20 | SGD280 | 260 | 50 | 0,5x1,0 | 20 |
| 280_10_10_10 | SGD280 | 280 | 50 | 1,0x1,0 | 10 |
| 280_10_10_15 | SGD280 | 270 | 50 | 1,0x1,0 | 15 |
| 280_10_10_20 | SGD280 | 260 | 50 | 1,0x1,0 | 20 |
| 320_05_05_10 | SGD320 | 280 | 50 | 0,5x0,5 | 10 |
| 320_05_05_15 | SGD320 | 270 | 50 | 0,5x0,5 | 15 |
| 320_05_05_20 | SGD320 | 260 | 50 | 0,5x0,5 | 20 |
| 350_10_10_10 | SGD350 | 280 | 50 | 1,0x1,0 | 10 |
| 350_10_10_15 | SGD350 | 270 | 50 | 1,0x1,0 | 15 |
| 350_10_10_20 | SGD350 | 260 | 50 | 1,0x1,0 | 20 |

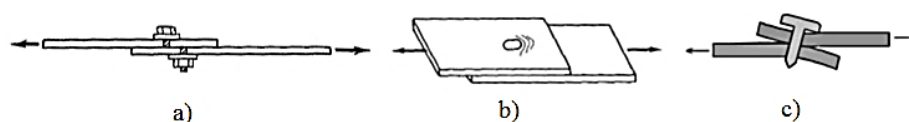


Figura 24- Modos de rotura: a) Modo de rotura por corte (SFM), b) Modo de rotura esmagamento (BFM), c) Modo de rotura por arrancamento e rotação do parafuso (TFM).

5.3.1 Instalação experimental dos testes das ligações

A instalação experimental utilizada para a realização dos ensaios é composta por um sistema de aplicação de carga, no qual a força de tração é realizada por uma máquina de ensaios universal (Figura 25), originando um esforço atuante de corte no parafuso. A máquina de ensaios universal utilizada foi uma Instron 4485 capaz de aplicar uma força máxima de 200 [KN].

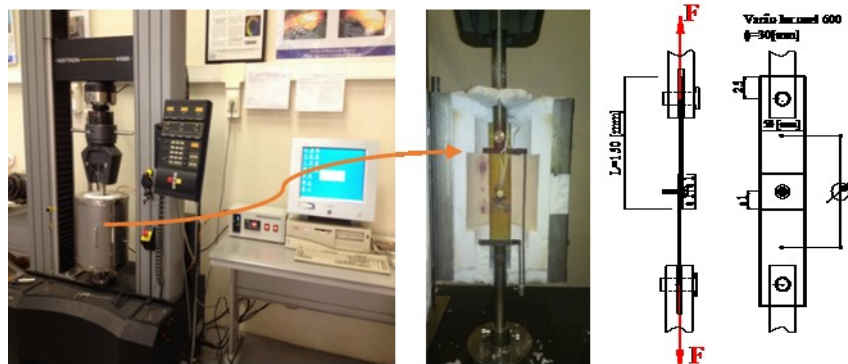


Figura 25- Instalação experimental para ensaio de ligações aparafusadas.

Os elementos antes de serem testados são colocados no interior de um forno elétrico resistivo, cuja temperatura é medida por termopares do tipo K e controlada por um sistema PID, apresentado na Figura 26.



Figura 26- Unidade de controlo da temperatura no forno.

Após a estabilização da temperatura pretendida procede-se à aplicação de uma pré-carga inicial, de aproximadamente 0.1 [KN]. Nesse momento o valor do deslocamento e deformação é colocado a zero e é iniciado o teste com controlo de deslocamento à velocidade de 1 [mm/min], tendo como referência a documentação técnica da ECCS, [24]. De acordo com este procedimento, a carga de colapso da ligação é determinada pela carga máxima obtida num alongamento de 3 [mm], conforme apresentado na Figura 27, medido através de um extensómetro num comprimento de referência de 150 [mm], ver Figura 25- Instalação experimental para ensaio de ligações aparafusadas.Figura 25.

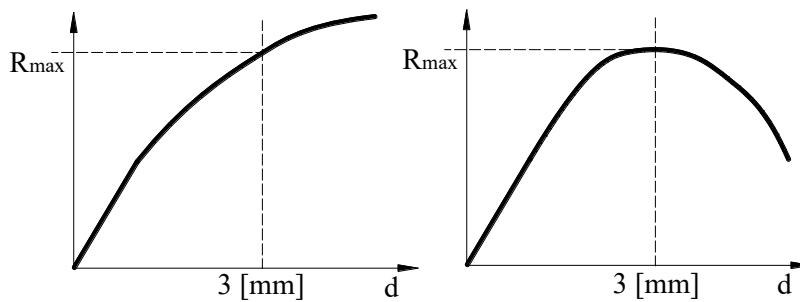


Figura 27- Definição do limite da resistência da ligação, [24].

Para a determinação do deslocamento do comprimento de referência foram utilizados dois varões auxiliares fixos às chapas de aço que permitem o acoplamento do extensômetro mecânico numa zona exterior do forno, conforme se pode ver na Figura 28.

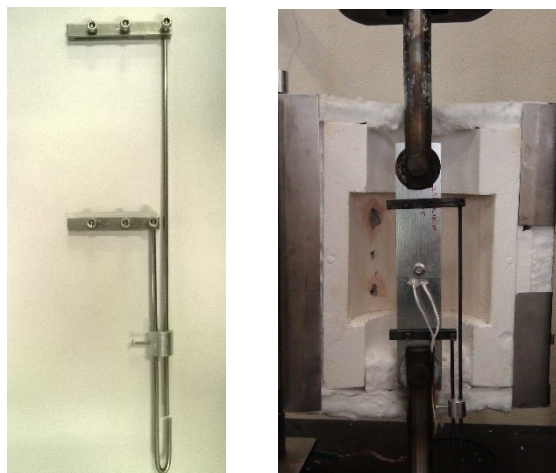


Figura 28- Sistema de acoplamento do extensômetro mecânico no exterior do forno.

A geometria do provete utilizado na realização dos ensaios foi baseado na documentação técnica ECCS [24] e pode se analisada na seguinte Figura 29. Nesta são apresentados os três tipos de provetes para as três distâncias da furação ou bordo da chapa.

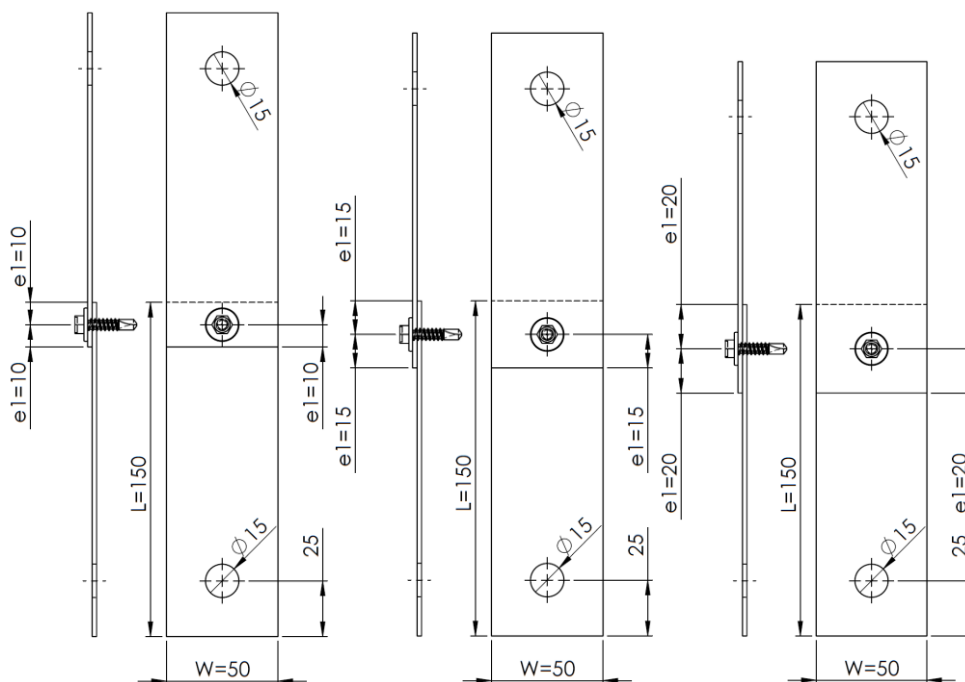


Figura 29- Geometria do provete utilizado com diferentes distâncias e_1 , distâncias em [mm]

Os diversos ensaios experimentais permitem uma análise paramétrica dos parâmetros que influenciam a resistência da ligação. Os resultados dos testes experimentais são apresentados e discutidos nas secções seguintes.

5.3.2 *Influência da classe das chapas na resistência da ligação*

Estando a classe das chapas diretamente ligada à sua resistência mecânica torna-se importante analisar se essa mesma resistência contribui para o aumento da resistência da ligação. Neste estudo foram utilizadas chapas com a designação SGD 220, SGD 250, SGD 280, SGD 320 e SGD 350 já referidas e cujas propriedades mecânicas e químicas podem ser analisadas com detalhe no anexo A2.

Através da Figura 30 pode-se verificar que nos provetes com espessura de chapa de 0.5 [mm], para a temperatura a ambiente, não se verifica um aumento significativo da resistência da ligação em função da classe de chapa. Para a mesma temperatura nos provetes com espessura de 1 [mm] verifica-se uma diferença significativa, apresentado maior resistência os provetes com classe de chapa superior, contudo não se verifica linearidade no aumento da resistência da ligação em função do aumento da classe, tal como se verifica na Figura 31.

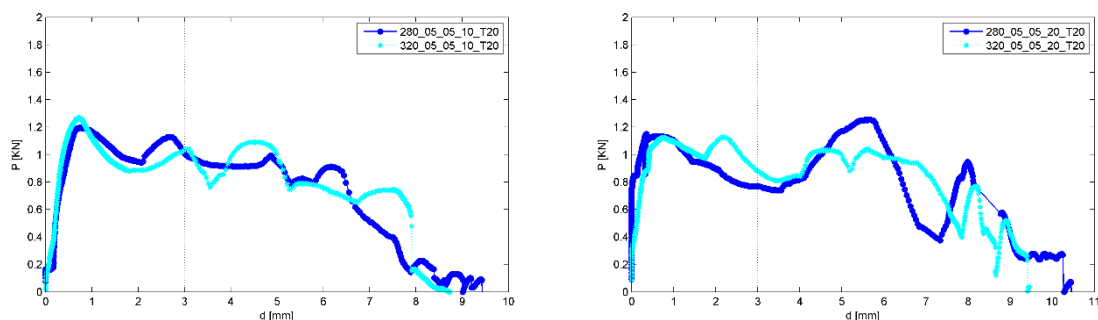


Figura 30- Gráfico de resultados dos provetes com diferentes tipos de chapas, com espessura 0.5 [mm] e diferentes distâncias de bordo da furação a 20 [°C].

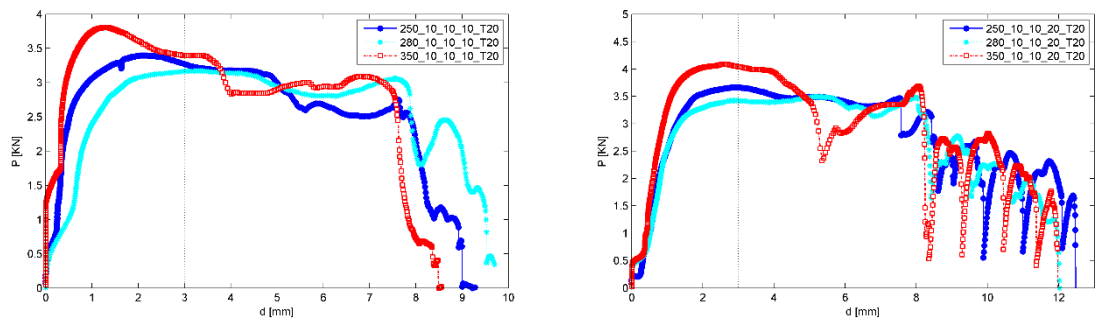


Figura 31- Gráfico de resultados dos provetes com diferentes tipos de chapas, com espessura 1 [mm] e diferentes distâncias de bordo da furação a 20 [°C].

Na Tabela 9 estão apresentados os valores obtidos da carga para um deslocamento de 3 [mm], carga máxima suportada pela ligação e modos de rotura dos provetes apresentados na Figura 30 e Figura 31.

Tabela 9- Resultados da carga máxima [kN] antes de se obter 3 [mm] de deslocamento e para o deslocamento de 3 [mm] dos ensaios a 20 [°C].

| Ref | P_max | P_3mm | Modo de falha |
|------------------|--------|--------|---------------|
| 280_05_05_10_T20 | 1.1973 | 1.0080 | BFM |
| 320_05_05_10_T20 | 1.2671 | 1.0327 | BFM |
| 280_05_05_20_T20 | 1.2564 | 0.7678 | BFM+TFM |
| 320_05_05_20_T20 | 1.1275 | 0.8791 | BFM +TFM |
| 250_10_10_10_T20 | 3.3986 | 3.2730 | BFM |
| 280_10_10_10_T20 | 3.1731 | 3.1641 | BFM |
| 350_10_10_10_T20 | 3.8067 | 3.3983 | BFM |
| 250_10_10_20_T20 | 3.6671 | 3.6617 | BFM + TFM |
| 280_10_10_20_T20 | 3.4953 | 3.4191 | BFM + TFM |
| 350_10_10_20_T20 | 4.0859 | 4.0412 | BFM + TFM |

Na Figura 32 são apresentados os gráficos de resultados dos provetes com espessura de chapa de 0.5 [mm] para a temperatura de 200 [°C] onde se verifica novamente um aumento não significativo da resistência da ligação em função da classe de chapa. Contudo verifica-se um aumento significativo da resistência quando se ultrapassa um deslocamento de 3 [mm] para os provetes com e_l inferior e de classe de chapa superior.

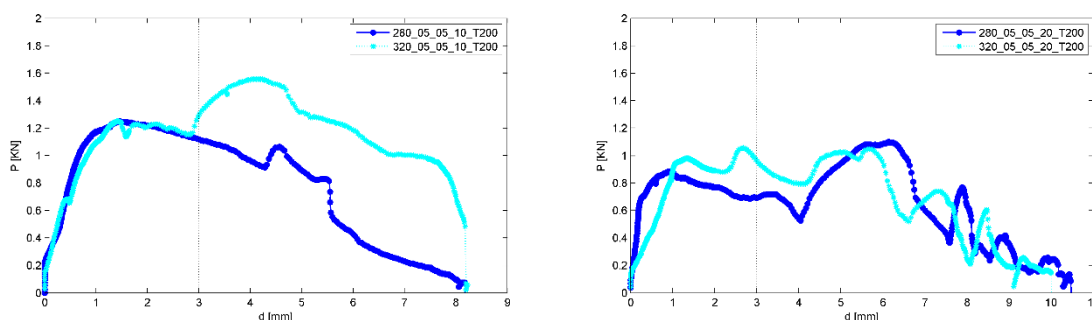


Figura 32- Gráfico de resultados dos provetes com diferentes tipos de chapas, com espessura 0.5 [mm] e diferentes distâncias de bordo da furação a 200 [°C].

Para a temperatura de 200 [°C] a Figura 33 demonstra mais uma vez que os provetes com espessura de 1 [mm] apresenta diferenças significativas apresentado maior resistência os provetes com classe de chapa superior. Repetidamente não se verifica linearidade no aumento da resistência da ligação em função do aumento da classe. Na seguinte Tabela 10 estão apresentados os valores da carga para um deslocamento de 3 [mm], carga máxima suportada pela ligação e modos de rotura dos provetes apresentados pela Figura 32 e Figura 33.

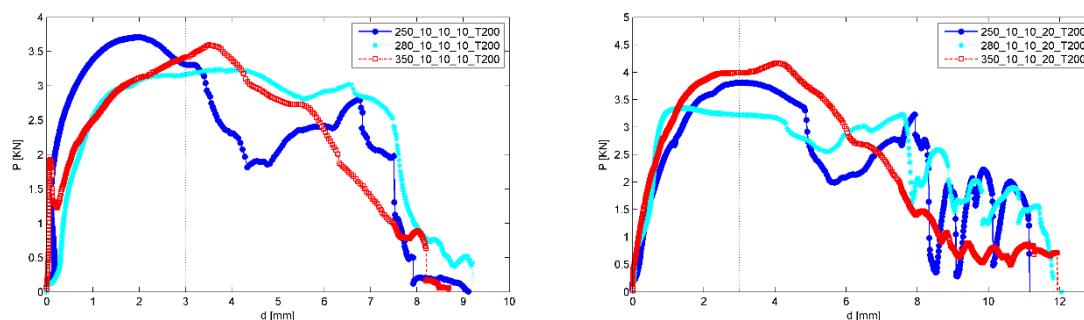


Figura 33- Gráfico de resultados dos provetes com diferentes tipos de chapas, com espessura 1 [mm] e diferentes distâncias de bordo da furação a 200 [°C].

Tabela 10- Resultados da carga máxima [kN] antes de se obter 3 [mm] de deslocamento e para o deslocamento de 3 [mm] dos ensaios a 200 [°C].

| Ref | P _{max} | P _{3mm} | Modo de falha |
|-------------------|------------------|------------------|---------------|
| 280_05_05_10_T200 | 1.2510 | 1.1184 | BFM |
| 320_05_05_10_T200 | 1.5570 | 1.2918 | BFM |
| 280_05_05_20_T200 | 1.1006 | 0.6926 | BFM + TFM |
| 320_05_05_20_T200 | 1.0577 | 0.9621 | BFM + TFM |
| 250_10_10_10_T200 | 3.7154 | 3.3109 | BFM |
| 280_10_10_10_T200 | 3.2375 | 3.1648 | BFM |
| 350_10_10_10_T200 | 3.5973 | 3.4147 | BFM |
| 250_10_10_20_T200 | 3.8120 | 3.8067 | BFM + TFM |
| 280_10_10_20_T200 | 3.3503 | 3.2214 | BFM + TFM |
| 350_10_10_20_T200 | 4.1664 | 3.9946 | BFM + TFM |

Para a temperatura de 500 [°C] os provetes com espessura de 0.5 [mm] já apresentam resultados que mostram que, a esta temperatura, a classe de chapa é um fator que influencia a resistência da ligação tal como demonstra a Figura 34, onde se verifica que a ligação com classe de chapa superior apresenta resultados superiores.

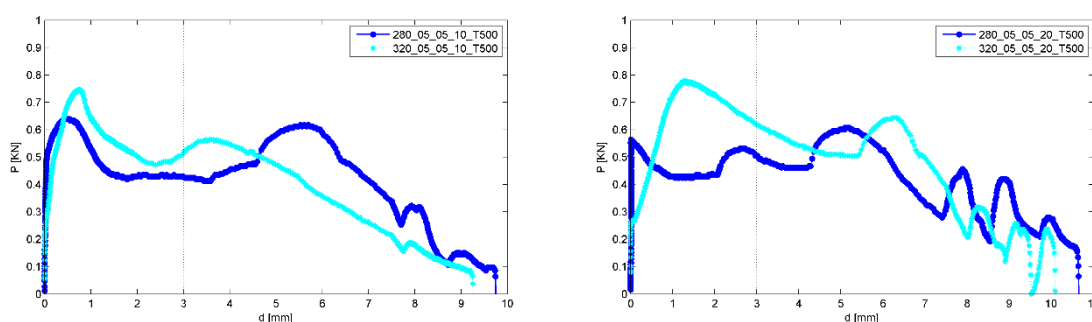


Figura 34- Gráfico de resultados dos provetes com diferentes tipos de chapas, com espessura 0.5 [mm] e diferentes distâncias de bordo da furação a 500 [°C].

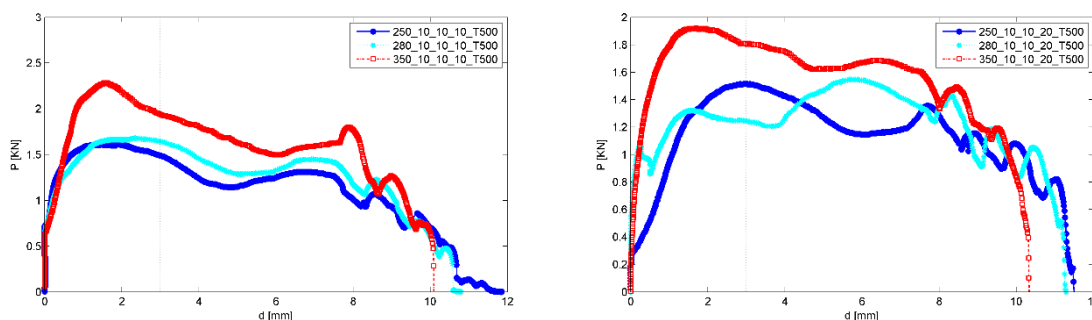


Figura 35- Gráfico de resultados dos provetes com diferentes tipos de chapas, com espessura 1 [mm] e diferentes distâncias de bordo da furação a 500 [°C].

Os provetes com espessura de chapa de 1 [mm] para a temperatura de 500 [°C] continuam a apresentar diferenças significativas sendo visível maior resistência nos provetes com classe de chapa mais elevada, não se verificando linearidade no aumento da resistência da ligação em função do aumento da classe, ver Figura 35.

Os valores referentes aos ensaios apresentados na Figura 34 e Figura 35 podem ser observados na Tabela 11 assim como os modos de falha.

Tabela 11- Resultados da carga máxima [kN] antes de se obter 3 [mm] de deslocamento e para o deslocamento de 3 [mm] dos ensaios a 500 [°C]

| Ref | P_max | P_3mm | Modo de falha |
|-------------------|--------|--------|---------------|
| 280_05_05_10_T500 | 0.6389 | 0.4286 | BFM |
| 320_05_05_10_T500 | 0.7463 | 0.5160 | BFM |
| 280_05_05_20_T500 | 0.6067 | 0.5047 | BFM + TFM |
| 320_05_05_20_T500 | 0.7785 | 0.6174 | BFM + TFM |
| 250_10_10_10_T500 | 1.6161 | 1.4896 | BFM |
| 280_10_10_10_T500 | 1.6805 | 1.6429 | BFM |
| 350_10_10_10_T500 | 2.2818 | 1.9365 | BFM + TFM |
| 250_10_10_20_T500 | 1.5141 | 1.5141 | BFM + TFM |
| 280_10_10_20_T500 | 1.5463 | 1.2456 | BFM + TFM |
| 350_10_10_20_T500 | 1.9221 | 1.8080 | BFM + TFM |

Para a temperatura de 800 [°C] os provetes apresentam resultado significativamente baixos que demonstra a perda quase total das propriedades mecânicas da ligação, como se observa através da Figura 36 e Figura 37.

Para esta temperatura a diferença de resultados dos provetes com espessura de 0.5 [mm] é praticamente nula não se destacando influência da classe de chapa utilizada.

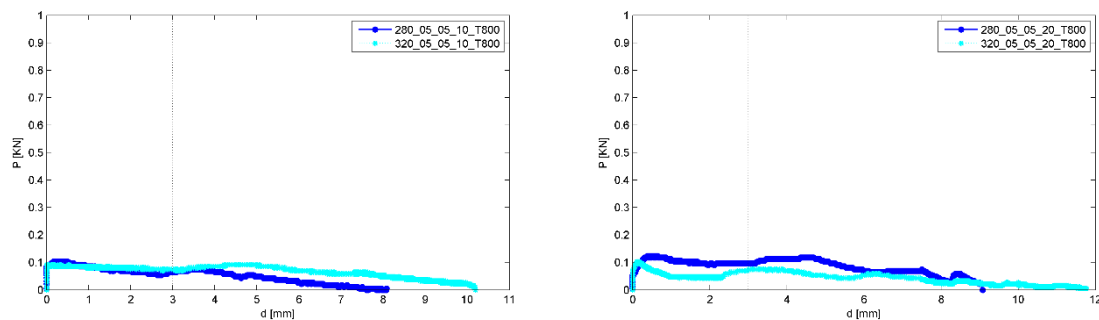


Figura 36- Gráfico de resultados dos provetes com diferentes tipos de chapas, com espessura 0.5 [mm] e diferentes distâncias de bordo da furação a 800 [°C]

Para os provetes de espessura de 1 [mm] é possível verificar pela Figura 37 que a classe de chapa influencia a resistência da ligação, embora não muito significativa. As classes SGD250 e SGD280 apresentam uma distinção praticamente nula.

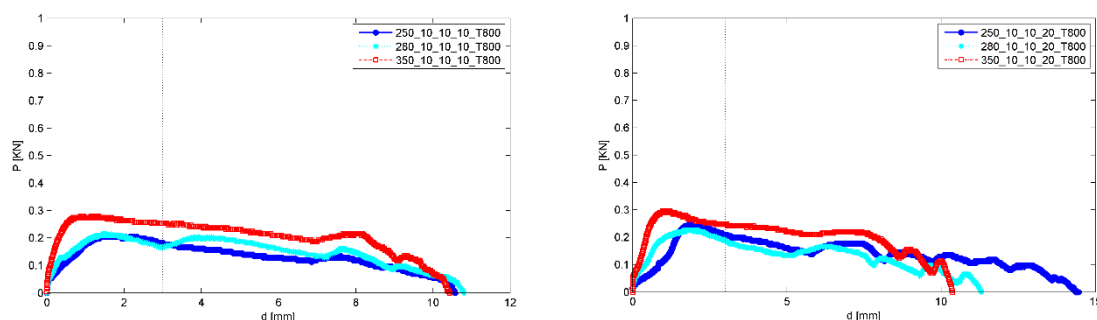


Figura 37- Gráfico de resultados dos provetes com diferentes tipos de chapas, com espessura 1 [mm] e diferentes distâncias de bordo da furação a 800 [°C].

A seguinte Tabela 12 apresenta os valores da carga suportada para um deslocamento de 3 [mm], carga máxima suportada pela ligação e modos de falha dos provetes apresentados na Figura 36 e Figura 37 para a temperatura de 800 [°C].

Tabela 12- Resultados da carga máxima [kN] antes de se obter 3 [mm] de deslocamento e para o deslocamento de 3 [mm] dos ensaios a 800 [°C].

| Ref | P _{max} | P _{3mm} | Modo de falha |
|-------------------|------------------|------------------|---------------|
| 280_05_05_10_T800 | 0.1020 | 0.0644 | BFM |
| 320_05_05_10_T800 | 0.0913 | 0.0752 | BFM |
| 280_05_05_20_T800 | 0.1235 | 0.0966 | BFM + TFM |
| 320_05_05_20_T800 | 0.1020 | 0.0726 | BFM + TFM |
| 250_10_10_10_T800 | 0.2094 | 0.1825 | BFM |
| 280_10_10_10_T800 | 0.2148 | 0.1664 | BFM |
| 350_10_10_10_T800 | 0.2792 | 0.2523 | BFM + TFM |
| 250_10_10_20_T800 | 0.2470 | 0.2094 | BFM + TFM |
| 280_10_10_20_T800 | 0.2255 | 0.1902 | BFM + TFM |
| 350_10_10_20_T800 | 0.2953 | 0.2470 | BFM + TFM |

Após uma análise paramétrica dos gráficos dos resultados anteriormente apresentados, pode-se verificar que de uma forma geral a classe da chapa está diretamente ligada à resistência da ligação. Assim quanto maior for a classe da chapa utilizada maior é a sua resistência e maior a carga última suportada pela ligação.

Nas tabelas anteriormente apresentados pode-se verificar que a classe de chapa utilizada não é um factor que influencia o modo de falha da ligação. Dos ensaios analisados verificou-se que quando é utilizado um $e_l = 10$ [mm] o modo de falha mais predominante é devido ao esmagamento da chapa, enquanto que para um $e_l = 20$ [mm] o modo de rotura é

sempre devido ao esmagamento da chapa mais rotação/escorregamento do parafuso. Nas seguintes Figura 38, Figura 39 e Figura 40 são apresentados os provetes com referência 280_05_05_10 e 280_05_05_20 após ensaio à temperatura de 20, 500 e 800 onde é possível verificar os dois modos de rotura anteriormente mencionados.



Figura 38- Apresentação do modo de rotura após ensaio à temperatura 20 [°C], a) provete 280_05_05_10_T20 (BFM), b) 280_05_05_20_T20 (BFM + TFM).

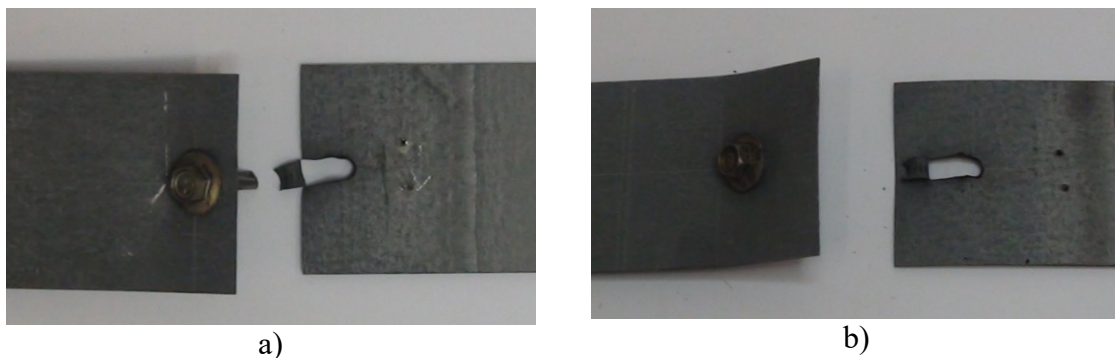


Figura 39- Apresentação do modo de rotura após ensaio à temperatura 500 [°C], a) provete 280_05_05_10_T500 (BFM), b) 280_05_05_20_T500 (BFM + TFM).

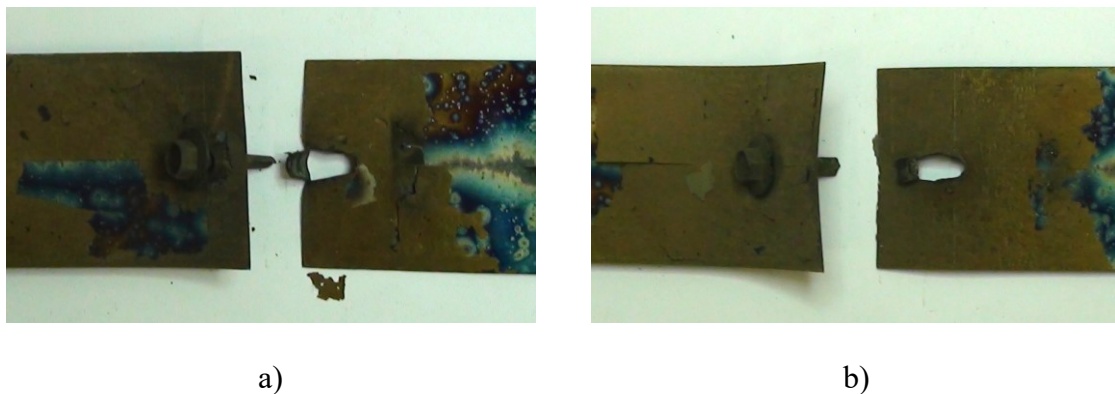


Figura 40- Apresentação do modo de rotura após ensaio à temperatura 800 [°C], a) provete 280_05_05_10_T800 (BFM), b) 280_05_05_20_T800 (BFM + TFM).

É importante referir que a influência da classe da chapa é verificada para todas as temperaturas dos ensaios realizados não seguindo uma razão de proporcionalidade direta no aumento da resistência da ligação.

5.3.3 Influência da espessura das chapas na resistência da ligação

Vários são os fatores que podem influenciar a resistência de uma determinada ligação. Desta forma torna-se importante verificar qual a influência da espessura de chapa na resistência das ligações aparafusadas de chapas enformadas a frio. Nesta secção serão apresentados alguns dos resultados dos ensaios, considerando a variação da espessura das chapas utilizadas no provete mantendo-se a mesma classe de material, distância da furação ao bordo para os diferentes níveis de temperatura.

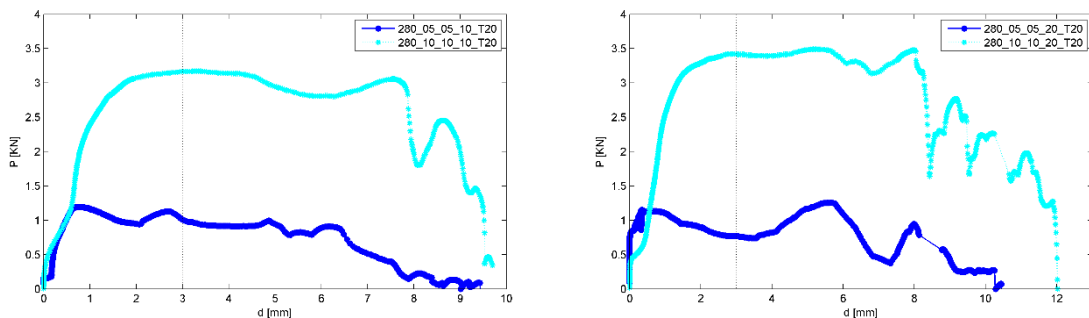


Figura 41- Gráficos força versus deslocamento dos provetes com diferentes espessuras de chapa para a temperatura de 20 [°C].

Analisando os gráficos da Figura 41 pode-se concluir que para a temperatura ambiente a espessura da chapa é um fator determinante no aumento da resistência da ligação tanto para distâncias e_l de 10 [mm] como para 20 [mm]. Os valores destes podem ser confirmados na seguinte Tabela 13 onde são apresentados os valores da carga suportada para um deslocamento de 3 [mm] e a carga máxima suportada pela ligação para a temperatura de 20 [°C].

Tabela 13- Resultados da carga máxima [kN] antes de se obter 3 [mm] de deslocamento e para o deslocamento de 3 [mm] para os provetes de diferentes espessuras a 20 [°C].

| Ref | P_max | P_3mm | Modo de Falha |
|------------------|--------------|--------------|----------------------|
| 280_05_05_10_T20 | 1.1973 | 1.0080 | BFM |
| 280_10_10_10_T20 | 3.1731 | 3.1641 | BFM |
| 280_05_05_20_T20 | 1.2564 | 0.7678 | BFM + TFM |
| 280_10_10_20_T20 | 3.4953 | 3.4191 | BFM + TFM |

Na Figura 42 são apresentados os resultados obtidos para a temperatura de 200 [°C] onde se verifica novamente que os provetes com espessura de 1 [mm] apresentam resultados bastante elevados comparados com os resultados dos provetes de 0.5 [mm] de espessura.

Na Tabela 14 são apresentados os valores da carga suportada para um deslocamento de 3 [mm] e a carga máxima suportada pela ligação para a temperatura de 200 [°C].

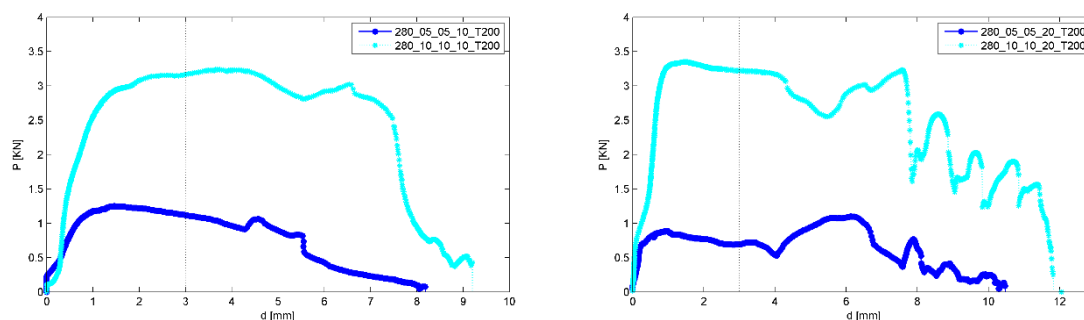


Figura 42- Gráficos força versus deslocamento dos provetes com diferentes espessuras de chapa para a temperatura de 200 [°C].

Tabela 14- Resultados da carga máxima [kN] antes de se obter 3 [mm] de deslocamento e para o deslocamento de 3 [mm] para os provetes de diferentes espessuras a 200 [°C].

| Ref | P_max | P_3mm | Modo de Falha |
|-------------------|--------------|--------------|----------------------|
| 280_05_05_10_T200 | 1.2510 | 1.1184 | BFM |
| 280_10_10_10_T200 | 3.2375 | 3.1648 | BFM |
| 280_05_05_20_T200 | 1.1006 | 0.6926 | BFM + TFM |
| 280_10_10_20_T200 | 3.3503 | 3.2214 | BFM + TFM |

Na seguinte Figura 43 e Tabela 15 são exibidos os resultados obtidos para os provetes testados à temperatura de 500 [°C]. A esta temperatura já se verifica uma perda considerável

da resistência da ligação quer nos provetes de espessura 0.5 [mm] como nos de 1 [mm]. Mais uma vez verifica-se que os provetes de espessura superior se apresentam mais resistentes.

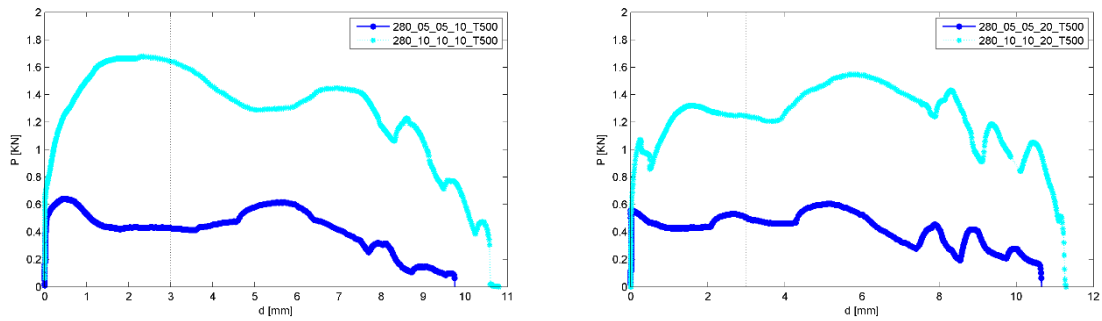


Figura 43- Gráficos força versus deslocamento dos provetes com diferentes espessuras de chapa para a temperatura de 500 [°C].

Tabela 15- Resultados da carga máxima [kN] antes de se obter 3 [mm] de deslocamento e para o deslocamento de 3 [mm] para os provetes de diferentes espessuras a 500 [°C].

| Ref | P_max | P_3mm | Modos de Falha |
|-------------------|--------|--------|----------------|
| 280_05_05_10_T500 | 0.6389 | 0.4286 | BFM |
| 280_10_10_10_T500 | 1.6805 | 1.6429 | BFM |
| 280_05_05_20_T500 | 0.6067 | 0.5047 | BFM + TFM |
| 280_10_10_20_T500 | 1.5463 | 1.2456 | BFM + TFM |

Para a temperatura de 800 [°C] verifica-se uma perda quase total da resistência da ligação quando comparada com os resultados dos ensaios à temperatura ambiente. Contudo verifica-se que a ligação mais resistente continua a ser a que apresenta espessura superior, isto pode ser comprovado através das seguintes Figura 44 e Tabela 16.

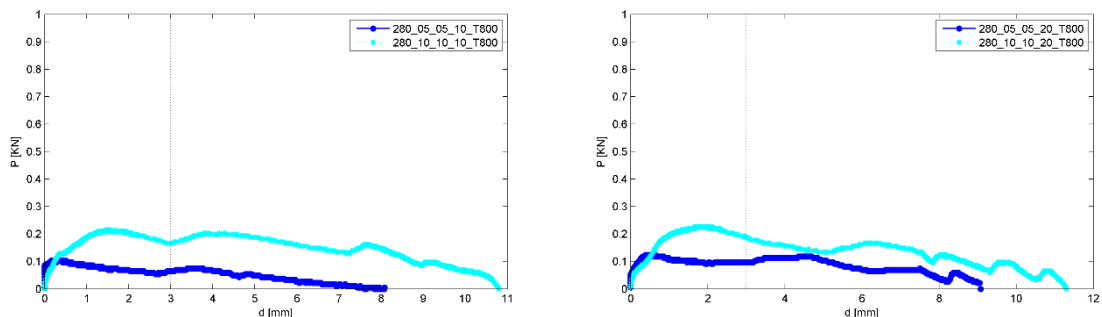


Figura 44- Gráficos força versus deslocamento dos provetes com diferentes espessuras de chapa para a temperatura de 800 [°C].

Tabela 16- Resultados da carga máxima [kN] antes de se obter 3 [mm] de deslocamento e para o deslocamento de 3 [mm] para os provetes de diferentes espessuras a 800 [°C].

| Ref | P_max | P_3mm | Modo de Falha |
|-------------------|--------------|--------------|----------------------|
| 280_05_05_10_T800 | 0.1020 | 0.0644 | BFM |
| 280_10_10_10_T800 | 0.2148 | 0.1664 | BFM |
| 280_05_05_20_T800 | 0.1235 | 0.0966 | BFM + TFM |
| 280_10_10_20_T800 | 0.2255 | 0.1902 | BFM + TFM |

Observando os gráficos acima apresentados pode-se concluir que a espessura da chapa utilizada é um fator que influencia significativamente a resistência da ligação em estudo. Comparando os resultados dos provetes com espessuras de chapa de 0.5 [mm] com os de 1 [mm] pode-se comprovar, que o aumento da espessura para o dobro corresponde de forma geral ao aumento de 50% da resistência da ligação. No que diz respeito à influência da temperatura verifica-se uma perda de resistência com o seu aumento, contudo, a resistência da ligação de maior espessura atinge na maioria dos casos o dobro da resistência da ligação de menor espessura.

Da análise dos resultados verifica-se que a variação da espessura da chapa para os provetes comparados anteriormente, é um fator que não influencia o modo de falha da ligação. Dos ensaios analisados verificou-se que quando é utilizado um $e_l = 10$ [mm] o modo de falha mais frequente é devido ao esmagamento da chapa, enquanto que para um $e_l = 20$ [mm] o modo de rotura é sempre devido ao esmagamento da chapa mais rotação/escorregamento do parafuso. Na Figura 45, Figura 46 e Figura 47 são apresentados os provetes com referência 280_10_10_10 e 280_10_10_20 após ensaio à temperatura de 20, 500 e 800 onde é possível verificar os dois modos de rotura anteriormente abordados.



Figura 45- Apresentação do modo de rotura após ensaio à temperatura 20 [°C], a) provete 280_10_10_10_T20 (BFM), b) 280_10_10_20_T20 (BFM + TFM).

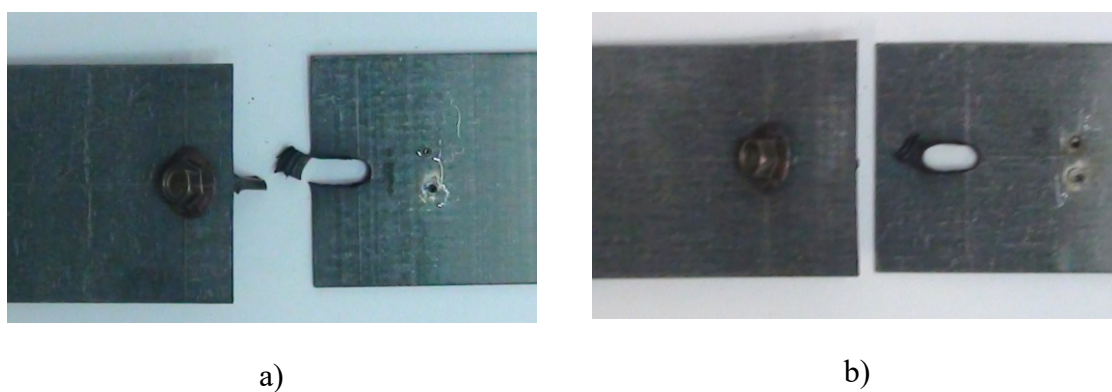


Figura 46- Apresentação do modo de rotura após ensaio à temperatura 500 [°C], a) provete 280_10_10_10_T500 (BFM), b) 280_10_10_20_T500 (BFM + TFM).

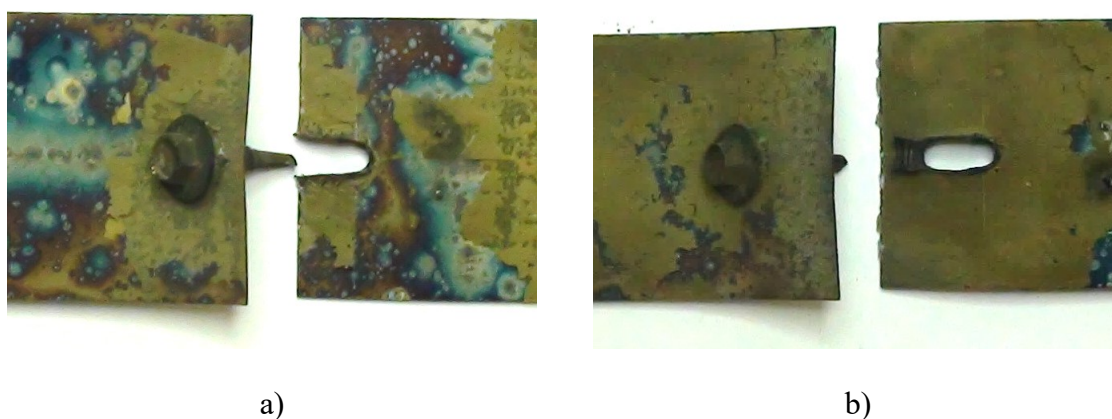


Figura 47- Apresentação do modo de rotura após ensaio à temperatura 500 [°C], a) provete 280_10_10_10_T800 (BFM), b) 280_10_10_20_T800 (BFM + TFM).

5.3.4 Influência do efeito de bordo na resistência da ligação

Um dos fatores mais pragmáticos no estudo de ligações é o efeito de bordo. O efeito de bordo consiste no efeito causado na resistência da ligação quando se aumenta a distância da furação ao bordo da chapa. Através desta análise pretende-se avaliar a distância ideal da furação (denominada e_1 , ver Figura 9) ao bordo de modo a aumentar a resistência da ligação.

Neste estudo foram realizados ensaios com diferentes distâncias e_1 , utilizando-se os valores de 10, 15 e 20 [mm]. Os resultados apresentados nesta secção consideram a análise da influência da distância de bordo na resistência da ligação.

A Figura 48 apresenta os resultados obtidos para os provetes com referência 250_10_10 para as diferentes temperaturas e diferentes e_1 . Como é possível verificar através dos gráficos apresentados, a distância da furação ao bordo, ao contrario que era esperado não é um fator determinante na resistência da ligação. Para a temperatura de 20 [°C] o provete com e_1 de 20 [mm] é o que apresenta maior resistência, contudo, tal não se verifica para outras temperaturas como por exemplo à temperatura de 400 [°C] onde apresenta piores resultados.

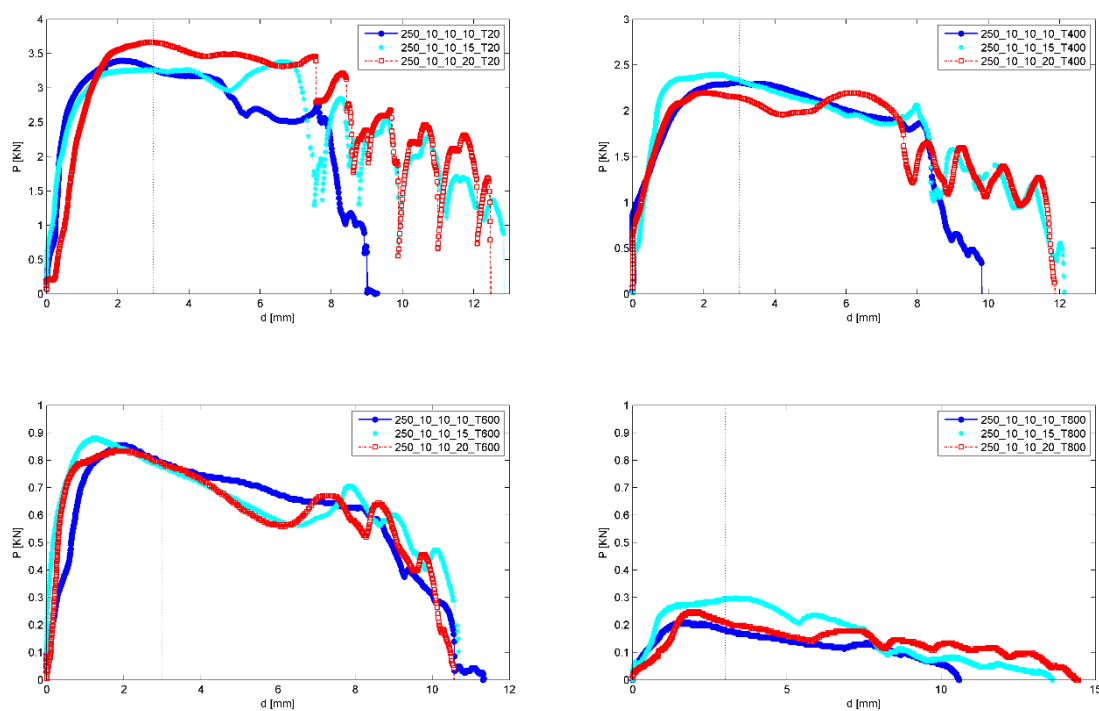


Figura 48- Gráficos de resultados dos provetes com referência 250_10_10 com diferentes distâncias e_1 para as temperaturas de 20, 400, 600 e 800 [°C].

Na Tabela 17 podem ser observados com mais detalhe os resultados obtidos para os ensaios apresentados na Figura 48, carga suportada para um deslocamento de 3 [mm], carga máxima suportada pela ligação e respectivos modos de falha.

Tabela 17- Tabela de resultados da carga máxima antes de se obter 3 [mm] de deslocamento e para o deslocamento de 3 [mm] para os provetes com referência 250_10_10 a 20, 400, 600 e 800 [°C].

| Ref | P_max | P_3mm | Modo de Falha |
|-------------------|--------------|--------------|----------------------|
| 250_10_10_10_T20 | 3.3986 | 3.2730 | BFM |
| 250_10_10_15_T20 | 3.3825 | 3.2590 | BFM + TFM |
| 250_10_10_20_T20 | 3.6671 | 3.6617 | BFM + TFM |
| 250_10_10_10_T400 | 2.3141 | 2.3139 | BFM |
| 250_10_10_15_T400 | 2.3946 | 2.3348 | BFM + TFM |
| 250_10_10_20_T400 | 2.2013 | 2.1447 | BFM + TFM |
| 250_10_10_10_T600 | 0.8537 | 0.7893 | BFM |
| 250_10_10_15_T600 | 0.8805 | 0.7736 | BFM + TFM |
| 250_10_10_20_T600 | 0.8376 | 0.7893 | BFM + TFM |
| 250_10_10_10_T800 | 0.2094 | 0.1825 | BFM |
| 250_10_10_15_T800 | 0.3007 | 0.2953 | BFM |
| 250_10_10_20_T800 | 0.2470 | 0.2094 | BFM + TFM |

A Figura 49 apresenta os graficos força versus deslocamento para os provetes de classe de chapa SGD280 e espessura 1 [mm]. Como é possível verificar através dos resultados, mais uma vez as ligações com *e/l* superior nem sempre apresenta a maior resistência. O mesmo pode ser observado na Figura 50 para os provetes com referência 350_10_10 onde novamente se verifica que os provetes que apresentam maior resistência não são os provetes com *e/l* de 20 [mm] com a exceção das temperaturas de 20 e 800 [°C].

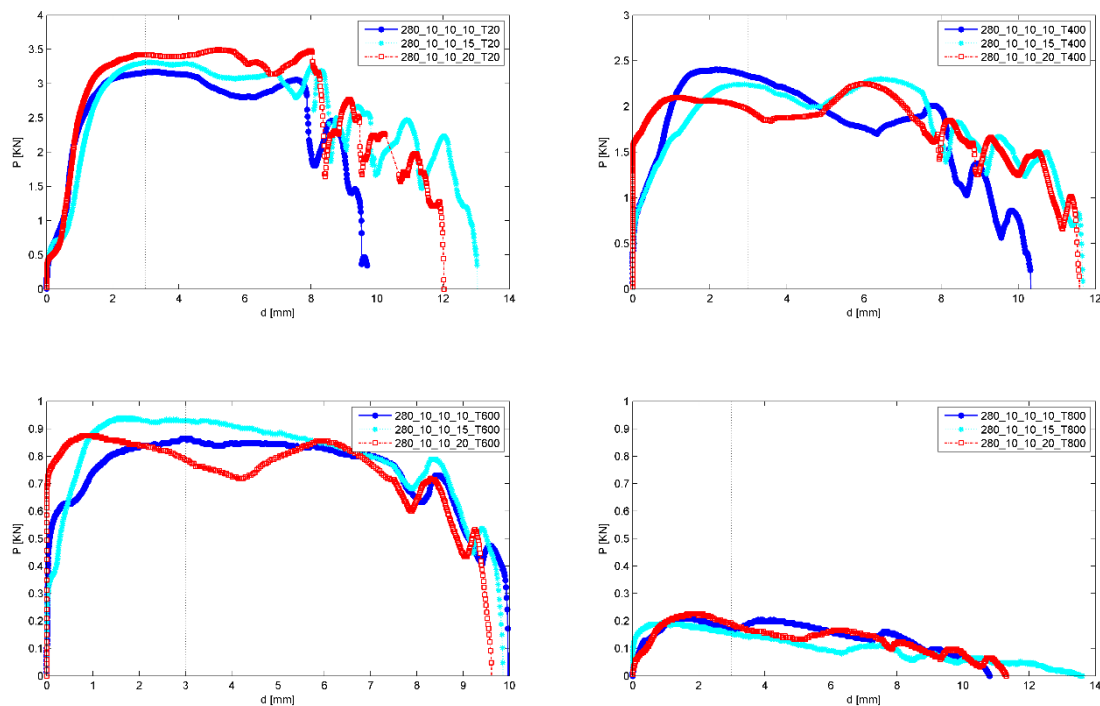


Figura 49- Gráficos de resultados dos provetes com referência 280_10_10 com diferentes distâncias e_l para as temperaturas de 20, 400, 600 e 800 [°C].

A Tabela 18 e Tabela 19 apresentam os resultados obtidos e respectivos modos de falha para os provetes apresentados na Figura 49 e Figura 50.

Tabela 18- Tabela de resultados da carga máxima antes de se obter 3 [mm] de deslocamento e para o deslocamento de 3 [mm] para os provetes com referência 280_10_10 a 20, 400, 600 e 800 [°C].

| Ref | P_max | P_3mm | Modo de Falha |
|-------------------|--------|--------|---------------|
| 280_10_10_10_T20 | 3.1731 | 3.1641 | BFM |
| 280_10_10_15_T20 | 3.3127 | 3.3127 | BFM + TFM |
| 280_10_10_20_T20 | 3.4953 | 3.4191 | BFM + TFM |
| 280_10_10_10_T400 | 2.4053 | 2.3358 | BFM |
| 280_10_10_15_T400 | 2.3033 | 2.2374 | BFM + TFM |
| 280_10_10_20_T400 | 2.2496 | 1.9656 | BFM + TFM |
| 280_10_10_10_T600 | 0.8644 | 0.8636 | BFM |
| 280_10_10_15_T600 | 0.9396 | 0.9288 | BFM |
| 280_10_10_20_T600 | 0.8752 | 0.7869 | BFM + TFM |
| 280_10_10_10_T800 | 0.2148 | 0.1664 | BFM |
| 280_10_10_15_T800 | 0.1933 | 0.1557 | BFM + TFM |
| 280_10_10_20_T800 | 0.2255 | 0.1902 | BFM + TFM |

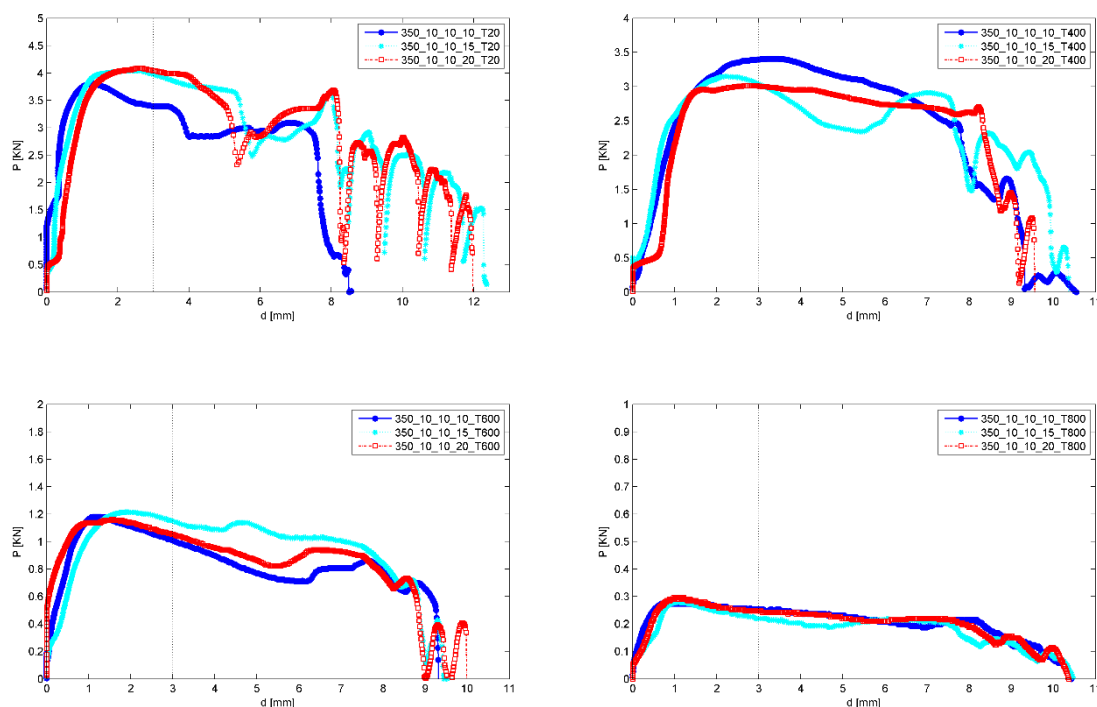


Figura 50- Gráficos de resultados dos provetes com referência 350_10_10 com diferentes distâncias e_1 para as temperaturas de 20, 400, 600 e 800 [°C].

Tabela 19- Tabela de resultados da carga máxima [kN]antes de se obter 3 [mm] de deslocamento e para o deslocamento de 3 [mm] para os provetes com referência 350_10_10 a 20, 400, 600 e 800 [°C].

| Ref | P_max | P_3mm | Modo de Falha |
|-------------------|--------|--------|---------------|
| 350_10_10_10_T20 | 3.8067 | 3.3983 | BFM |
| 350_10_10_15_T20 | 4.0536 | 3.9778 | BFM + TFM |
| 350_10_10_20_T20 | 4.0859 | 4.0412 | BFM + TFM |
| 350_10_10_10_T400 | 3.4094 | 3.3986 | BFM |
| 350_10_10_15_T400 | 3.1516 | 3.0372 | BFM + TFM |
| 350_10_10_20_T400 | 3.0120 | 3.0072 | BFM + TFM |
| 350_10_10_10_T600 | 1.1812 | 1.0078 | BFM |
| 350_10_10_15_T600 | 1.2188 | 1.1493 | BFM + TFM |
| 350_10_10_20_T600 | 1.1597 | 1.0523 | BFM + TFM |
| 350_10_10_10_T800 | 0.2792 | 0.2523 | BFM |
| 350_10_10_15_T800 | 0.2846 | 0.2201 | BFM |
| 350_10_10_20_T800 | 0.2953 | 0.2470 | BFM + TFM |

Através da análise das figuras e tabelas, anteriormente apresentadas, pode-se verificar que para a temperatura ambiente, a ligação que apresenta maior resistência é a que possui

uma distância e_l igual a 20 [mm]. No entanto, para os ensaios a temperaturas mais elevadas esta deixa de ser a ligação mais resistente verificando-se que a 400 [°C] os provetes com e_l igual a 20 [mm] passam a ser os menos resistentes como se pode verificar através da Figura 48, Figura 49 e Figura 50 nos gráficos referentes a 400 [°C].

Quando se aborda os resultados em função do modo de falha verifica-se que a distância e_l é um fator que influencia o modo de colapso da ligação. Dos resultados verifica-se que na maioria dos casos existe alteração do modo de rotura quando o e_l aumenta de 10 [mm] para 15 [mm] passando do modo de rotura por esmagamento da chapa para rotura devido ao esmagamento da chapa e rotação/escorregamento do parafuso. Já para os ensaios dos provetes 250_10_10 à temperatura de 800 [°C], 280_10_10 à temperatura de 600 [°C] e 350_10_10 à temperatura de 800 [°C] a mudança do modo de rotura verifica-se na transição do e_l de 15 [mm] para 20 [mm].

Na Figura 51 podem ser observados os provetes após ensaio, podendo-se ver os modos de falha mais frequentes. A Figura 52 apresenta os três provetes da classe SGD350 com chapas de 1 [mm] ensaiados a 800 [°C] para as três distâncias ao bordo da chapa.

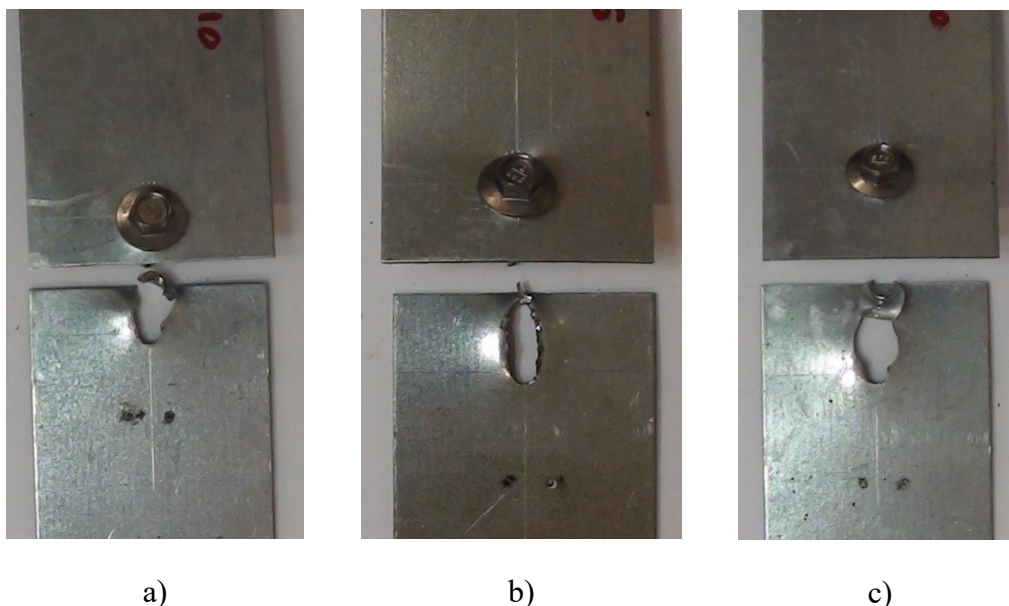


Figura 51- Apresentação do modo de rotura após ensaio à temperatura 200 [°C], a) provete 350_10_10_10_T200 (BFM), b) 350_10_10_15_T200 (BFM + TFM), c) 350_10_10_20_T200 (BFM + TFM).

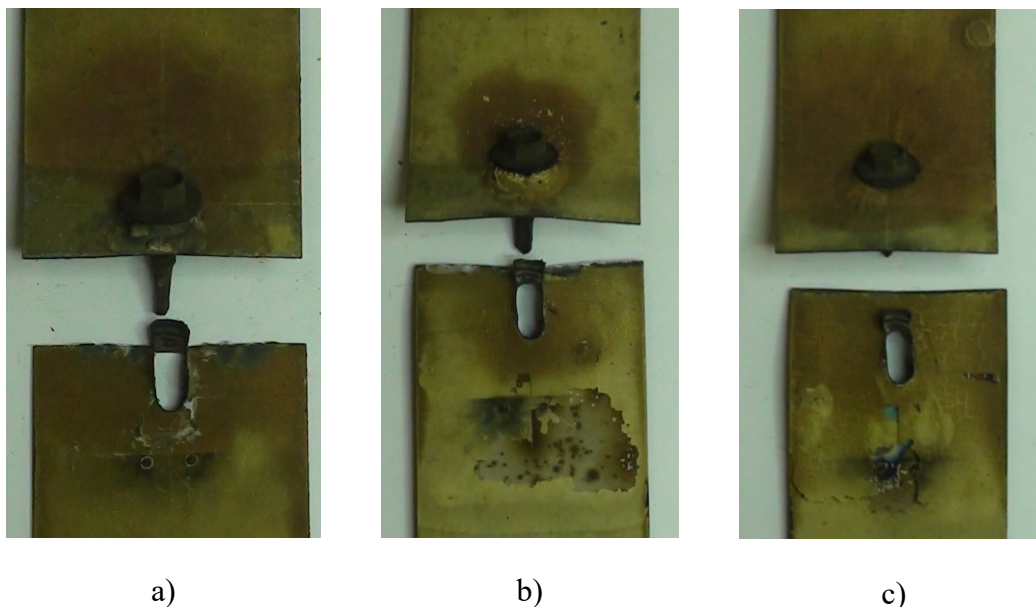


Figura 52- Apresentação do modo de rotura após ensaio à temperatura 800 [°C], a) provete 350_10_10_10_T800 (BFM), b) 350_10_10_15_T800 (BFM + TFM), c) 350_10_10_20_T800 (BFM + TFM).

É também analisado o comportamento da ligação quando se faz a combinação das duas espessuras para a temperatura ambiente e temperaturas elevadas. Na seguinte Figura 53 e Tabela 20 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios.

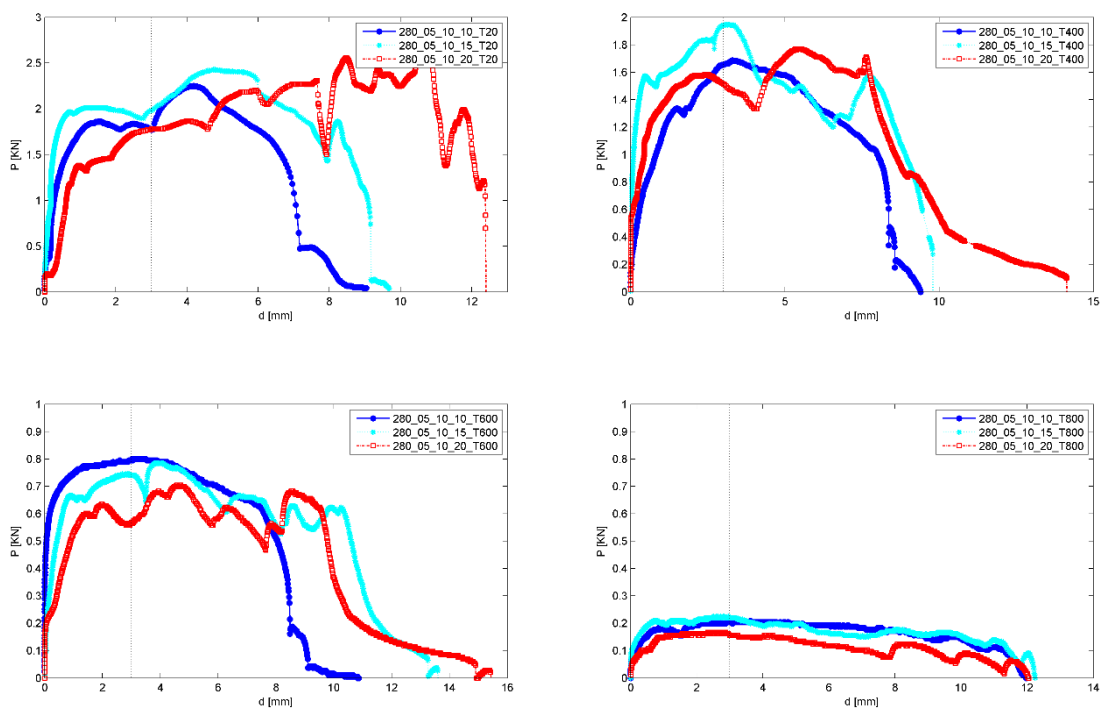


Figura 53- Gráficos de resultados dos provetes com referência 280_05_10 com diferentes distâncias e_l para as temperaturas de 20, 400, 600 e 800 [°C].

Tabela 20- Tabela de resultados da carga máxima [kN] antes de se obter 3 [mm] de deslocamento e para o deslocamento de 3 [mm] para os provetes com combinação de espessuras a 20, 400, 600 e 800 [°C].

| Ref | P_max | P_3mm | Modo de Falha |
|-------------------|--------------|--------------|----------------------|
| 280_05_10_10_T20 | 2.2496 | 1.7725 | BFM |
| 280_05_10_15_T20 | 2.4268 | 1.9811 | BFM |
| 280_05_10_20_T20 | 2.5825 | 1.7772 | BFM + TFM |
| 280_05_10_10_T400 | 1.6859 | 1.6537 | BFM |
| 280_05_10_15_T400 | 1.9490 | 1.9432 | BFM |
| 280_05_10_20_T400 | 1.7664 | 1.5159 | BFM |
| 280_05_10_10_T600 | 0.8000 | 0.7964 | BFM |
| 280_05_10_15_T600 | 0.7839 | 0.7409 | BFM |
| 280_05_10_20_T600 | 0.7033 | 0.5638 | BFM + TFM |
| 280_05_10_10_T800 | 0.2094 | 0.2040 | BFM |
| 280_05_10_15_T800 | 0.2255 | 0.2201 | BFM + TFM |
| 280_05_10_20_T800 | 0.1664 | 0.1557 | BFM + TFM |

Comparando os resultados dos provetes com combinação de chapas, com os resultados dos provetes de chapas de igual espessura, verifica-se uma ligeira perda de resistência como era de esperar. É possível também averiguar que neste tipo de ligação, a ligação cuja distância da furação ao bordo da chapa é maior, nem sempre é a mais resistente sendo a que apresenta piores resultados.

No que se refere ao modo de rotura da ligação pode-se verificar pela Tabela 20 que de forma geral o modo de rotura segue o mesmo padrão que os ensaios realizados para provetes com igual espessura de chapa. Contudo é necessário realizar mais ensaios para a temperatura de 400 de forma a perceber se os modos de falha ocorridos nesta gama de temperatura se mantêm.

Na seguinte Figura 54 é possível observar os resultados do ensaio a 800 [°C] do provete 280_05_10 para diferentes distâncias e_l .

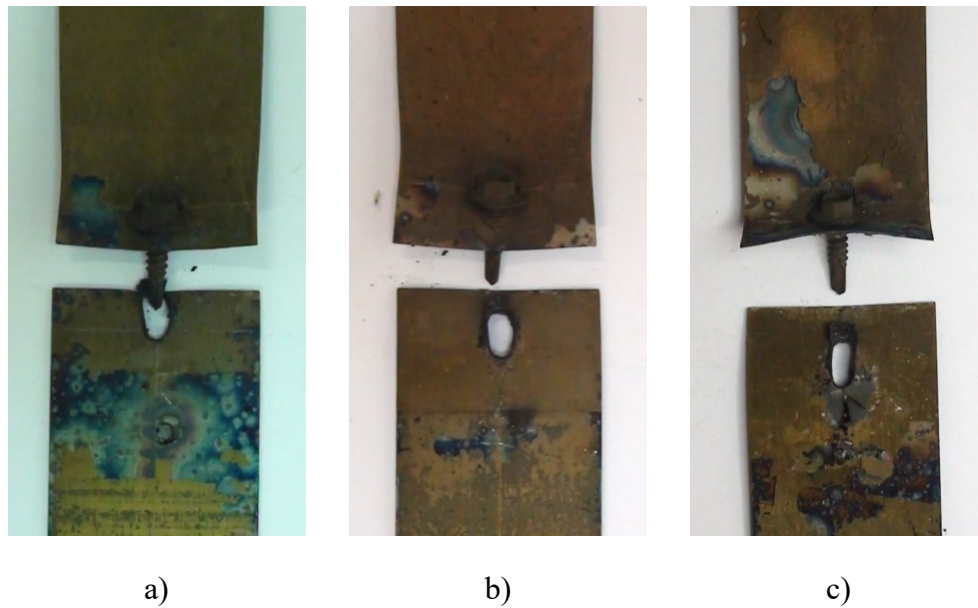


Figura 54- Apresentação do modo de rotura após ensaio à temperatura 800 [°C], a) provete 280_05_10_10_T800 (BFM), b) 280_05_10_15_T800 (BFM + TFM), c) 280_05_10_20_T800 (BFM + TFM).

5.3.5 Influência da temperatura na resistência da ligação

Pelos resultados apresentados anteriormente ficou claro que o efeito da temperatura é um dos parâmetros que influencia de modo significativo a resistência das ligações. Tendo em consideração que o aumento da temperatura é a principal causa da perda das propriedades mecânicas dos componentes da ligação torna-se necessário quantificar esta diminuição.

Os resultados serão apresentados para os provetes que se encontram na Tabela 21, Tabela 22, Tabela 23, Tabela 24, Tabela 25 e Tabela 26 considerando todas as temperaturas analisadas experimentalmente.

Como era de esperar a temperatura representa um fator que põem em causa a resistência da ligação. A Figura 55 e Figura 56 apresentam os resultados para os provetes com espessura de chapa 0.5 [mm] e com classe de chapa SDG 280 e SGD 320 respetivamente. Pode-se observar nas figuras que a temperatura provoca uma perda acentuada de resistência da ligação obtendo-se aproximadamente apenas 50 % da resistência da ligação a 500 [°C].

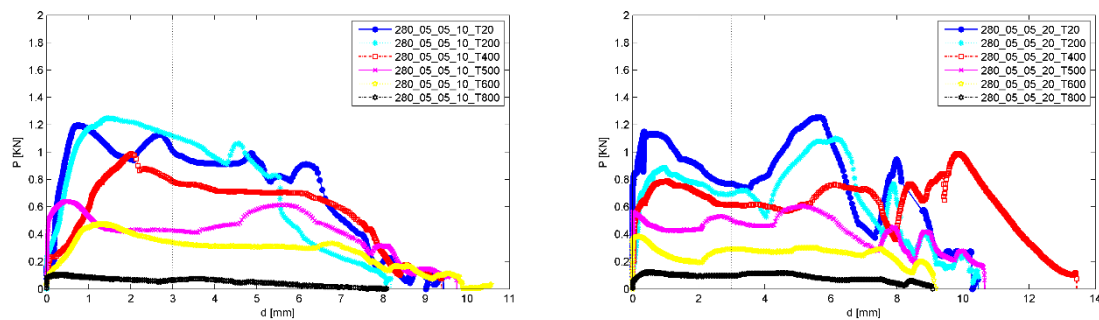


Figura 55- Gráficos de resultados dos provetes com referência 280_05_05_10 e 280_05_05_20 com distâncias e_1 igual a 10 e 20 [mm] para as temperaturas de 20, 200, 400, 600, 500 e 800 [°C].

Tabela 21- Resultados da carga máxima [kN] antes e para o deslocamento de 3 [mm] dos provetes com espessura de 0,5 [mm] das classes de chapa SGD 280.

| Ref | P_max | P_3mm | Modo de Falha |
|-------------------|--------|--------|---------------|
| 280_05_05_10_T20 | 1.1973 | 1.0080 | BFM |
| 280_05_05_10_T200 | 1.2510 | 1.1184 | BFM |
| 280_05_05_10_T400 | 0.9879 | 0.7855 | BFM |
| 280_05_05_10_T500 | 0.6389 | 0.4286 | BFM |
| 280_05_05_10_T600 | 0.4725 | 0.3383 | BFM |
| 280_05_05_10_T800 | 0.1020 | 0.0644 | BFM |
| 280_05_05_20_T20 | 1.2564 | 0.7678 | BFM + TFM |
| 280_05_05_20_T200 | 1.1006 | 0.6926 | BFM + TFM |
| 280_05_05_20_T400 | 0.9879 | 0.6145 | BFM + TFM |
| 280_05_05_20_T500 | 0.6067 | 0.5047 | BFM + TFM |
| 280_05_05_20_T600 | 0.3866 | 0.2899 | BFM |
| 280_05_05_20_T800 | 0.1235 | 0.0966 | BFM + TFM |

Para os ensaios realizados a 200 [°C] verifica-se um aumento imprevisto da resistência da ligação nos provetes com e_1 de 10 [mm], nos provetes com e_1 de 20 [mm] esse aumento não se verifica, contudo, a perda de resistência não é tão acentuada como para as outras temperaturas. Na Tabela 21 e Tabela 22 são apresentados os resultados dos ensaios apresentados pelas Figura 55 e Figura 56 assim como os respectivos modos de falha.

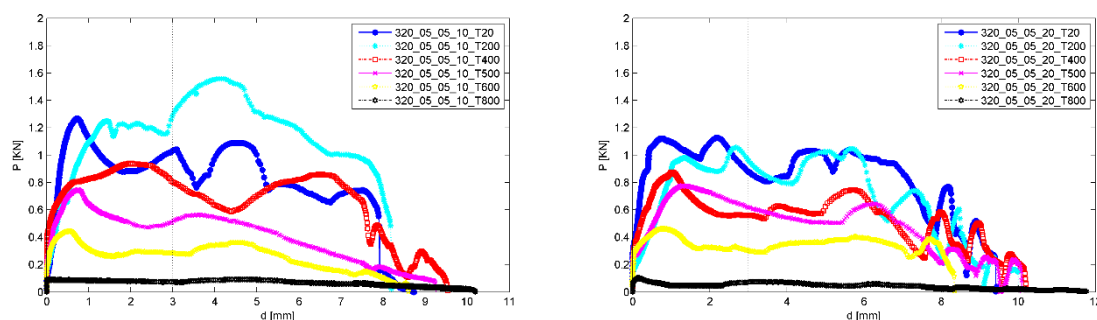


Figura 56- Gráficos de resultados dos provetes com referência 320_05_05_10 e 320_05_05_20 com distâncias e_l igual a 10 e 20 [mm] para as temperaturas de 20, 200, 400, 600, 500 e 800 [°C].

Tabela 22- Resultados da carga máxima [kN] antes e para o deslocamento de 3 [mm] dos provetes com espessura de 0,5 [mm] das classes de chapa SGD 320.

| Ref | P_max | P_3mm | Modo de Falha |
|-------------------|--------|--------|---------------|
| 320_05_05_10_T20 | 1.2671 | 1.0327 | BFM |
| 320_05_05_10_T200 | 1.5570 | 1.2918 | BFM |
| 320_05_05_10_T400 | 0.9396 | 0.8028 | BFM |
| 320_05_05_10_T500 | 0.7463 | 0.5160 | BFM |
| 320_05_05_10_T600 | 0.4456 | 0.2846 | BFM |
| 320_05_05_10_T800 | 0.0913 | 0.0752 | BFM |
| 320_05_05_20_T20 | 1.1275 | 0.8791 | BFM + TFM |
| 320_05_05_20_T200 | 1.0577 | 0.9621 | BFM + TFM |
| 320_05_05_20_T400 | 0.8752 | 0.5584 | BFM + TFM |
| 320_05_05_20_T500 | 0.7785 | 0.6174 | BFM + TFM |
| 320_05_05_20_T600 | 0.4617 | 0.3050 | BFM + TFM |
| 320_05_05_20_T800 | 0.1020 | 0.0726 | BFM + TFM |

Analisando os gráficos da influência da temperatura para os provetes com espessura de 1 [mm], Figura 57 e Figura 58, verifica-se a perda de resistência com o aumento da temperatura como era previsível.

Mais uma vez é visível que a 200 [°C] os resultados dos ensaios não apresentem valores esperados. Ao contrario dos provetes com espessura de 0.5 [mm] e com e_l de 10 [mm] não se verifica um aumento de resistência mantendo-se o gráfico de resultados muito próximo dos resultados obtidos para a temperatura ambiente.

A Tabela 23 e Tabela 24 apresenta os resultados dos ensaios apresentados pelas Figura 57 e Figura 58 assim como os respectivos modos de falha.

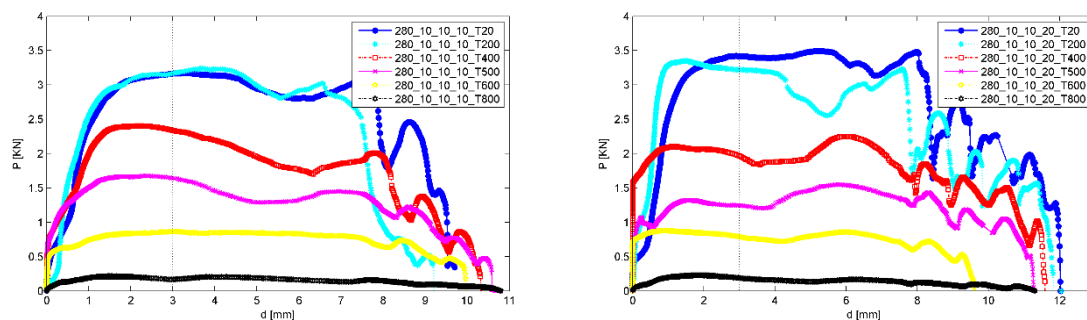


Figura 57- Gráficos de resultados dos provetes com referência 280_10_10_10 e 280_10_10_20 com distâncias e_l igual a 10 e 20 [mm] para as temperaturas de 20, 200, 400, 600, 500 e 800 [°C].

Tabela 23- Resultados da carga máxima antes e para o deslocamento de 3 [mm] dos provetes com espessura de 1 [mm] das classes de chapa SGD 280.

| Ref | P_max | P_3mm | Modo de Falha |
|-------------------|--------|--------|---------------|
| 280_10_10_10_T20 | 3.1731 | 3.1641 | BFM |
| 280_10_10_10_T200 | 3.2375 | 3.1648 | BFM |
| 280_10_10_10_T400 | 2.4053 | 2.3358 | BFM |
| 280_10_10_10_T500 | 1.6805 | 1.6429 | BFM |
| 280_10_10_10_T600 | 0.8644 | 0.8636 | BFM |
| 280_10_10_10_T800 | 0.2148 | 0.1664 | BFM |
| 280_10_10_20_T20 | 3.4953 | 3.4191 | BFM + TFM |
| 280_10_10_20_T200 | 3.3503 | 3.2214 | BFM + TFM |
| 280_10_10_20_T400 | 2.2496 | 1.9656 | BFM + TFM |
| 280_10_10_20_T500 | 1.5463 | 1.2456 | BFM + TFM |
| 280_10_10_20_T600 | 0.8752 | 0.7869 | BFM + TFM |
| 280_10_10_20_T800 | 0.2255 | 0.1902 | BFM + TFM |

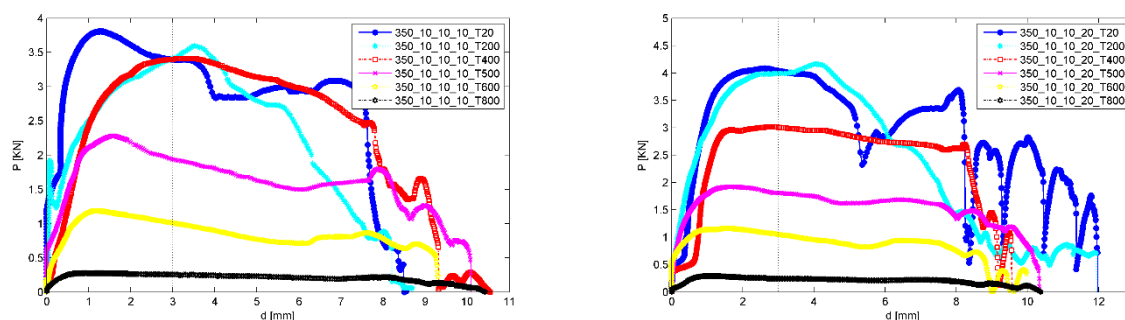


Figura 58- Gráficos de resultados dos provetes com referência 350_10_10_10 e 350_10_10_20 com distâncias e_l igual a 10 e 20 [mm] para as temperaturas de 20, 200, 400, 600, 500 e 800 [°C].

Tabela 24- Resultados da carga máxima antes e para o deslocamento de 3 [mm] dos provetes com espessura de 1 [mm] das classes de chapa SGD 350.

| Ref | P_max | P_3mm | Modo de Falha |
|-------------------|--------|--------|---------------|
| 350_10_10_10_T20 | 3.8067 | 3.3983 | BFM |
| 350_10_10_10_T200 | 3.5973 | 3.4147 | BFM |
| 350_10_10_10_T400 | 3.4094 | 3.3986 | BFM |
| 350_10_10_10_T500 | 2.2818 | 1.9365 | BFM + TFM |
| 350_10_10_10_T600 | 1.1812 | 1.0078 | BFM + TFM |
| 350_10_10_10_T800 | 0.2792 | 0.2523 | BFM + TFM |
| 350_10_10_20_T20 | 4.0859 | 4.0412 | BFM + TFM |
| 350_10_10_20_T200 | 4.1664 | 3.9946 | BFM + TFM |
| 350_10_10_20_T400 | 3.0120 | 3.0072 | BFM + TFM |
| 350_10_10_20_T500 | 1.9221 | 1.8080 | BFM + TFM |
| 350_10_10_20_T600 | 1.1597 | 1.0523 | BFM + TFM |
| 350_10_10_20_T800 | 0.2953 | 0.2470 | BFM + TFM |

A seguinte Figura 59 e Tabela 25 apresenta-se os resultados obtidos para os ensaios experimentais dos provetes com espessura 1.5 [mm] e classe de chapa SGD 220. Como é possível verificar através da Tabela 25 estes provetes são os que apresentam maior resistência apesar de serem da classe de chapa mais fraca. Tal como para nos outros ensaios realizados o aumento da temperatura traduz-se na perda acentuada da resistência da ligação verificando-se também um aumento da resistência da ligação para os ensaios a 200 [°C].

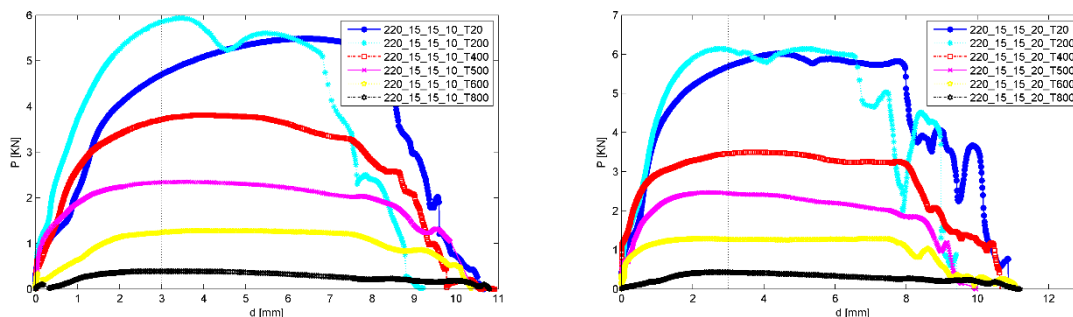


Figura 59- Gráficos de resultados dos provetes com referência 220_15_15_10 e 220_15_15_20 com distâncias e_1 igual a 10 e 20 [mm] para as temperaturas de 20, 200, 400, 600, 500 e 800 [°C].

Tabela 25- Resultados da carga máxima antes e para o deslocamento de 3 [mm] dos provetes com espessura de 1,5 [mm] da classe de chapa SGD 220.

| Ref | P_max | P_3mm | Modo de Falha |
|-------------------|--------|--------|---------------|
| 220_15_15_10_T20 | 5.4872 | 4.7011 | BFM |
| 220_15_15_10_T200 | 5.9382 | 5.8576 | BFM |
| 220_15_15_10_T400 | 3.8067 | 3.7122 | BFM |
| 220_15_15_10_T500 | 2.3516 | 2.3409 | BFM + TFM |
| 220_15_15_10_T600 | 1.2778 | 1.2372 | BFM + TFM |
| 220_15_15_10_T800 | 0.3866 | 0.3866 | BFM + TFM |
| 220_15_15_20_T20 | 6.0187 | 5.6900 | TFM + SFM |
| 220_15_15_20_T200 | 6.1422 | 6.1172 | TFM + SFM |
| 220_15_15_20_T400 | 3.4953 | 3.4628 | BFM + TFM |
| 220_15_15_20_T500 | 2.4698 | 2.4449 | BFM + TFM |
| 220_15_15_20_T600 | 1.2886 | 1.2671 | TFM |
| 220_15_15_20_T800 | 0.4295 | 0.4242 | TFM |

Os resultados obtidos para os provetes com combinação de diferentes espessuras de chapa são apresentados na Figura 60 e Tabela 26 onde se pode verificar o efeito redutor da temperatura na resistência da ligação. Mais uma vez, verifica-se o aumento da resistência da ligação para os ensaios executados a 200 [°C].

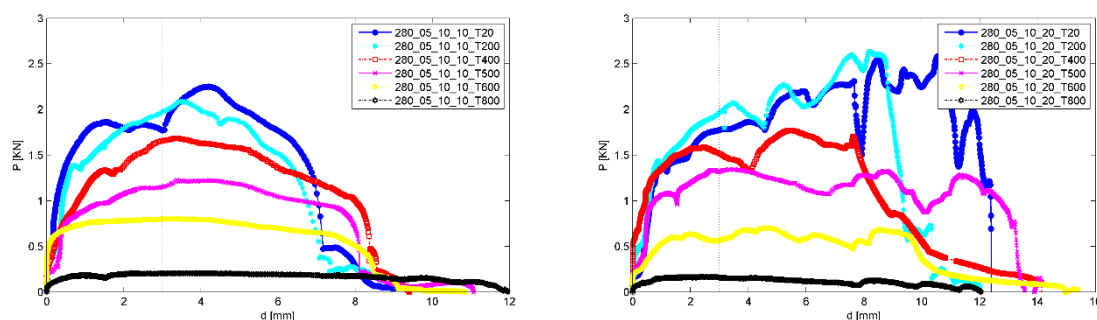


Figura 60- Gráficos de resultados dos provetes com referência 280_05_10_10 e 280_05_10_20 com distâncias e_l igual a 10 e 20 [mm] para as temperaturas de 20, 200, 400, 600, 500 e 800 [°C].

Tabela 26- Resultados da carga máxima antes e para o deslocamento de 3 [mm] dos provetes com combinação de espessura de chapa de 0.5 e 1 [mm] da classe de chapa SGD 280.

| Ref | P_max | P_3mm | Modo de Falha |
|-------------------|--------|--------|---------------|
| 280_05_10_10_T20 | 2.2496 | 1.7725 | BFM |
| 280_05_10_10_T200 | 2.0886 | 1.9739 | BFM |
| 280_05_10_10_T400 | 1.6859 | 1.6537 | BFM |
| 280_05_10_10_T500 | 1.2295 | 1.1530 | BFM |
| 280_05_10_10_T600 | 0.8000 | 0.7964 | BFM |
| 280_05_10_10_T800 | 0.2094 | 0.2040 | BFM |
| 280_05_10_20_T20 | 2.5825 | 1.7772 | BFM + TFM |
| 280_05_10_20_T200 | 2.6362 | 1.9642 | BFM |
| 280_05_10_20_T400 | 1.7664 | 1.5159 | BFM |
| 280_05_10_20_T500 | 1.3423 | 1.3108 | BFM + TFM |
| 280_05_10_20_T600 | 0.7033 | 0.5638 | BFM + TFM |
| 280_05_10_20_T800 | 0.1664 | 0.1557 | BFM + TFM |

Analisando os modos de falha dos ensaios apresentados é possível apurar que a temperatura é um factor que influencia o modo de colapso da ligação, principalmente nos provetes de maior espessura. Apesar de se considerar um factor determinante na alteração do modo de colapso, a mudança do modo de falha com o aumento da temperatura verifica-se nos provetes com espessuras de chapas superiores assim como distâncias e_l maiores. No caso particular do provete 220_15_15_20 obteve-se três modos de falha distintos com o aumento da temperatura. Os três modos de rotura podem ser observados na seguinte Figura 61.

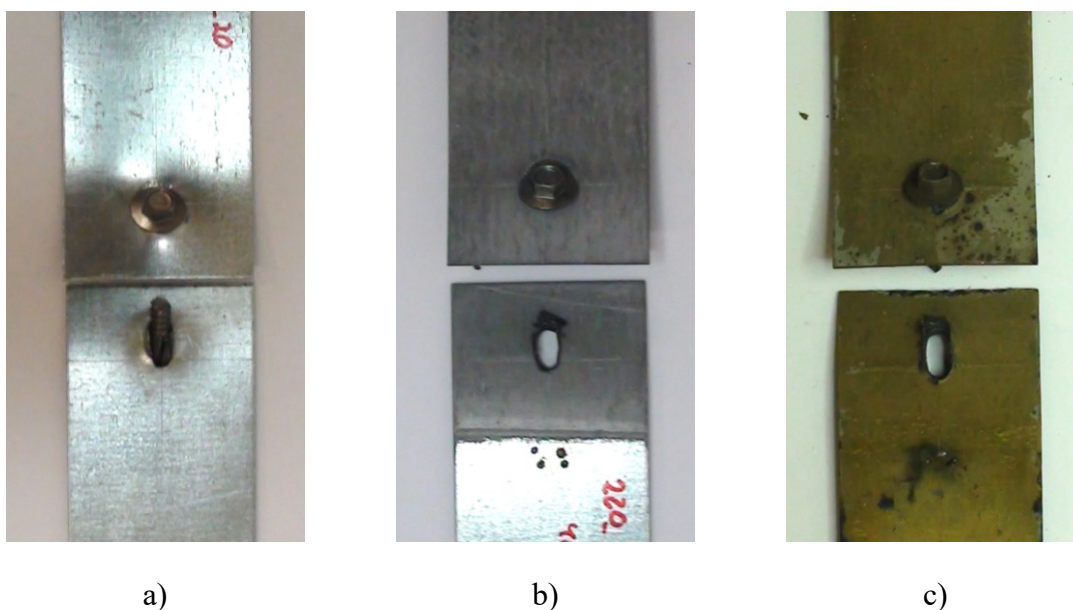


Figura 61- Três modos de falha obtidos para o provete 220_15_15_20 para as temperaturas de 20, 400 e 800 [°C] respectivamente, a) TFM + SFM, b) BFM + TFM, c) BFM.

Como seria expectável, os resultados mostram que a temperatura tem um papel determinante na resistência das ligações. Com base nos resultados dos vários ensaios de provetes em aço enformado a frio a temperaturas elevadas, verifica-se que com o aumento da temperatura existe perda das propriedades mecânicas da ligação uma vez que a carga máxima suportada pela ligação diminui.

Contudo quando analisando o efeito da temperatura em provetes com diferentes classes de chapa, mas com geometrias iguais pode-se concluir que a temperatura afeta todas as classes de igual forma, observando-se a perda gradual de resistência com o aumento da temperatura. Tal pode ser verificado com a comparação da Figura 55 com a Figura 56 e a Figura 57 com a Figura 58, incluindo as respetivas Tabela 22 e Tabela 24. Na Figura 62 e Figura 63 é possível ter maior percepção da perda da resistência com a apresentação da variação do fator de redução com a evolução da temperatura.

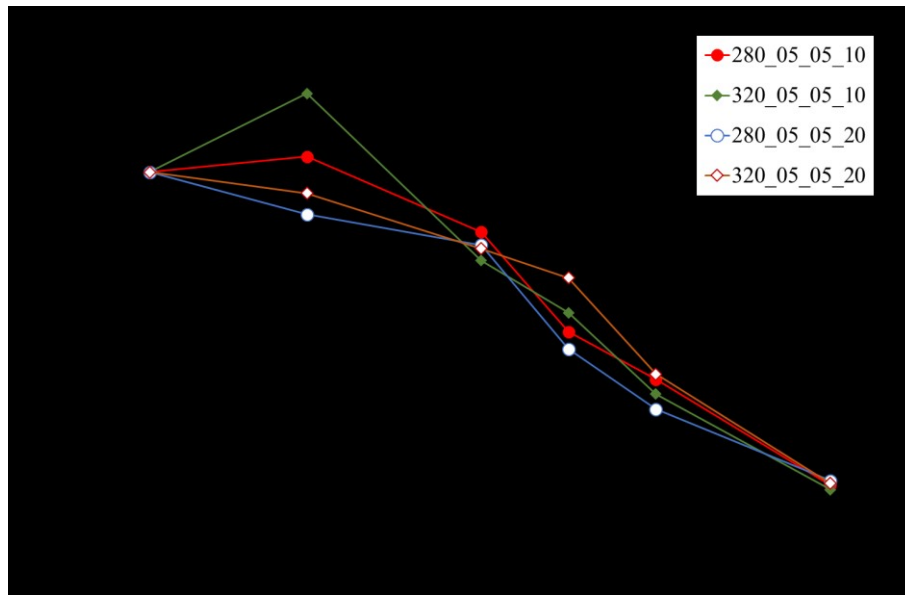


Figura 62- Gráficos do fator de redução para provetes com espessura de chapa de 0.5 [mm] e diferentes classes de chapas e e_1 igual a 10 e 20 [mm].

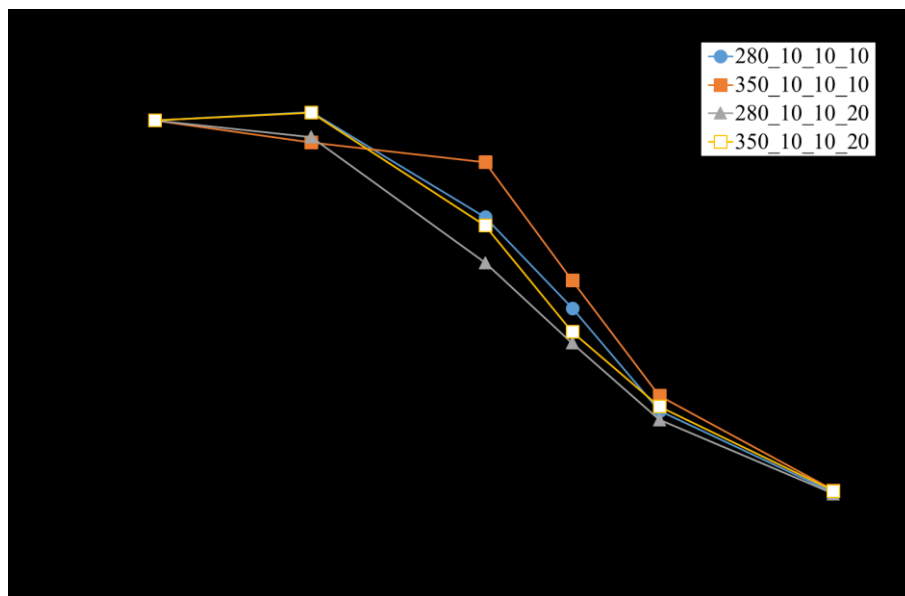


Figura 63- Gráficos do fator de redução para provetes com espessura de chapa de 1 [mm] e diferentes classes de chapas e e_1 igual a 10 e 20 [mm].

No que se refere à distinção por espessura de chapa, na Figura 64 é possível verificar que o efeito da temperatura é igualmente responsável pela perda das propriedades mecânicas, contudo não se destaca qualquer diferença no comportamento geral das ligações.

Já no que toca à influência da distância e_1 na resistência da ligação verifica-se que na maioria dos ensaios nem sempre a resistência é maior nos provetes que tem e_1 igual a vinte milímetros.

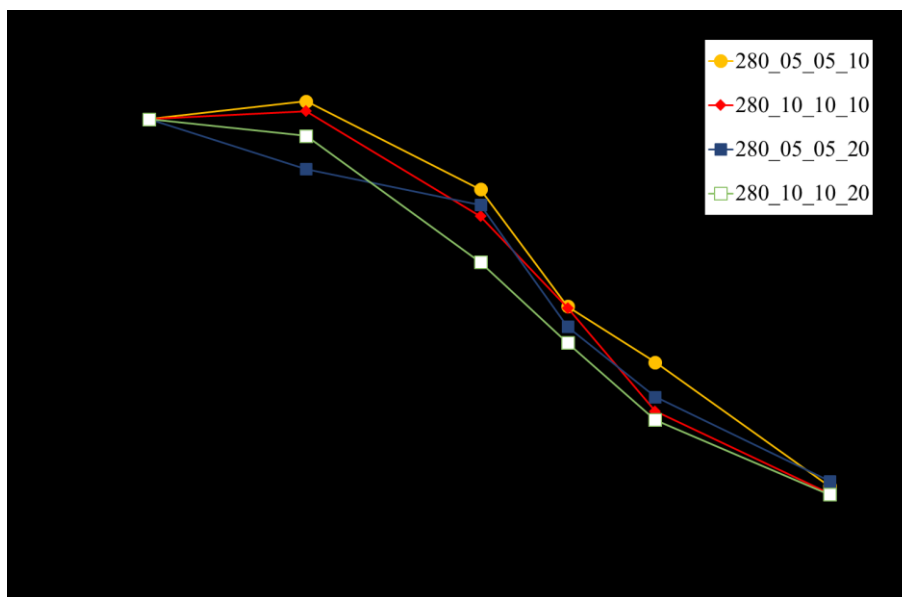


Figura 64- Gráficos do fator de redução para provetes com diferentes espessuras de chapa, iguais classes de chapas e e_1 igual a 10 e 20 [mm].

com o aumento da temperatura o provete vai perdendo resistência mecânica, contudo para a gama de temperaturas de 200 [°C], verifica-se um aumento da resistência. Este aumento pode ser observado tanto nos gráficos como nas tabelas acima apresentadas destacando-se a Figura 59 onde se observa um maior aumento da resistência.

Vários autores já se debruçaram sobre este fenómeno como é o caso de Nirosha e Mahen [10] que realizaram uma análise detalhada a todas as propriedades mecânicas do aço nomeadamente em chapas de aço conformadas a frio a temperatura elevadas. Este refere que esta alteração pode ser atribuída a transformações que ocorrem na estrutura base do aço sendo mais visível a temperaturas mais baixas.

Também Craveiro, [25] ,refere o aumento da tensão última para os ensaios de provetes à temperatura de 200°C para os aços de baixa resistência. Tal como o autor anteriormente referido, Craveiro refere que este fenómeno pode estar associado à composição química do aço, que com o aumento da temperatura até os 200°C desencadeia reações químicas que provocam transformações na base do aço levando ao aumento da tensão última. Este também refere que o aumento da temperatura acima dos 200°C retarda essas reações químicas o que resulta numa redução da tensão última, [25].

Ranawaka numa das suas publicações sobre o estudo das propriedades mecânicas do aço de chapas conformadas a frio também faz referência ao aumento da tensão última para provetes de aço enformado a frio de baixa resistência. Este autor refere que este fenómeno é resultante de reações químicas na base do aço devido à presença de pequenos teores de Nitrogénio, [26].

5.4 Comparação dos resultados experimentais com os métodos simplificados

Os resultados obtidos experimentalmente podem ser comparados com as resultantes do método simplificado determinado pelas equações dos Eurocódigos. Esta comparação é realizada para três classes de aço distintas e três espessuras diferentes da chapa de aço. Os resultados da comparação dos restantes casos são apresentados com mais detalhe no Anexo A4. As classes do aço selecionadas são a SGD220, SGD280 e SGD350 com as espessuras 0.5 [mm], 1.0 [mm] e 1,5 [mm] respetivamente para todas as temperaturas e distâncias e_l .

As figuras seguintes apresentam a comparação da força resistente máxima obtida experimentalmente com os valores obtidos pelo Eurocódigo 3 parte 1.8 e parte 1.3 à temperatura ambiente e considerando a metodologia de dimensionamento a temperaturas elevadas. Os valores apresentados consideram os coeficientes de segurança unitários.

Como é possível verificar através da Figura 65 para os provetes da classe de chapas SGD220 e espessura 1.5 [mm] o Eurocódigo 3 parte 1.3 é o que apresenta resultados mais seguros para todas as temperaturas e distâncias e_l . Já a parte 1.8 do Eurocódigo 3 não apresenta valores do lado da segurança para a resistência ao esforço de corte no parafuso.

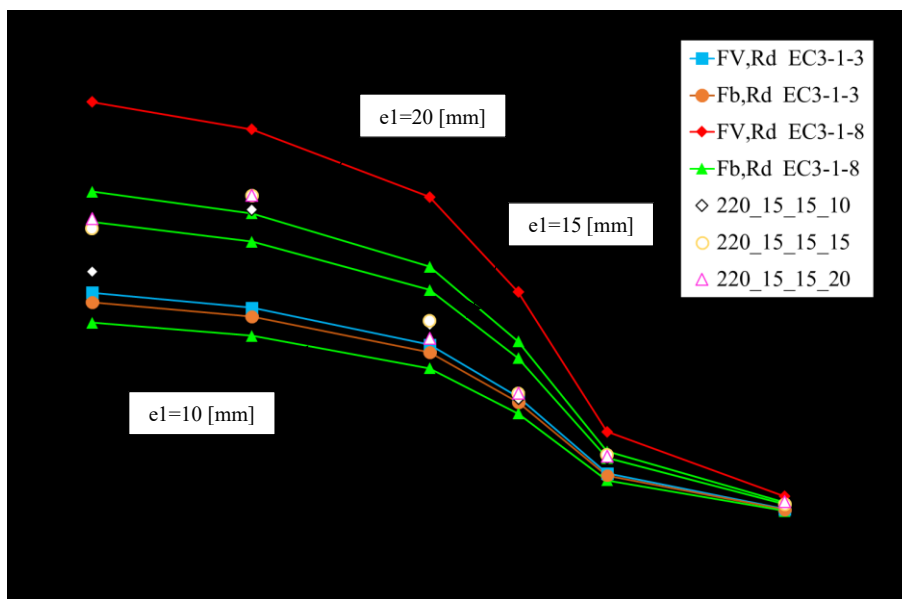


Figura 65- Comparação entre os valores experimentais e os determinados pelo EC3 à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas para os provetes da classe SGD220 e espessura 1.5 [mm].

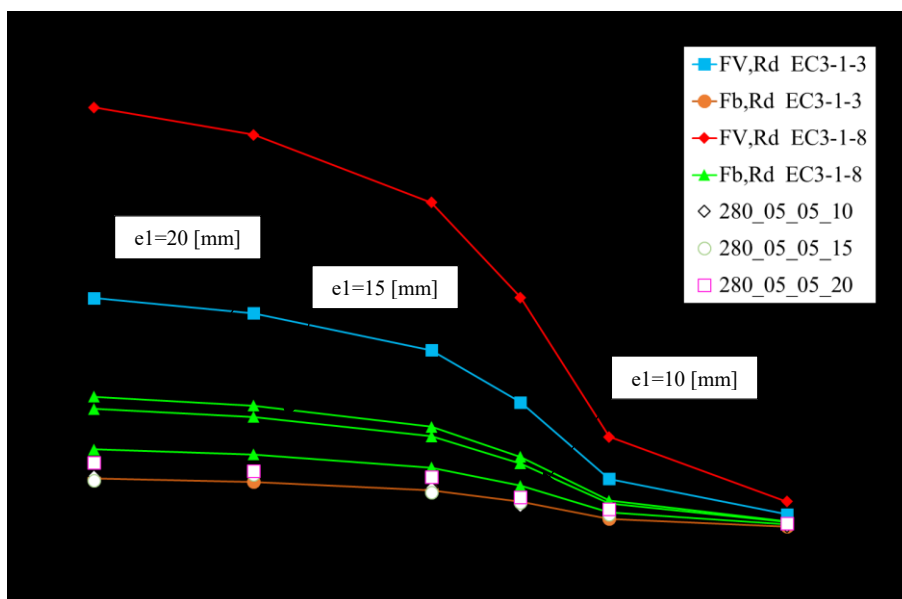


Figura 66- Comparação entre os valores experimentais e os determinados pelo EC3 à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas para os provetes da classe SGD280 e espessura 0.5 [mm].

A Figura 66 apresenta os resultados para os provetes com espessura de 0.5 [mm] e classe de chapas SGD280. Da análise do gráfico é possível mais uma vez verificar que a resistência ao corte do parafuso dada pelo Eurocódigo 3 parte 1.8 encontra-se muito acima

do valor máximo da resistência obtida experimentalmente. De igual forma a parte 1.3 do Eurocódigo 3 apresenta valores que se podem considerar do lado da segurança.

Nos provetes com classe de chapa SGD350 e espessura de 1 [mm] mais uma vez os resultados que se encontram do lado da segurança são os obtidos pelo Eurocódigo 3 parte 1.3 como demonstra a Figura 67.

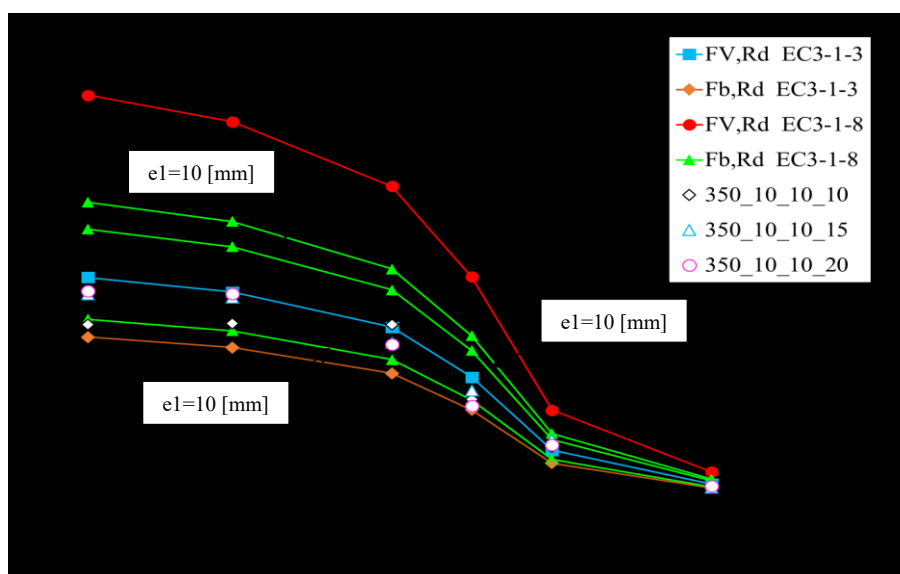


Figura 67- Comparação entre os valores experimentais e os determinados pelo EC3 à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas para os provetes da classe SGD350 e espessura 1 [mm].

Através das figuras acima expostas pode-se concluir que a parte 1.8 do Eurocódigo 3 não apresenta valores que se considerem do lado da segurança, apresentando valores de resistência muito superiores ao que se obteve experimentalmente. Por outro lado, os valores da resistência ao esmagamento obtidos pelo Eurocódigo 3 parte 1.3 são tendencialmente inferiores a todos os resultados obtidos. Desta forma torna-se necessário fazer uma revisão do método de cálculo apresentado pelo Eurocódigo para que esta possa reproduzir de forma mais fiel os resultados experimentais.

Capítulo 6: Conclusões e trabalhos futuros

6.1 Conclusões gerais

O trabalho realizado e apresentado na presente tese incide na análise do comportamento de ligações aparafusadas autoperfurantes de chapas finas a temperaturas elevadas. Foram realizados vários ensaios experimentais, onde se analisou a influência da classe do aço das chapas, a espessura de chapa, a distância da furação ao bordo da chapa e o efeito da temperatura. É também realizado um estudo do comportamento do material do parafuso para diferentes temperaturas. Para a realização dos ensaios dos parafusos foi desenvolvido um sistema de amarração que permitiu a execução dos ensaios de tração.

A realização dos ensaios de tração dos parafusos permitiu aferir que o parafuso utilizado possui propriedades mecânicas que o permitem classificar como pertencentes à classe 10.9, segundo a norma ISO898-1:1999. Através dos ensaios chegou-se à conclusão que a conceção de um sistema de classificação dos parafusos autoperfurantes à semelhança do sistema já existente para os parafusos convencionais, de modo a fornecer a resistência nominal, seria uma ajuda importante no dimensionamento das ligações aparafusadas de elementos em aço leve.

Da análise de resultados dos ensaios das ligações aparafusadas de elementos de aço leve pode-se verificar que a classe do aço das chapas está diretamente ligada à resistência da ligação, verificando-se o aumento da resistência da ligação com o aumento da classe do aço. Contudo este aumento não segue uma razão de proporcionalidade direta no aumento da resistência da ligação.

A espessura da chapa influencia em grande escala a resistência da ligação verificando-se um aumento acima dos 50% da resistência da ligação quando comparados os resultados de provetes com espessura de chapa de 0.5 [mm] com os de 1 [mm] da mesma classe do aço. Verificou-se a perda de resistência com o aumento da temperatura. A resistência da ligação

de maior espessura atinge, na maioria dos casos, o dobro da resistência da ligação de menor espessura.

No que se refere à influência do efeito de bordo pode-se comprovar que a ligação com distância de bordo superior nem sempre é a mais resistente sendo por vezes a que apresenta piores resultados como é o caso dos ensaios à temperatura de 400 [°C], onde se pode verificar esse fenómeno. Nos ensaios com combinação de diferentes espessuras de chapa verificou-se que os provetes com a maior distância de bordo apresentam menor resistência.

Pode-se também concluir que a temperatura assume um papel determinante na resistência das ligações mostrando-se como o principal fator analisado que origina uma redução da resistência da ligação mais elevada.

Apesar da redução da resistência mecânica, para a gama de temperaturas de 200 [°C] verifica-se um ligeiro aumento da resistência que pode estar ligado a transformações químicas na estrutura base do aço.

Da abordagem aos modos de colapso das ligações foi possível concluir que a distância à extremidade (e_1) e principalmente a temperatura da ligação são factores que influenciam o modo de rotura.

De um modo geral os métodos simplificados apresentados pelo Eurocódigo 3 parte 1.3 são seguros apresentando valores conservativos sempre do lado da segurança. Recomenda-se a alteração desta metodologia de cálculo para considerar a variação da resistência da ligação em função da distância ao bordo da chapa de aço, distância e_1 .

A parte 1.8 do Eurocódigo 3 não apresenta valores que reproduzam os valores obtidos experimentalmente obtendo-se na maioria dos casos valores de resistência da ligação superiores aos obtidos experimentalmente. Embora esta metodologia de cálculo tenha sido desenvolvida para ligações de chapas de espessura superior, seria conveniente determinar um coeficiente α_b ajustado para chapas mais finas.

6.2 Linhas futuras de investigação

No seguimento do trabalho realizado seria conveniente a realização de mais ensaios experimentais, eventualmente com mais que um parafuso assim como diferentes disposições de furação. Assim como com parafusos de outras classes com o objetivo de determinar a influência da classe de parafusos.

Tendo em consideração que os ensaios realizados foram efetuados a temperatura constante seria pertinente a realização dos mesmos em regime transiente a fim de se comparar os resultados com os obtidos neste estudo.

Tendo sido detetado um aumento da resistência de algumas ligações para a temperatura de 200 [°C] seria pertinente realizar um estudo de forma a perceber qual a verdadeira razão deste aumento da resistência, já referido por vários autores.

Por fim tendo em consideração que os ensaios realizados neste estudo são baseados em modelos simplificados seria importante analisar a resistência ao corte das ligações de estruturas reais de perfis enformados a frio.

Referências

1. Standardization, E.C.f., *EN ISO 898-1:1999 - Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel - Part 1: Bolts, screws and studs*. 1999.
2. *Forcefer*. [cited 2016 1/10/2016]; Available from: <http://www.forcefer.pt/>.
3. *Light Steel Framing*. [cited 2016 1/10/2016]; Available from: <http://lightsteelframing.pt/>.
4. Santos, A., *Construção em Aço Leve Galvanizado*, in *LSK - Jornada Técnica*. 2006: Porto.
5. *Isolamento termo-acústico*. [cited 2016 11/10/20016]; Available from: <http://renatorayol.blogspot.pt/2012/10/isolamento-termo-acustico.html>.
6. CEN, *EN1993-1-3 Eurocode 3 : Design of steel structures, Part 1-3: General rules Supplementary rules for cold-formed members and sheeting*. 2004, European Committee for Standardization: Brussels, Belgium. p. 125.
7. Honeycombe, R.W.K., *Aços Microestrutura E Propriedades*. 1982, London: Edward Arnold.
8. IPQ, *Eurocódigo 3 projecto de estruturas de aço Parte 1-2 regras gerais. Verificação da resistência ao fogo NP EN 1993-1-2: 2010*, ed. Instituto Português da Qualidade. 2010, Caparica: IPQ. 87 p.
9. Instituto Português da Qualidade, *Eurocódigo 3 projecto de estruturas de aço Parte 1-1 regras gerais e regras para edificios NP EN 1993-1-1: 2010*. 2010, Caparica: IPQ. 116 p.
10. Kankanamge, N.D. and M. Mahendran, *Mechanical properties of cold-formed steels at elevated temperatures*. *Thin-Walled Structures*, 2011. **49**(1): p. 26-44.

11. Lee, J.H., M. Mahendran, and P. Makelainen, *Prediction of mechanical properties of light gauge steels at elevated temperatures*. Journal of Constructional Steel Research, 2003. **59**(12): p. 1517-1532.
12. Knobloch, M., J. Pauli, and M. Fontana, *Influence of the strain-rate on the mechanical properties of mild carbon steel at elevated temperatures*. Materials & Design, 2013. **49**: p. 553-565.
13. Yan, S. and B. Young, *Tests of single shear bolted connections of thin sheet steels at elevated temperatures-Part I: Steady state tests*. Thin-Walled Structures, 2011. **49**(10): p. 1320-1333.
14. Yan, S. and B. Young, *Tests of single shear bolted connections of thin sheet steels at elevated temperatures—Part II: Transient state tests*. Thin-Walled Structures, 2011. **49**(10): p. 1334-1340.
15. Lu, W., et al., *Design of screwed steel sheeting connection at ambient and elevated temperatures*. Thin-Walled Structures, 2011. **49**(12): p. 1526-1533.
16. Lu, W., et al., *Behaviour of shear connectors in cold-formed steel sheeting at ambient and elevated temperatures*. Thin-Walled Structures, 2012. **61**: p. 229-238.
17. Instituto Português da Qualidade, *Eurocódigo 3 projecto de estruturas de aço Parte 1-8 projecto de ligações NP EN 1993-1-8: 2010*. 2010, Caparica: IPQ. 146 p.
18. EOTA, *ETA-10/0198 Fastening screws for metal members and sheeting, Fastening screws SFS, SFS intec AG*. 2013: European Organisation for Technical Approvals.
19. Mesquita, L., *Instabilidade Termo-Mecânica de Vigas Submetidas a Temperaturas Elevadas. Estudo Numérico e Experimental*, Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica; Porto; Portugal; Julho 2004.
20. Piloto, P., *Análise Experimental e Numérica do Comportamento de Estruturas Metálicas Sujeitas à Acção do Fogo*, Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia; Porto; Portugal; Setembro 2000.
21. Rubert, A.S., P., *Temperaturabhängige Werkstoffeigenschaften von Baustahl bei Brandbeanspruchung*. Stahlbau 54, 1985. **No. 3**: p. 81-86.

-
22. BRITISH STANDARD, *Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel — Part 1: Bolts, screws and studs*. 1999. p. 36.
 23. SFS-INTEC, *Technical performance values for SFS fasteners*, SFS-INTEC, Editor. 2000: Prestbury.
 24. ECCS-TC7, *ECCS TC 7: The Testing of Connections with Mechanical Fasteners in Steel Sheeting and Sections*. Vol. N° 124. 2009, Brussels: Brussels.
 25. Craveiro, H.D., et al., *Review of the high temperature mechanical and thermal properties of the steels used in cold formed steel structures – The case of the S280 Gd+Z steel*. Thin-Walled Structures, 2016. **98, Part A**: p. 154-168.
 26. Ranawaka, T. and M. Mahendran, *Experimental study of the mechanical properties of light gauge cold-formed steels at elevated temperatures*. Fire Safety Journal, 2009. **44(2)**: p. 219-229.

Anexos

A1. Comunicações apresentadas em encontros científicos nacionais e internacionais

Parente, Armandino; Mesquita, Luís, (2016); Estudo experimental de ligações aparafusadas autoperfurantes de chapas finas a temperaturas elevadas, Encontro de Jovens Investigadores do Instituto Politécnico de Bragança, 16 de Novembro 2016, Portugal. (comunicação aceite para apresentação)

Luis Mesquita, Rui Dias, Armandino Parente, Paulo Piloto; “Computational Modelling of Cold-Formed Steel Screwed Connections at Ambient and Elevated Temperatures”, Paper ID: E12007, VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS Congress 2016), Crete, Greece, 05-10 June 2016.

Armandino Parente, Rui Dias, Luís Mesquita, Estudo numérico e experimental de ligações aparafusadas autoperfurantes de chapas finas a temperaturas elevadas, 5th workshop on Urban fires Safety, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal, 1-2 Junho de 2016.

Rui Dias, Armandino Parente, Luís Mesquita, Paulo Piloto, “Behaviour Of Cold-Formed Steel Screwed Connections At Ambient And Elevated Temperatures”, 7th International Conference on Safety And Durability of Structures - ICOSADOS 2016, Book of Abstracts: ISBN: 978-989-20-6676-9, Full Paper USB Flash Drive: ISBN: 978-989-20-6683-7, 10th - 12th May 2016, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.

Mesquita, Luís M. R.; Parente, Armandino; Dias, Rui; Barreira, Luísa; Piloto, Paulo, (2015), Resistência de ligações aparafusadas autoperfurantes de chapas finas de perfis enformados a frio a temperaturas elevadas, Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia ISBN: 978-989-99410-1-4, Eds Guedes, J. M., Blanco, J. M., Silvestre, N., Arias, I., Silva, M. T. D. & Valiente, M. T., Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

Parente, Armandino; Dias, Rui; Mesquita, Luís, Barreira, Luísa (2014); Comportamento de ligações autoperfurantes de perfis enformados a frio a temperaturas elevadas, II Encontro de Jovens Investigadores do Instituto Politécnico de Bragança, 12, 13 e 14 de Novembro 2014, Portugal.

A2. Propriedades mecânicas do aço das chapas

Propriedades mecânicas e químicas das chapas de aço determinadas pelo fabricante das chapas.

Tabela A 1- Tabela de propriedades mecânicas das chapas utilizadas nos ensaios.

| Ref (Fabricante) | Material | T _{CED} [N/mm ²] | T _{ROT} [N/mm ²] | T _{CED} nominal [N/mm ²] | Espessura [mm] | Revestimento (especificação) |
|---------------------|---------------|--|--|---|-------------------|---------------------------------|
| 14514887* | SGD250 ou 280 | 292.3 | 348.2 | 280 | 0.5 | Z275 |
| 14513450 | SGD320 ou 280 | 324.8 | 409.3 | 320 | 0.5 | Z275 |
| 14516097* | SGD250 | 253.1 | 351.9 | 250 | 1 | Z100 |
| 14516096 | SGD250 ou 280 | 284.7 | 371.3 | 280 | 1 | Z100 |
| 14516804 /1 | SGD320 ou 350 | 353.5 | 462.4 | 350 | 1 | Z275 |
| 14515636 | SGD220 | 238.7 | 341.9 | 220 | 1.5 | Z180 |

* Composição química não fornecida pelo fabricante.

Propriedades químicas:

Tabela A 2- - Tabela de propriedades químicas das chapas utilizadas nos ensaios.

| Composição química | | | | |
|--------------------|-----------|-----------|-------------|-----------|
| Ref: | 1413450 | 14516096 | 14516804 /1 | 14515636 |
| Elemento | Valor (%) | Valor (%) | Valor (%) | Valor (%) |
| Carbono | 0.1 | 0.05 | 0.127 | 0.06 |
| Manganês | 0.49 | 0.3 | 0.476 | 0.29 |
| Fosforo | 0.017 | 0.02 | 0.095 | 0.008 |
| Enxofre | 0.01 | 0.009 | 0.011 | 0.03 |
| Silício | 0.016 | 0.028 | 0.044 | 0.01 |
| Alumínio | 0.055 | 0.033 | 0.043 | x |
| Cobre | 0.023 | 0.007 | x | 0.02 |
| Azoto | x | x | 0.004 | ND |
| Crômio | x | 0.019 | 0.009 | 0.02 |
| Níquel | 0.02 | 0.002 | 0.004 | 0.02 |
| Estanho | 0.001 | x | 0.008 | x |
| Molibdênio | 0.008 | x | 0.002 | x |
| Nióbio | 0.001 | x | 0.002 | x |
| Vanádio | 0.002 | x | 0.001 | x |
| Titânio | 0.001 | x | 0.004 | x |
| Boro | x | 0.001 | x | ND |

A3. Gráficos dos Resultados experimentais da resistência das ligações

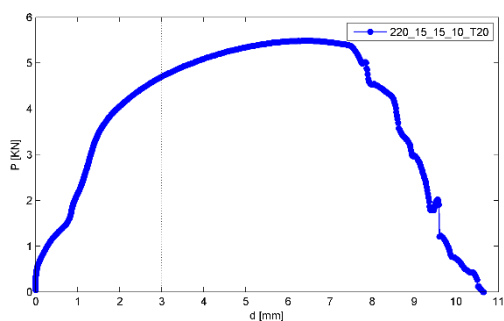


Figura A 1- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 220_15_15_10_T20

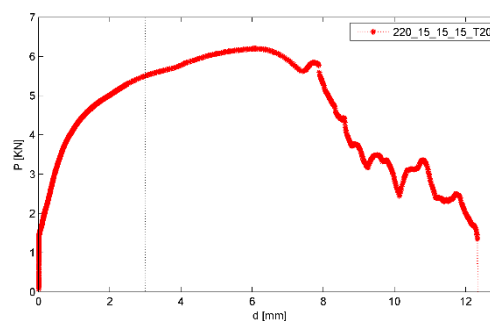


Figura A 2- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 220_15_15_15_T20

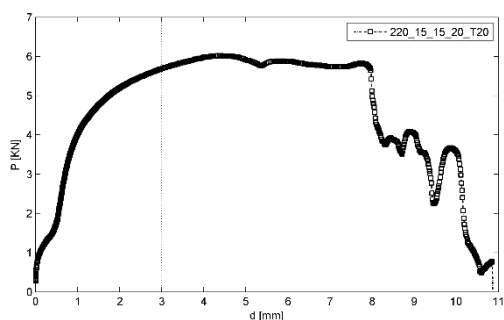


Figura A 3- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 220_15_15_20_T20

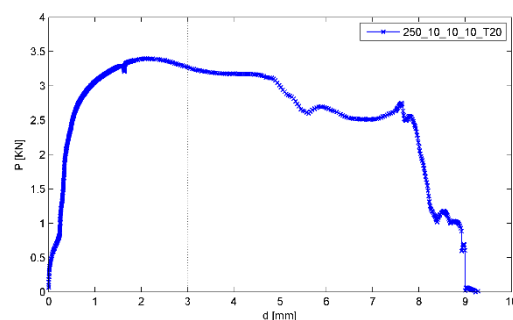


Figura A 4- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 250_10_10_10_T20

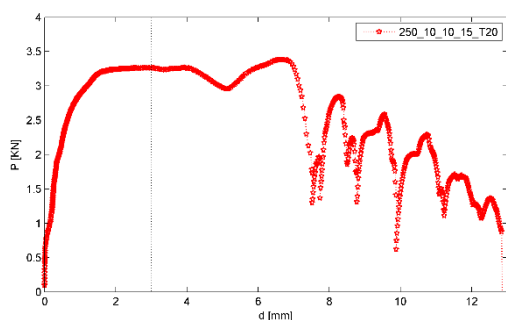


Figura A 5- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 250_10_10_15_T20

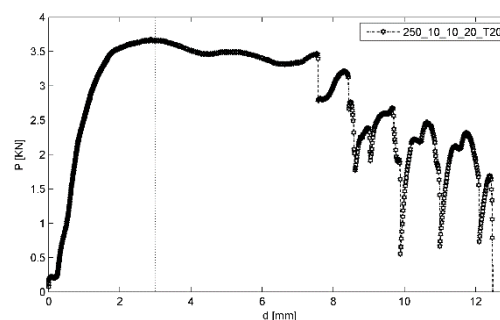


Figura A 6- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 250_10_10_20_T20

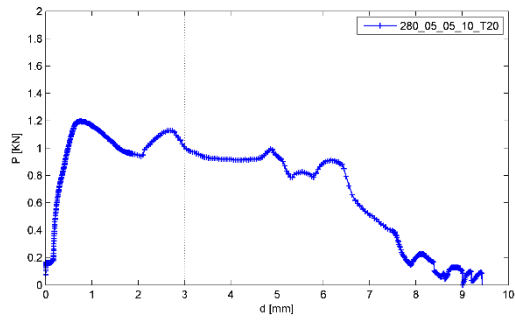


Figura A 7- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_05_10_T20

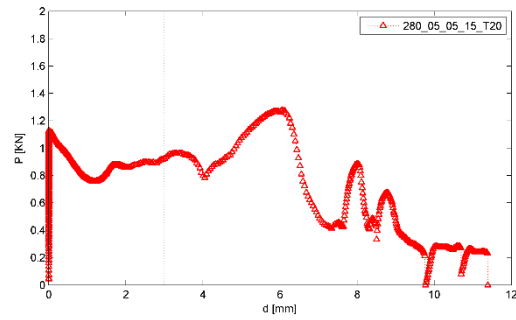


Figura A 8- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_05_15_T20

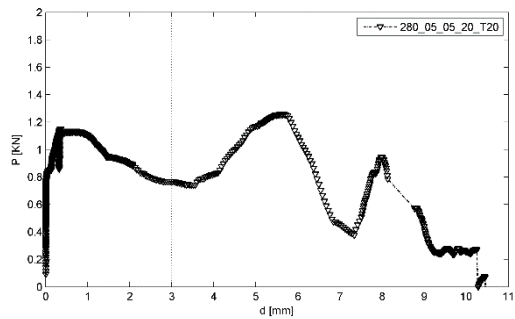


Figura A 9- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_05_20_T20

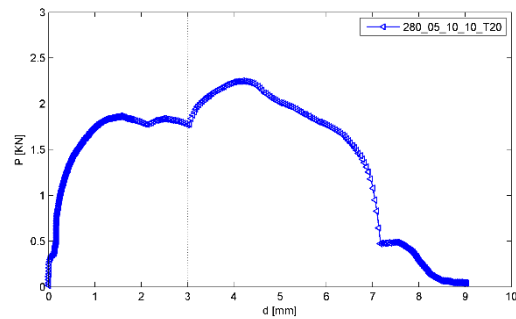


Figura A 10- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_10_10_T20

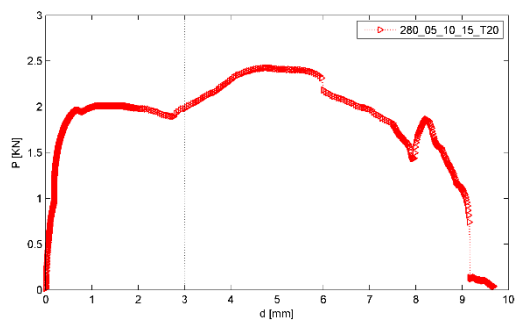


Figura A 11- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_10_15_T20

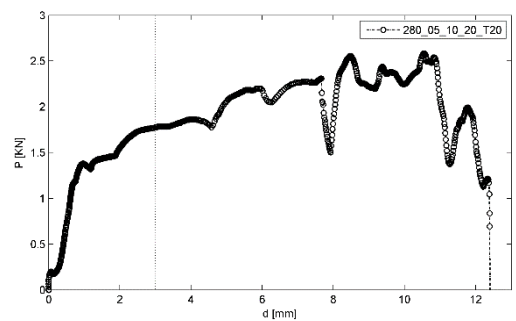


Figura A 12- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_10_20_T20

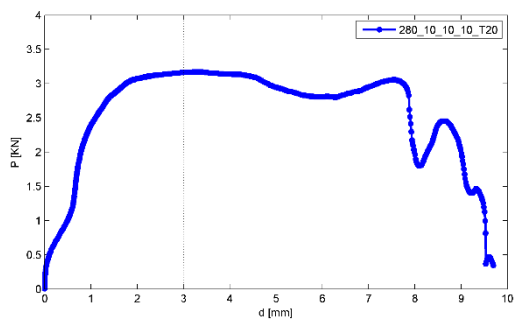


Figura A 13- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_10_10_10_T20

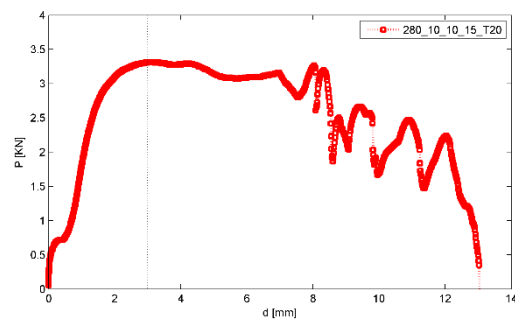


Figura A 14- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_10_10_15_T20

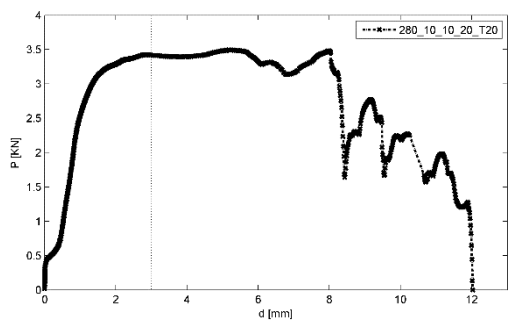


Figura A 15- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_10_10_20_T20

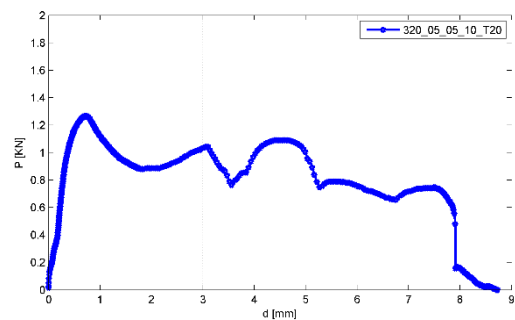


Figura A 16- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 320_05_05_10_T20

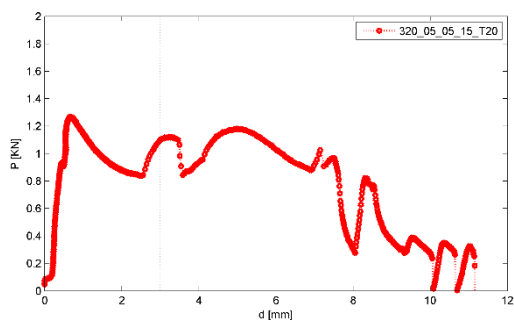


Figura A 17- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 320_05_05_15_T20

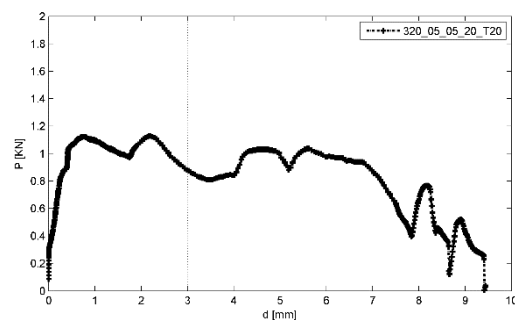


Figura A 18- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 320_05_05_20_T20

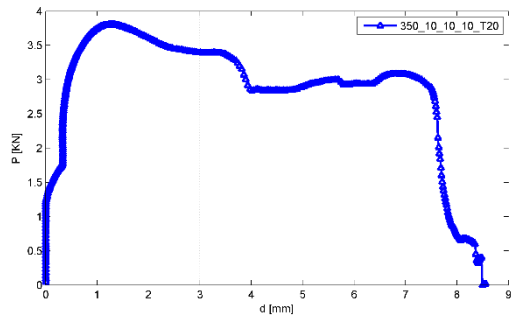


Figura A 19- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 350_10_10_10_T20

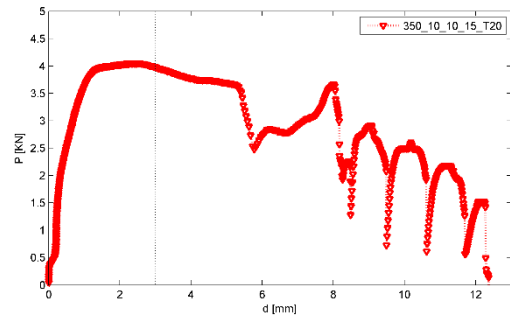


Figura A 20- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 350_10_10_15_T20

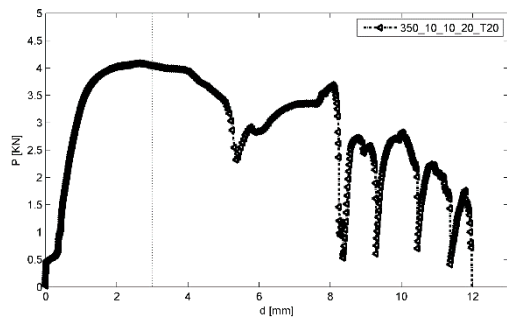


Figura A 21- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 350_10_10_20_T20

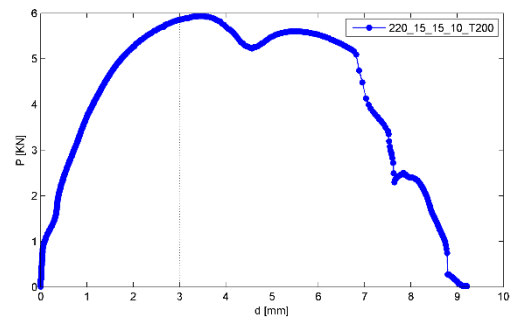


Figura A 22- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 220_15_15_10_T200

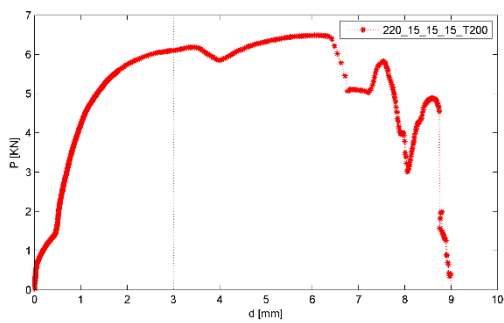


Figura A 23- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 220_15_15_15_T200

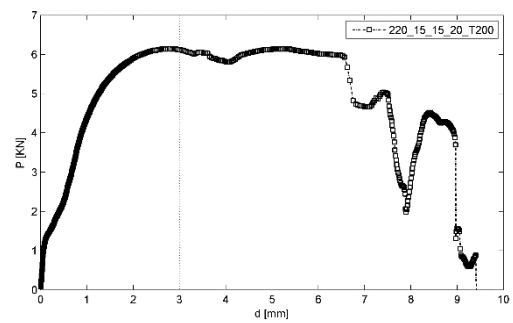


Figura A 24- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 220_15_15_20_T200

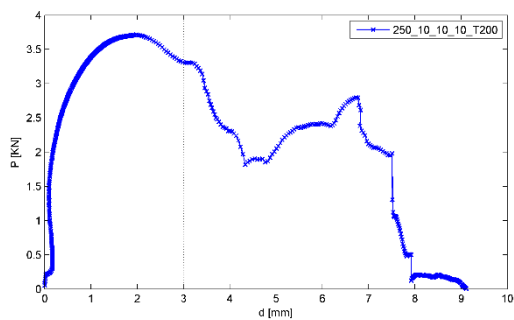


Figura A 25- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 250_10_10_10_T200

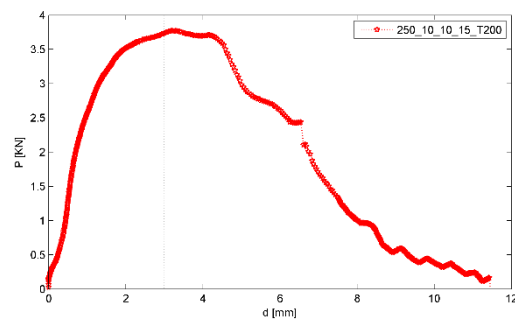


Figura A 26- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 250_10_10_15_T200

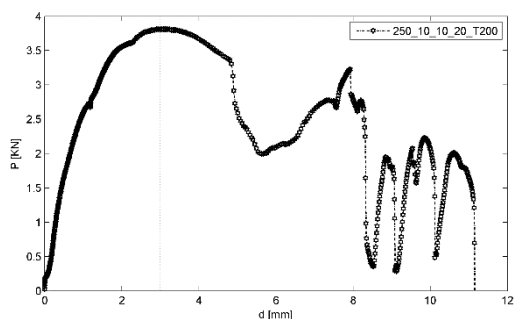


Figura A 27- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 250_10_10_20_T200

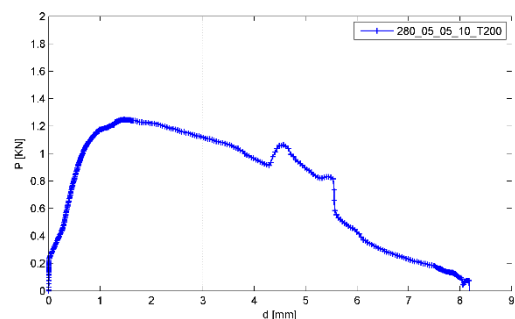


Figura A 28- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_05_10_T200

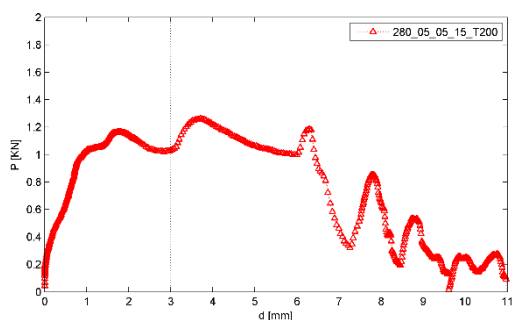


Figura A 29- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_05_15_T200

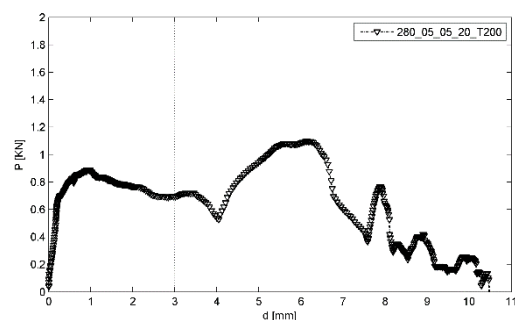


Figura A 30- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_05_20_T200

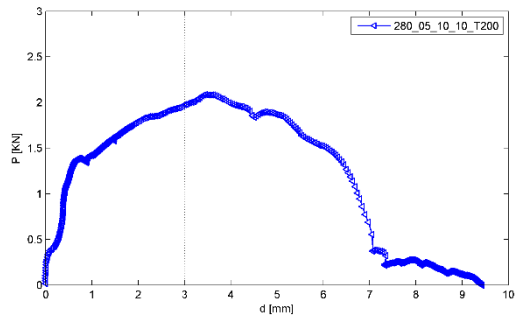


Figura A 31- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_10_10_T200

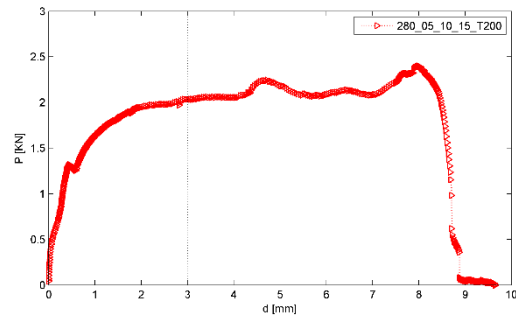


Figura A 32- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_10_15_T200

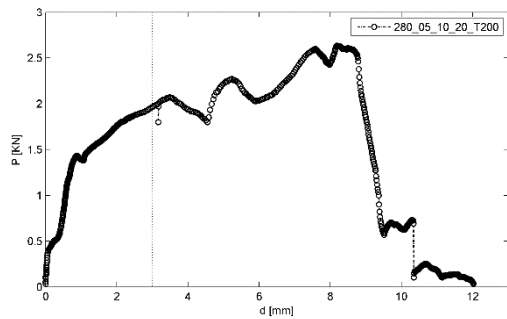


Figura A 33- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_10_20_T200

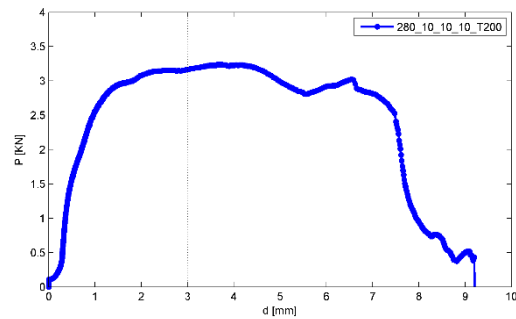


Figura A 34- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_10_10_10_T200

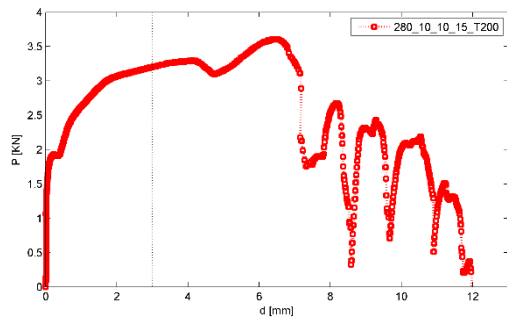


Figura A 35- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_10_10_15_T200

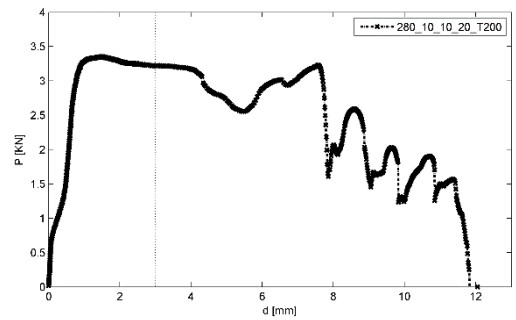


Figura A 36- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_10_10_20_T200

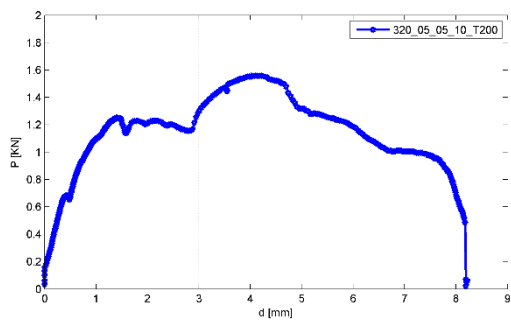


Figura A 37- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 320_05_05_10_T200

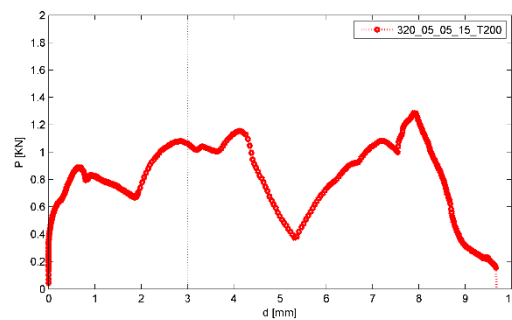


Figura A 38- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 320_05_05_15_T200

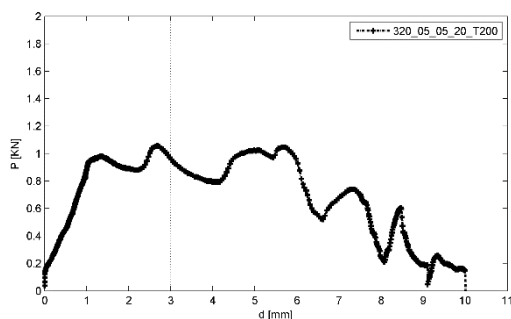


Figura A 39- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 320_05_05_20_T200

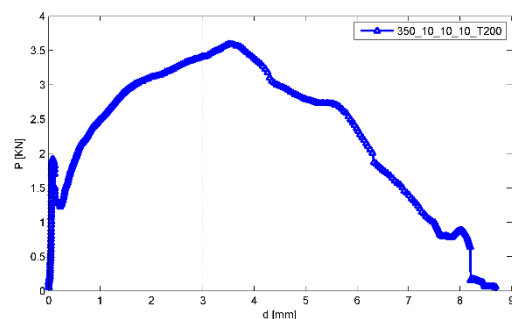


Figura A 40- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 350_10_10_10_T200

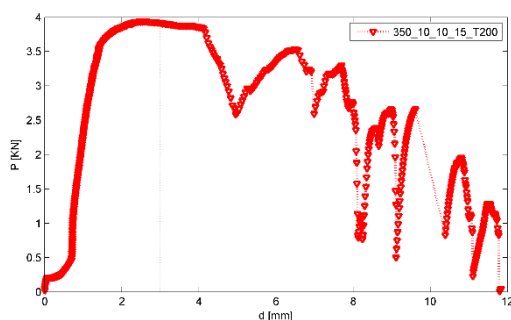


Figura A 41- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 350_10_10_15_T200

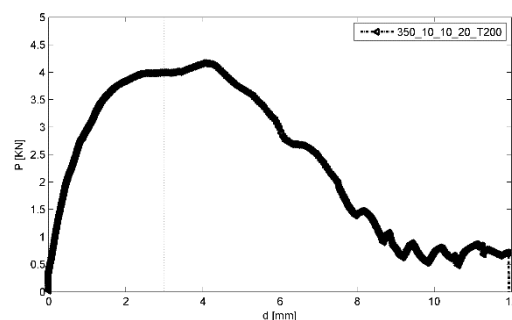


Figura A 42- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 350_10_10_20_T200

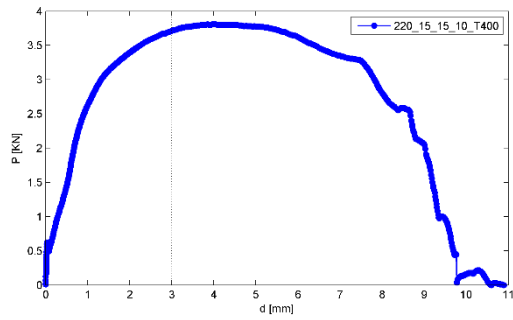


Figura A 43- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 220_15_15_10_T400

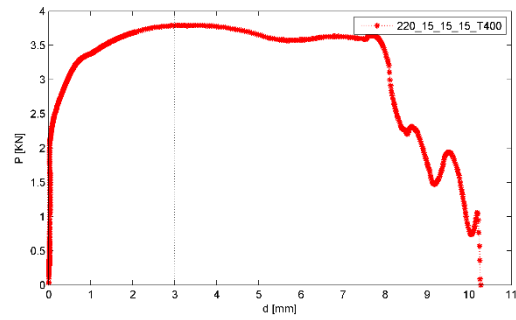


Figura A 44- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 220_15_15_15_T400

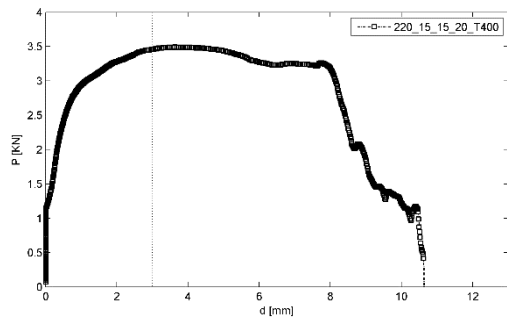


Figura A 45- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 220_15_15_20_T400

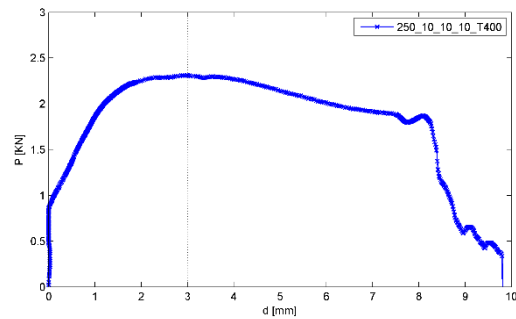


Figura A 46- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 250_10_10_10_T400

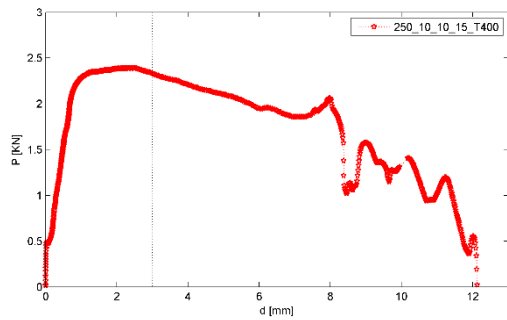


Figura A 47- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 250_10_10_15_T400

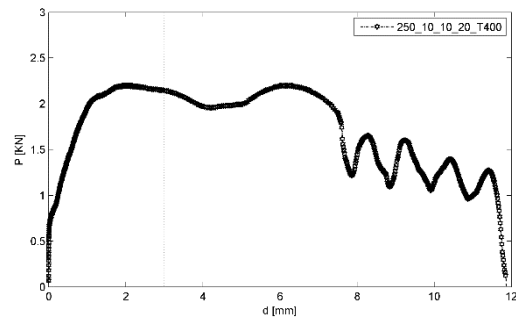


Figura A 48- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 250_10_10_20_T400

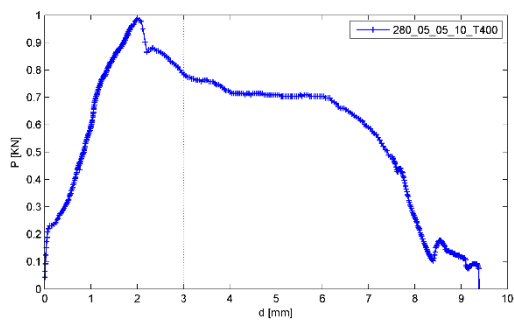


Figura A 49- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_05_10_T400

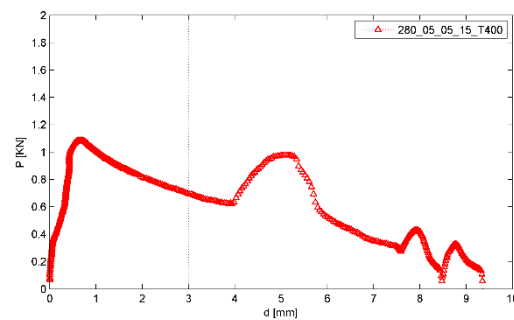


Figura A 50- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_05_15_T400

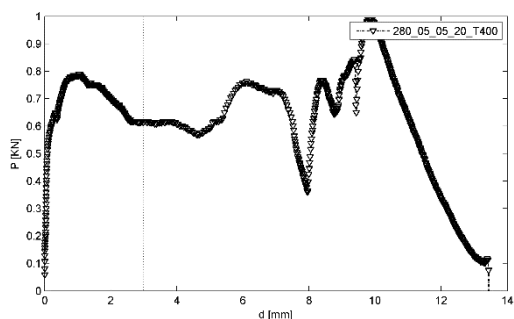


Figura A 51- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_05_20_T400

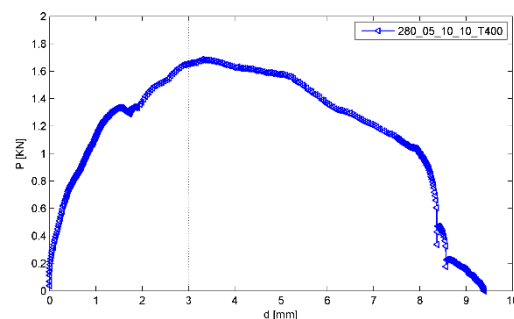


Figura A 52- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_10_10_T400

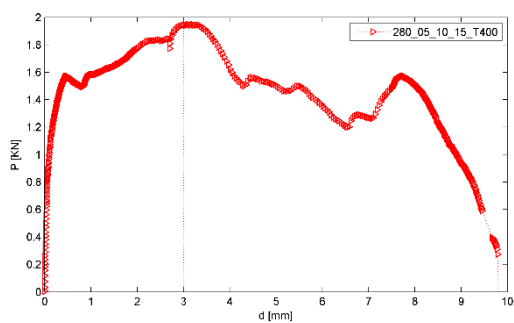


Figura A 53- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_10_15_T400

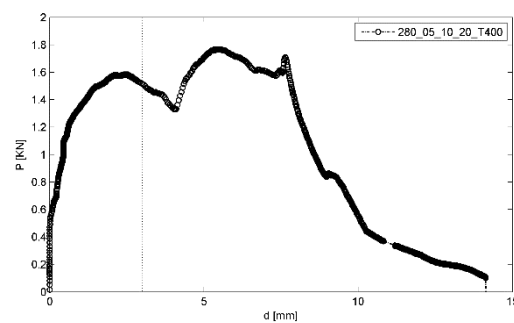


Figura A 54- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_10_20_T400

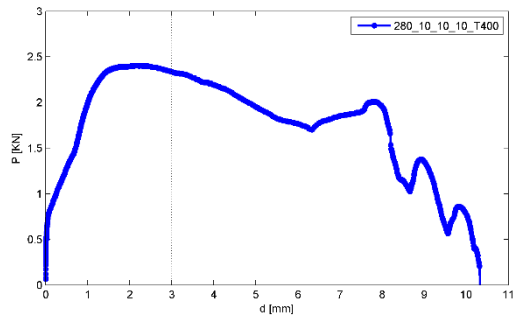


Figura A 55- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_10_10_10_T400

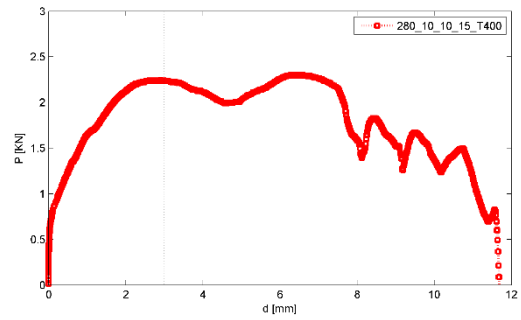


Figura A 56- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_10_10_15_T400

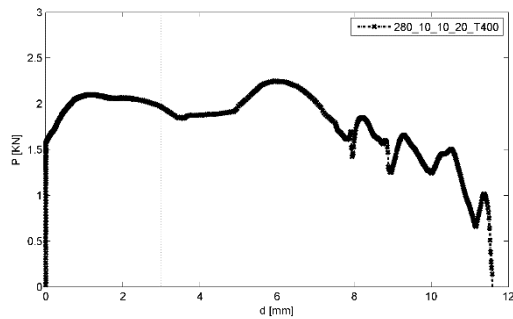


Figura A 57- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_10_10_20_T400

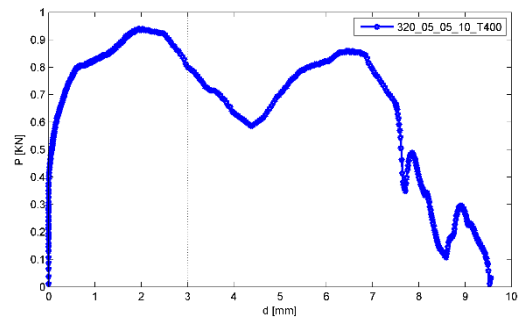


Figura A 58- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 320_05_05_10_T400

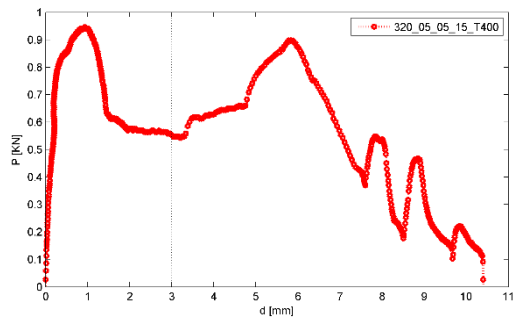


Figura A 59- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 320_05_05_15_T400

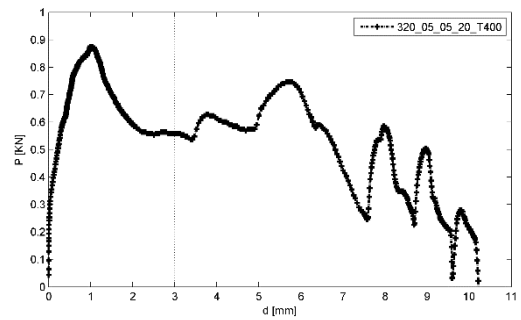


Figura A 60- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 320_05_05_20_T400

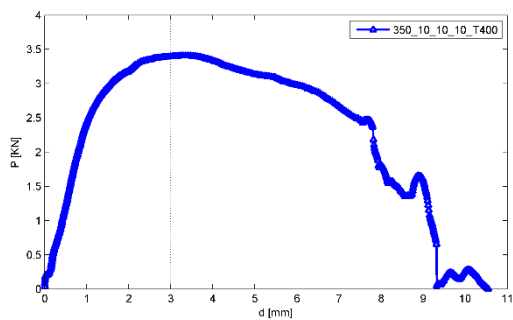


Figura A 61- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 350_10_10_10_T400

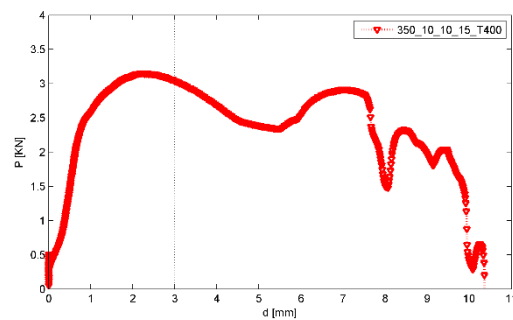


Figura A 62- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 350_10_10_15_T400

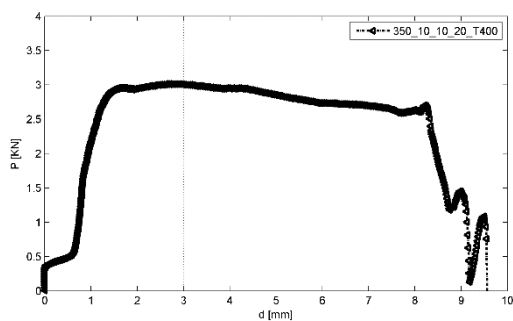


Figura A 63- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 350_10_10_20_T400

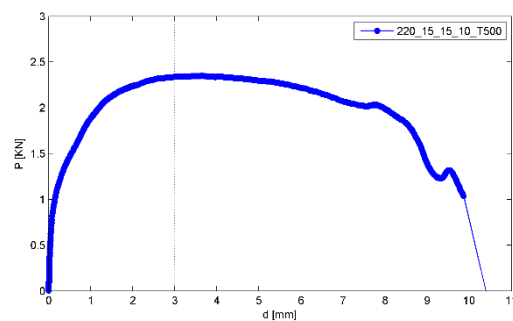


Figura A 64- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 220_15_15_10_T500

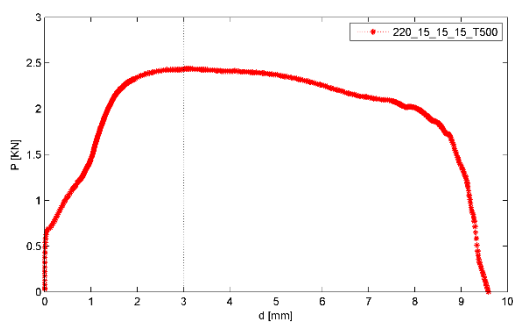


Figura A 65- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 220_15_15_15_T500

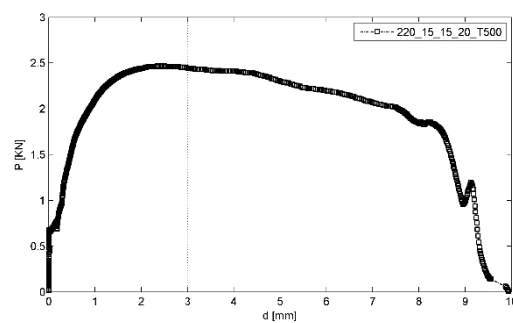


Figura A 66- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 220_15_15_20_T500

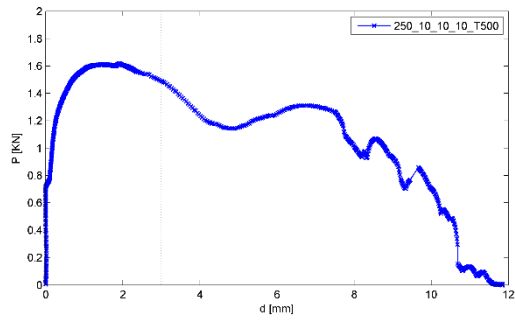


Figura A 67- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 250_10_10_10_T500

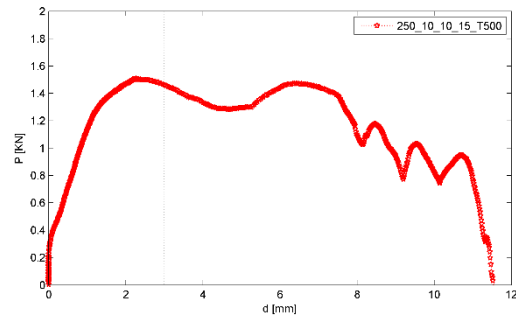


Figura A 68- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 250_10_10_15_T500

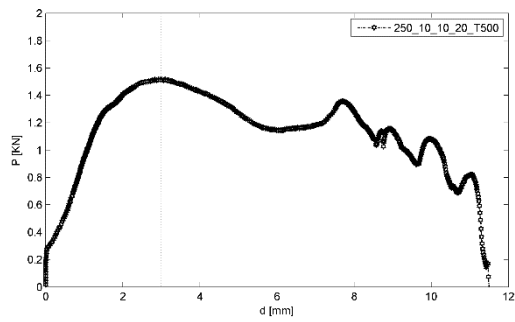


Figura A 69- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 250_10_10_20_T500

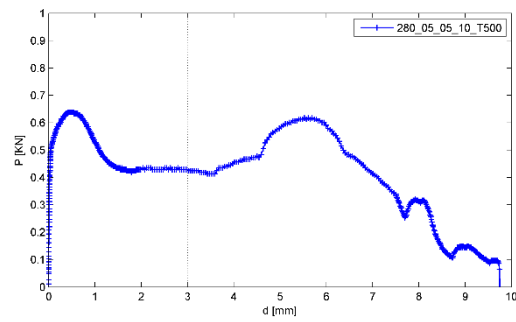


Figura A 70- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_05_10_T500

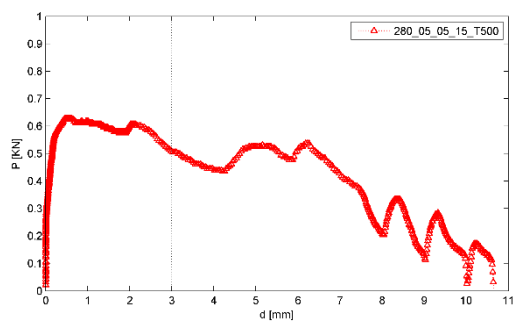


Figura A 71- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_05_15_T500

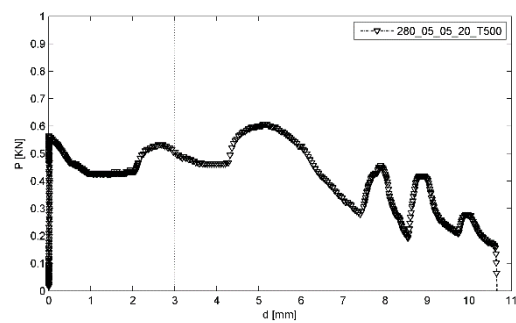


Figura A 72- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_05_20_T500

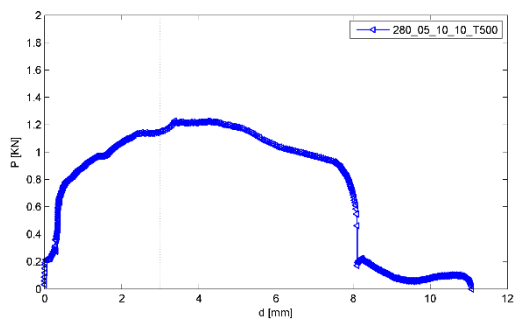


Figura A 73- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_10_10_T500

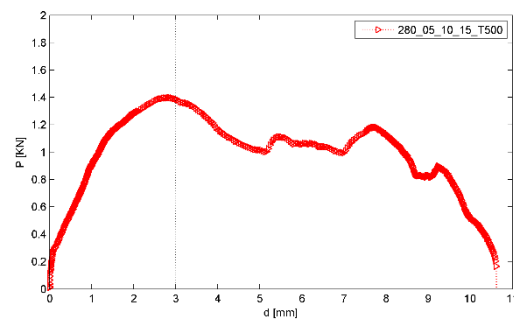


Figura A 74- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_10_15_T500

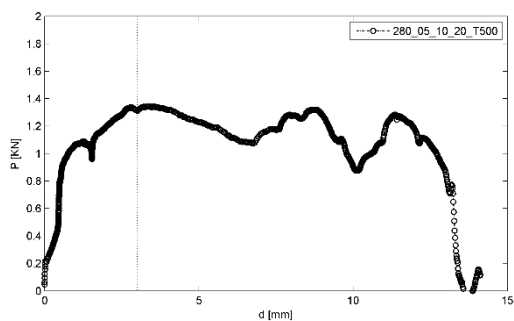


Figura A 75- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_10_20_T500

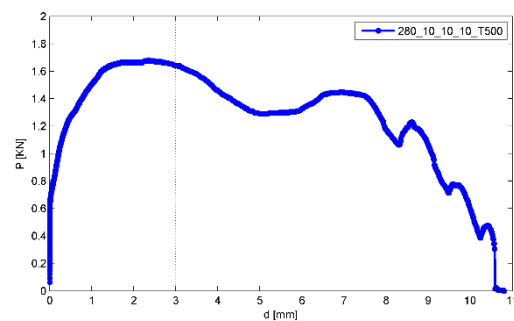


Figura A 76- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_10_10_10_T500

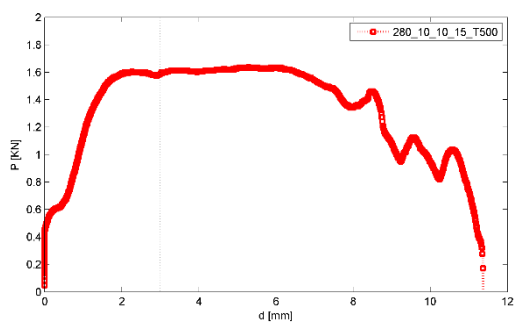


Figura A 77- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_10_10_15_T500

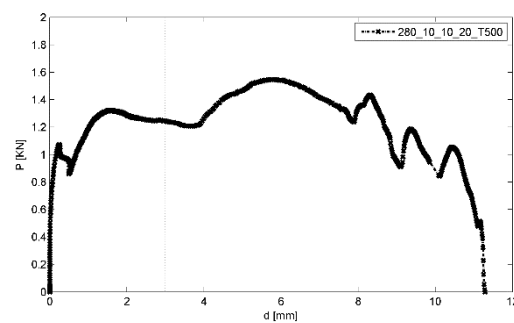


Figura A 78- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_10_10_20_T500

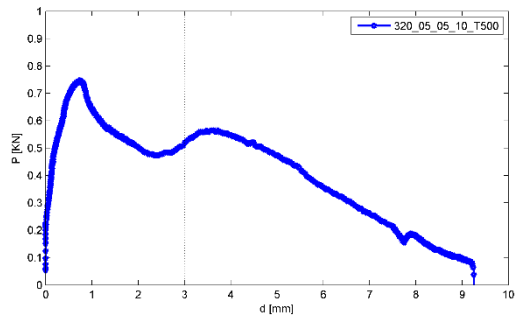


Figura A 79- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 320_05_05_10_T500

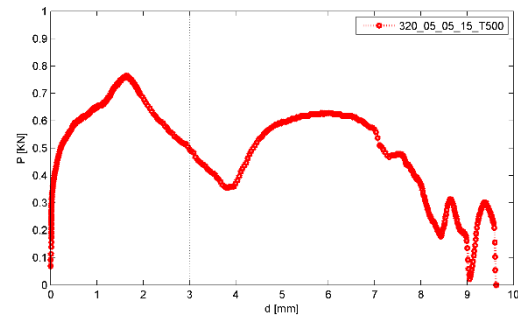


Figura A 80- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 320_05_05_15_T500

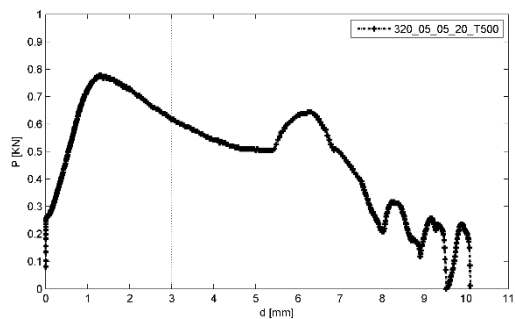


Figura A 81- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 320_05_05_20_T500

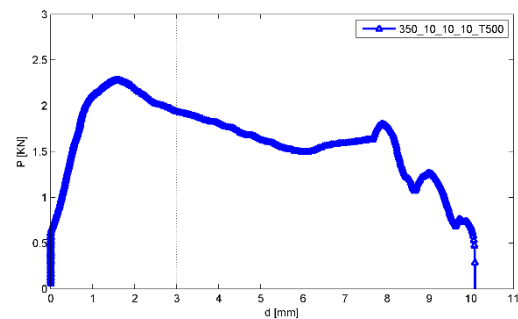


Figura A 82- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 350_10_10_10_T500

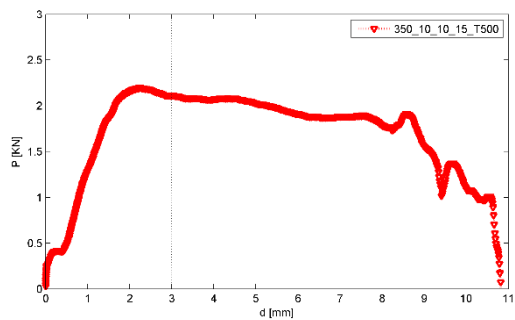


Figura A 83- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 350_10_10_15_T500

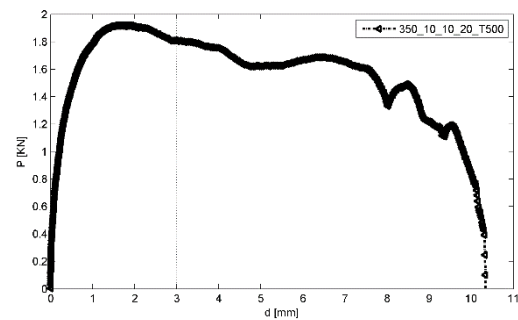


Figura A 84- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 350_10_10_20_T500

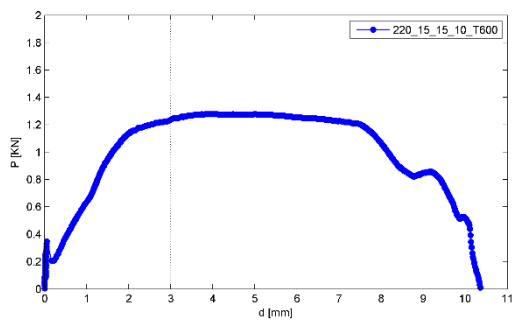


Figura A 85- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 220_15_15_10_T600

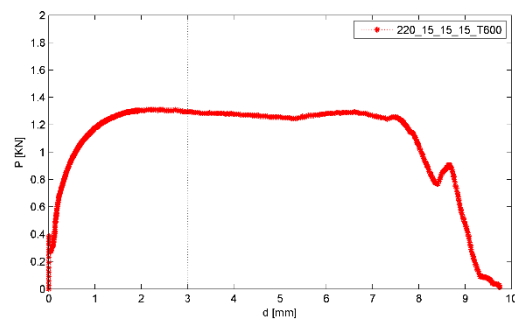


Figura A 86- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 220_15_15_15_T600

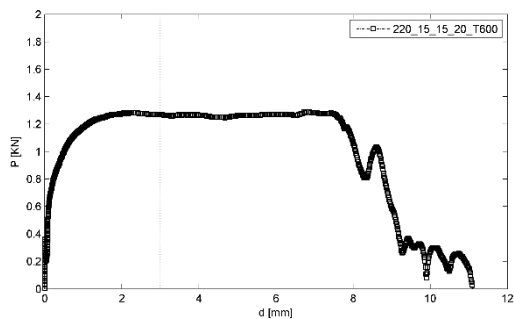


Figura A 87- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 220_15_15_20_T600

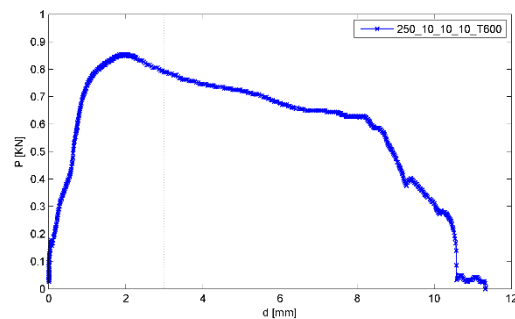


Figura A 88- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 250_10_10_10_T600

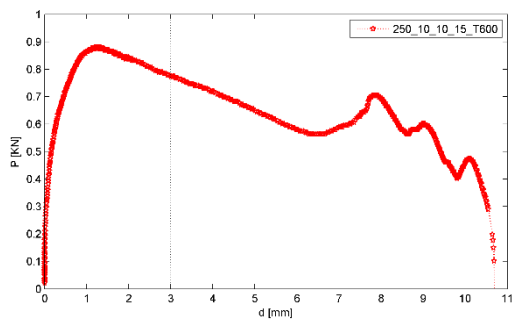


Figura A 89- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 250_10_10_15_T600

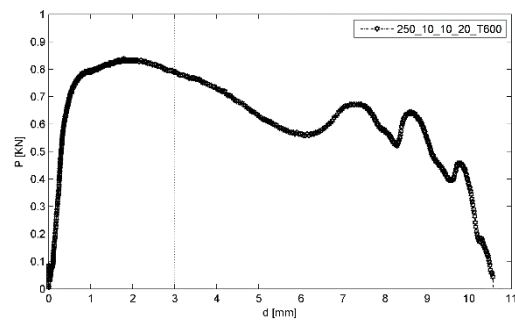


Figura A 90- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 250_10_10_20_T600

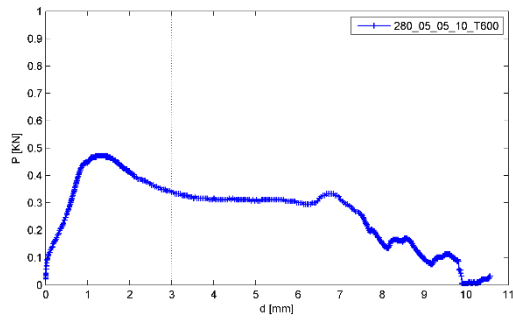


Figura A 91- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_05_10_T600

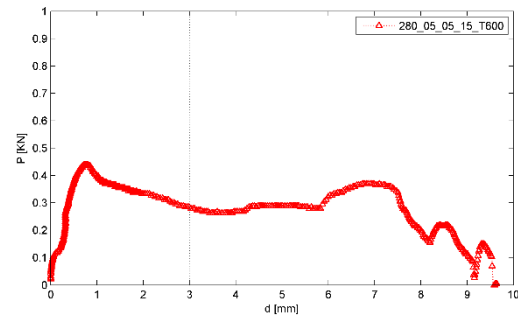


Figura A 92- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_05_15_T600

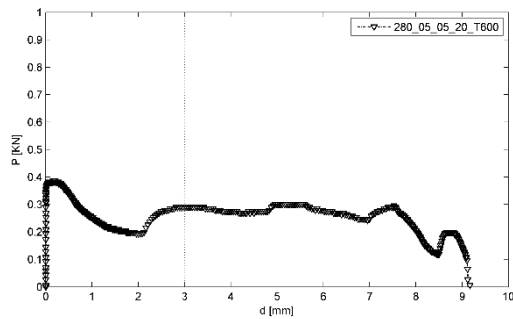


Figura A 93- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_05_20_T600

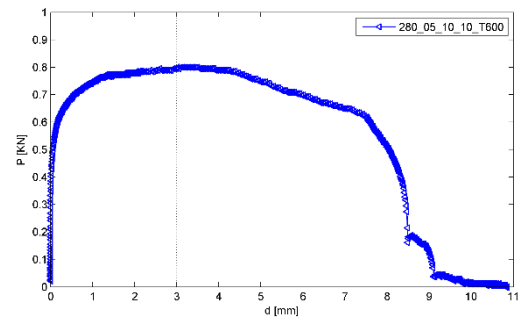


Figura A 94- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_10_10_T600

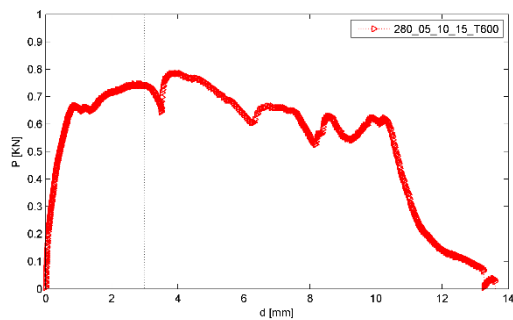


Figura A 95- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_10_15_T600

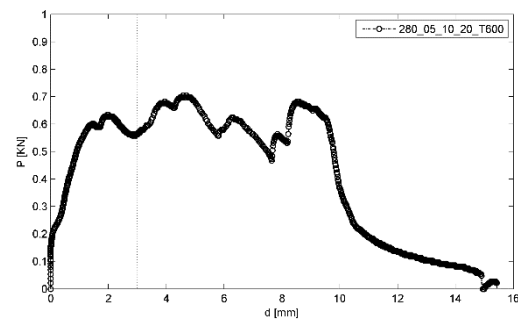


Figura A 96- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_10_20_T600

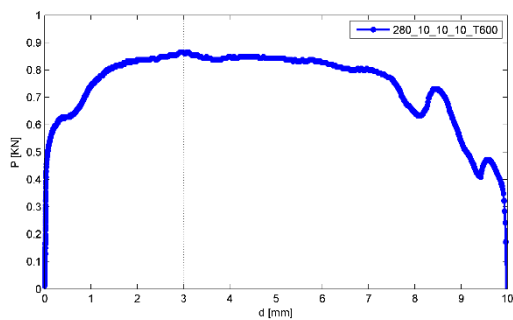


Figura A 97- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_10_10_10_T600

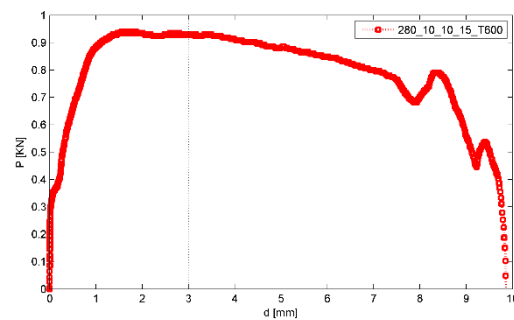


Figura A 98- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_10_10_15_T600

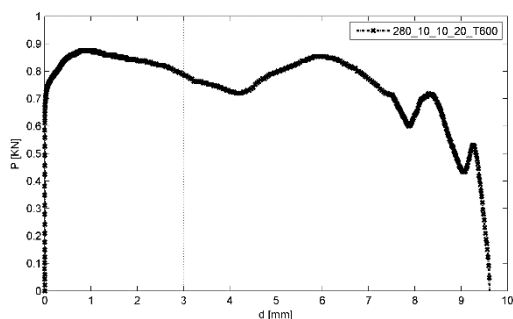


Figura A 99- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_10_10_20_T600

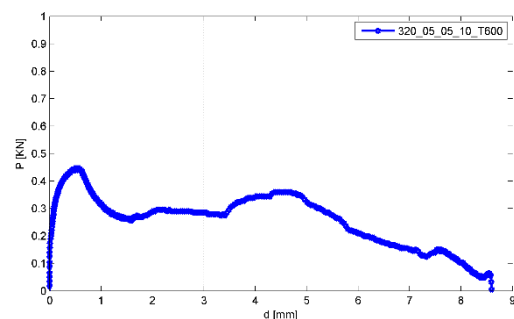


Figura A 100- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 320_05_05_10_T600

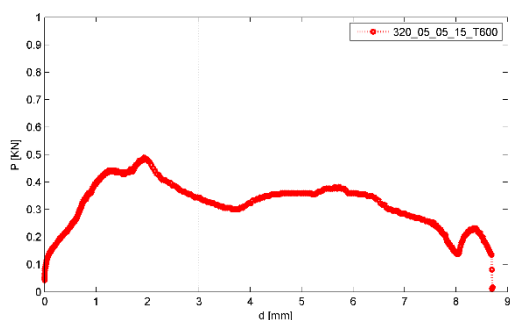


Figura A 101- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 320_05_05_15_T600

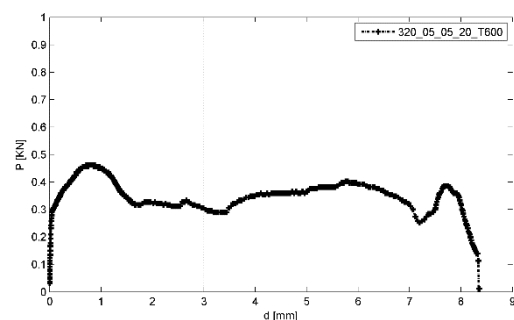


Figura A 102- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 320_05_05_20_T600

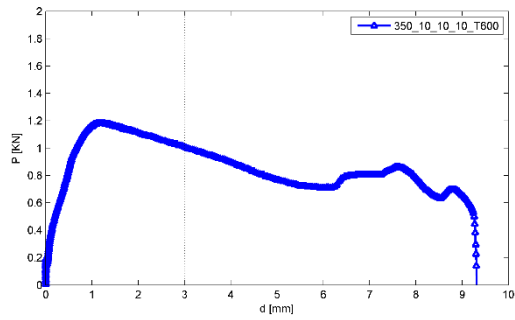


Figura A 103- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 350_10_10_10_T600

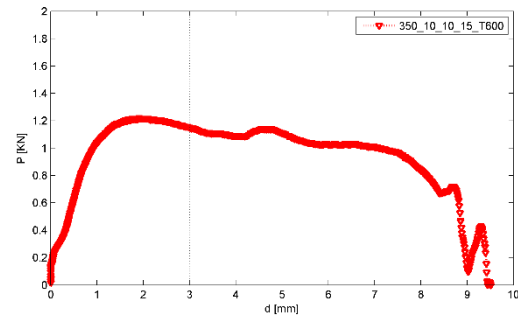


Figura A 104- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 350_10_10_15_T600

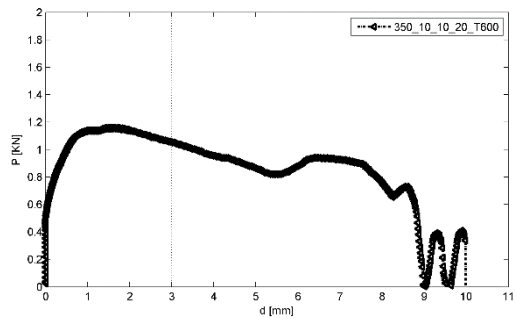


Figura A 105- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 350_10_10_20_T600

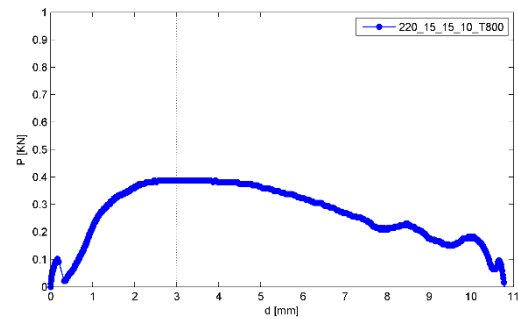


Figura A 106- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 220_15_15_10_T800

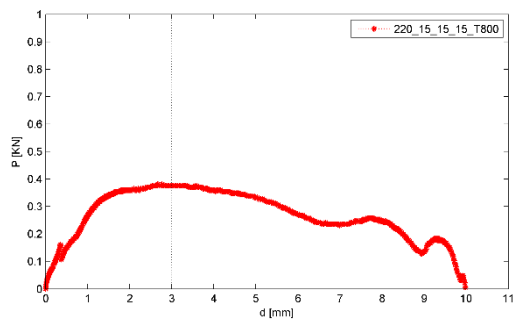


Figura A 107- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 220_15_15_15_T800

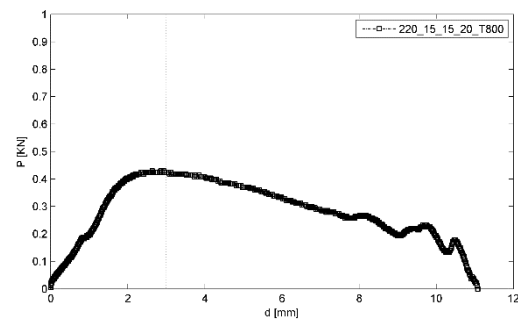


Figura A 108- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 220_15_15_20_T800

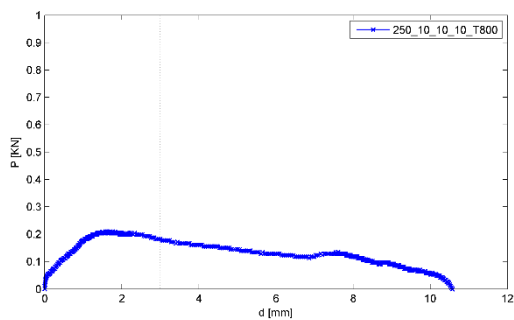


Figura A 109- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 250_10_10_10_T800

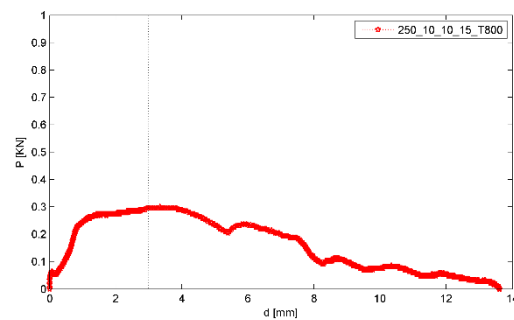


Figura A 110- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 250_10_10_15_T800

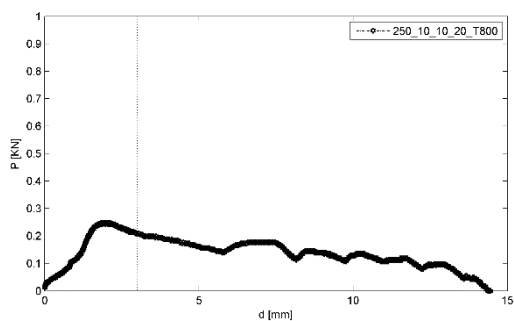


Figura A 111- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 250_10_10_20_T800

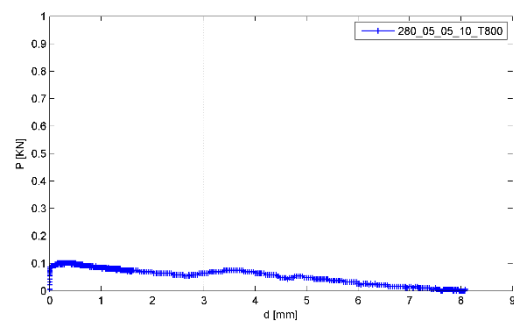


Figura A 112- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_05_10_T800

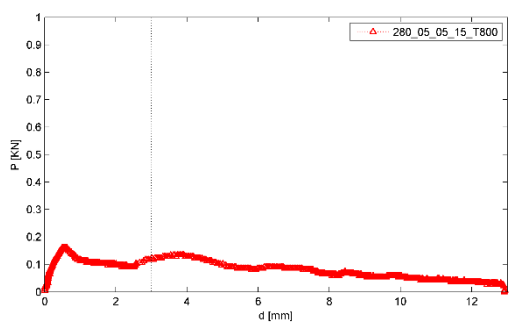


Figura A 113- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_05_15_T800

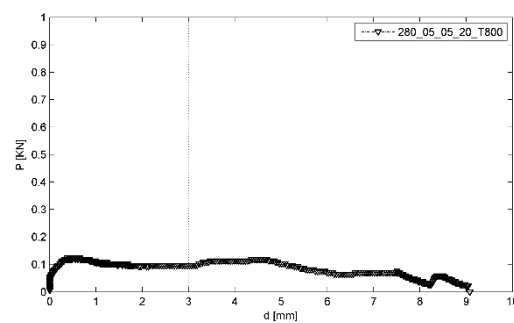


Figura A 114- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_05_20_T800

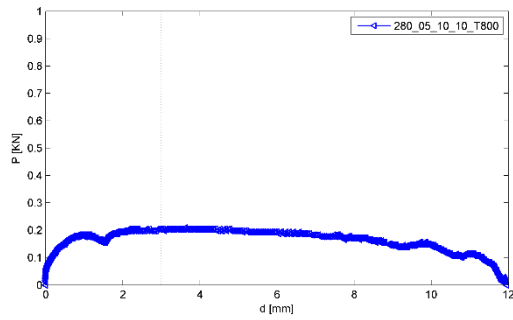


Figura A 115- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_10_10_T800

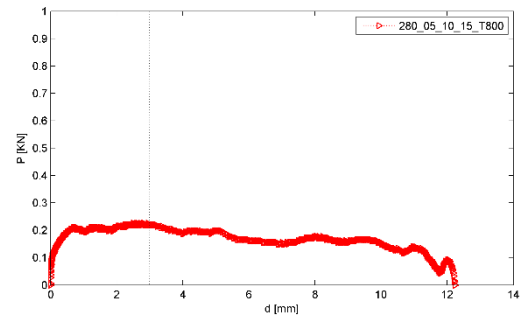


Figura A 116- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_10_15_T800

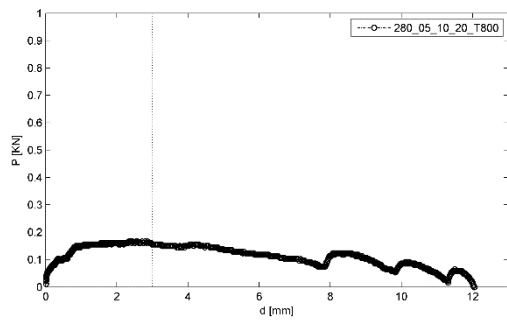


Figura A 117- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_05_10_20_T800

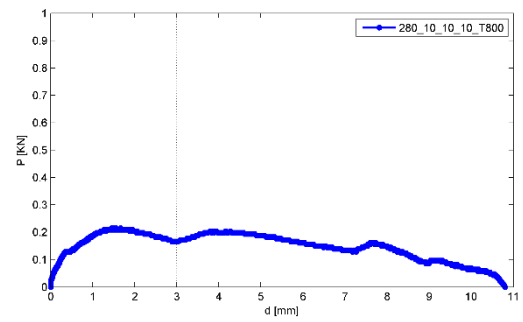


Figura A 118- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_10_10_10_T800

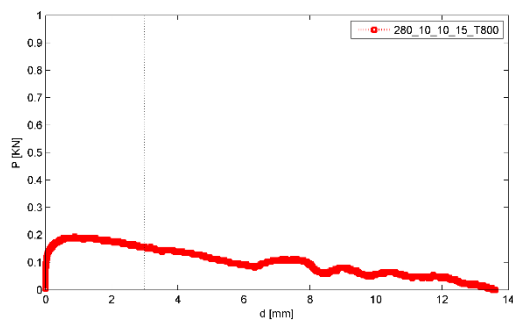


Figura A 119- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_10_10_15_T800

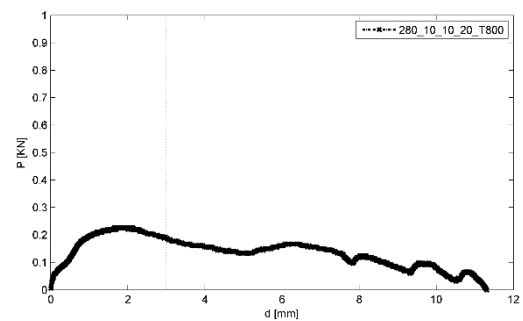


Figura A 120- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 280_10_10_20_T800

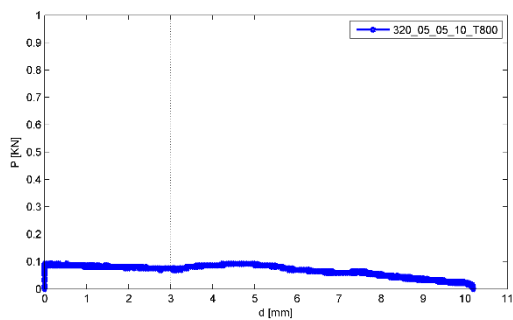


Figura A 121- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 320_05_05_10_T800

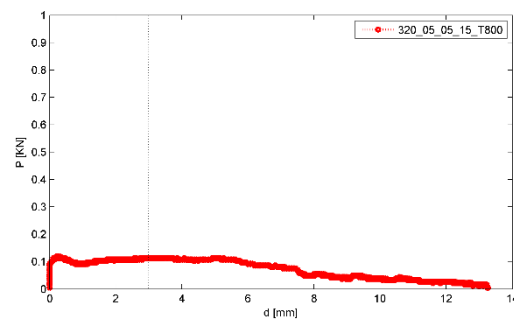


Figura A 122- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 320_05_05_15_T800

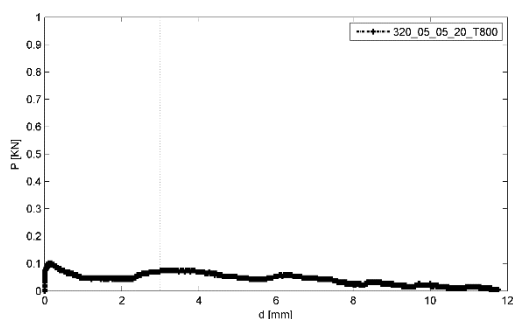


Figura A 123- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 320_05_05_20_T800

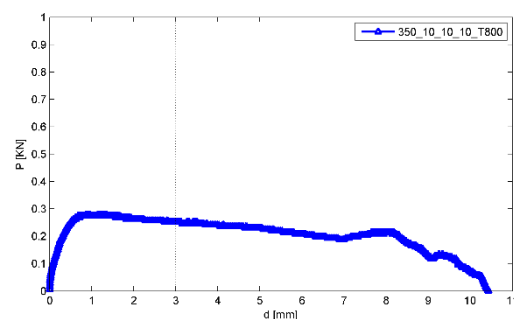


Figura A 124- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 350_10_10_10_T800

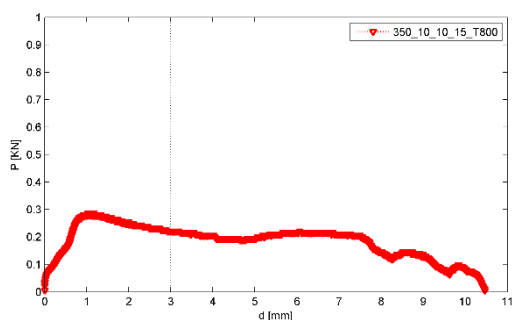


Figura A 125- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 350_10_10_15_T800

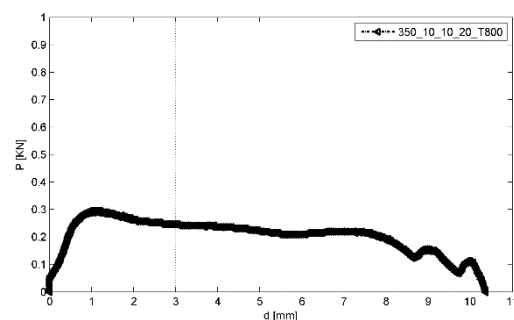


Figura A 126- Gráfico força versus deslocamento do provete com referência 350_10_10_20_T800

A4. Resultados experimentais e resultados dados pelos métodos simplificados

Tabela 27- Resultados obtidos para os provetes da classe de chapa SGD220.

| Ref | P_max | P_3mm | EC3-1-3 | | EC3-1-8 | | Modo de Falha |
|-------------------|-------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| | | | F _{v,Rd} | F _{b,Rd} | F _{v,Rd} | F _{b,Rd} | |
| 220_15_15_10_T20 | 5.487 | 4.701 | 4.310 | 4.136 | 7.856 | 3.750 | BFM |
| 220_15_15_10_T200 | 5.938 | 5.858 | 4.030 | 3.867 | 7.345 | 3.506 | BFM |
| 220_15_15_10_T400 | 3.807 | 3.712 | 3.340 | 3.205 | 6.088 | 2.906 | BFM |
| 220_15_15_10_T500 | 2.352 | 2.341 | 2.371 | 2.275 | 4.321 | 2.063 | BFM + TFM |
| 220_15_15_10_T600 | 1.278 | 1.237 | 0.948 | 0.910 | 1.728 | 0.825 | BFM + TFM |
| 220_15_15_10_T800 | 0.387 | 0.387 | 0.289 | 0.277 | 0.526 | 0.251 | BFM + TFM |
| 220_15_15_15_T20 | 6.201 | 5.505 | 4.310 | 4.136 | 7.856 | 5.625 | BFM + TFM |
| 220_15_15_15_T200 | 6.491 | 6.109 | 4.030 | 3.867 | 7.345 | 5.259 | TFM + SFM |
| 220_15_15_15_T400 | 3.791 | 3.789 | 3.340 | 3.205 | 6.088 | 4.359 | BFM + TFM |
| 220_15_15_15_T500 | 2.438 | 2.434 | 2.371 | 2.275 | 4.321 | 3.094 | TFM |
| 220_15_15_15_T600 | 1.310 | 1.294 | 0.948 | 0.910 | 1.728 | 1.238 | TFM |
| 220_15_15_15_T800 | 0.381 | 0.376 | 0.289 | 0.277 | 0.526 | 0.377 | TFM |
| 220_15_15_20_T20 | 6.019 | 5.690 | 4.310 | 4.136 | 7.856 | 6.188 | TFM + SFM |
| 220_15_15_20_T200 | 6.142 | 6.117 | 4.030 | 3.867 | 7.345 | 5.785 | TFM + SFM |
| 220_15_15_20_T400 | 3.495 | 3.463 | 3.340 | 3.205 | 6.088 | 4.795 | BFM + TFM |
| 220_15_15_20_T500 | 2.470 | 2.445 | 2.371 | 2.275 | 4.321 | 3.403 | BFM + TFM |
| 220_15_15_20_T600 | 1.289 | 1.267 | 0.948 | 0.910 | 1.728 | 1.361 | TFM |
| 220_15_15_20_T800 | 0.430 | 0.424 | 0.289 | 0.277 | 0.526 | 0.415 | TFM |

Tabela 28- Resultados obtidos para os provetes da classe de chapa SGD250.

| Ref | P_max | P_3mm | EC3-1-3 | | EC3-1-8 | | Modo de Falha |
|-------------------|-------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| | | | F _{V,Rd} | F _{b,Rd} | F _{V,Rd} | F _{b,Rd} | |
| 250_10_10_10_T20 | 3.399 | 3.273 | 4.310 | 2.477 | 7.856 | 2.750 | BFM |
| 250_10_10_10_T200 | 3.715 | 3.311 | 4.030 | 2.316 | 7.345 | 2.571 | BFM |
| 250_10_10_10_T400 | 2.314 | 2.314 | 3.340 | 1.919 | 6.088 | 2.131 | BFM |
| 250_10_10_10_T500 | 1.616 | 1.490 | 2.371 | 1.362 | 4.321 | 1.513 | BFM |
| 250_10_10_10_T600 | 0.854 | 0.789 | 0.948 | 0.545 | 1.728 | 0.605 | BFM |
| 250_10_10_10_T800 | 0.209 | 0.183 | 0.289 | 0.166 | 0.526 | 0.184 | BFM |
| 250_10_10_15_T20 | 3.383 | 3.259 | 4.310 | 2.477 | 7.856 | 4.125 | BFM + TFM |
| 250_10_10_15_T200 | 3.774 | 3.736 | 4.030 | 2.316 | 7.345 | 3.857 | BFM + TFM |
| 250_10_10_15_T400 | 2.395 | 2.335 | 3.340 | 1.919 | 6.088 | 3.197 | BFM + TFM |
| 250_10_10_15_T500 | 1.509 | 1.462 | 2.371 | 1.362 | 4.321 | 2.269 | BFM + TFM |
| 250_10_10_15_T600 | 0.881 | 0.774 | 0.948 | 0.545 | 1.728 | 0.908 | BFM + TFM |
| 250_10_10_15_T800 | 0.301 | 0.295 | 0.289 | 0.166 | 0.526 | 0.276 | BFM |
| 250_10_10_20_T20 | 3.667 | 3.662 | 4.310 | 2.477 | 7.856 | 4.538 | BFM + TFM |
| 250_10_10_20_T200 | 3.812 | 3.807 | 4.030 | 2.316 | 7.345 | 4.243 | BFM + TFM |
| 250_10_10_20_T400 | 2.201 | 2.145 | 3.340 | 1.919 | 6.088 | 3.517 | BFM + TFM |
| 250_10_10_20_T500 | 1.514 | 1.514 | 2.371 | 1.362 | 4.321 | 2.496 | BFM + TFM |
| 250_10_10_20_T600 | 0.838 | 0.789 | 0.948 | 0.545 | 1.728 | 0.998 | BFM + TFM |
| 250_10_10_20_T800 | 0.247 | 0.209 | 0.289 | 0.166 | 0.526 | 0.304 | BFM + TFM |

Tabela 29- Resultados obtidos para os provetes da classe de chapa SGD280 e espessura de chapa 0.5 [mm].

| Ref | P_max | P_3mm | EC3-1-3 | | EC3-1-8 | | Modo de Falha |
|-------------------|-------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| | | | F _{V,Rd} | F _{b,Rd} | F _{V,Rd} | F _{b,Rd} | |
| 280_05_05_10_T20 | 1.197 | 1.008 | 4.310 | 0.955 | 7.856 | 1.500 | BFM |
| 280_05_05_10_T200 | 1.251 | 1.118 | 4.030 | 0.893 | 7.345 | 1.403 | BFM |
| 280_05_05_10_T400 | 0.988 | 0.786 | 3.340 | 0.740 | 6.088 | 1.163 | BFM |
| 280_05_05_10_T500 | 0.639 | 0.429 | 2.371 | 0.525 | 4.321 | 0.825 | BFM |
| 280_05_05_10_T600 | 0.472 | 0.338 | 0.948 | 0.210 | 1.728 | 0.330 | BFM |
| 280_05_05_10_T800 | 0.102 | 0.064 | 0.289 | 0.064 | 0.526 | 0.101 | BFM |
| 280_05_05_15_T20 | 1.278 | 0.923 | 4.310 | 0.955 | 7.856 | 2.250 | BFM + TFM |
| 280_05_05_15_T200 | 1.262 | 1.031 | 4.030 | 0.893 | 7.345 | 2.104 | BFM + TFM |
| 280_05_05_15_T400 | 1.085 | 0.695 | 3.340 | 0.740 | 6.088 | 1.744 | BFM + TFM |
| 280_05_05_15_T500 | 0.628 | 0.509 | 2.371 | 0.525 | 4.321 | 1.238 | BFM + TFM |
| 280_05_05_15_T600 | 0.440 | 0.283 | 0.948 | 0.210 | 1.728 | 0.495 | BFM + TFM |
| 280_05_05_15_T800 | 0.161 | 0.122 | 0.289 | 0.064 | 0.526 | 0.151 | BFM + TFM |
| 280_05_05_20_T20 | 1.256 | 0.768 | 4.310 | 0.955 | 7.856 | 2.475 | BFM + TFM |
| 280_05_05_20_T200 | 1.101 | 0.693 | 4.030 | 0.893 | 7.345 | 2.314 | BFM + TFM |
| 280_05_05_20_T400 | 0.988 | 0.614 | 3.340 | 0.740 | 6.088 | 1.918 | BFM + TFM |
| 280_05_05_20_T500 | 0.607 | 0.505 | 2.371 | 0.525 | 4.321 | 1.361 | BFM + TFM |
| 280_05_05_20_T600 | 0.387 | 0.290 | 0.948 | 0.210 | 1.728 | 0.545 | TFM |
| 280_05_05_20_T800 | 0.123 | 0.097 | 0.289 | 0.064 | 0.526 | 0.166 | BFM + TFM |

Tabela 30- Resultados obtidos para os provetes da classe de chapa SGD280 e espessura de chapa 1 [mm].

| Ref | P_max | P_3mm | EC3-1-3 | | EC3-1-8 | | Modo de Falha |
|-------------------|-------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| | | | F _{V,Rd} | F _{b,Rd} | F _{V,Rd} | F _{b,Rd} | |
| 280_10_10_10_T20 | 3.173 | 3.164 | 4.310 | 2.702 | 7.856 | 3.000 | BFM |
| 280_10_10_10_T200 | 3.238 | 3.165 | 4.030 | 2.526 | 7.345 | 2.805 | BFM |
| 280_10_10_10_T400 | 2.405 | 2.336 | 3.340 | 2.094 | 6.088 | 2.325 | BFM |
| 280_10_10_10_T500 | 1.681 | 1.643 | 2.371 | 1.486 | 4.321 | 1.650 | BFM |
| 280_10_10_10_T600 | 0.864 | 0.864 | 0.948 | 0.594 | 1.728 | 0.660 | BFM |
| 280_10_10_10_T800 | 0.215 | 0.166 | 0.289 | 0.181 | 0.526 | 0.201 | BFM |
| 280_10_10_15_T20 | 3.313 | 3.313 | 4.310 | 2.702 | 7.856 | 4.500 | BFM + TFM |
| 280_10_10_15_T200 | 3.608 | 3.201 | 4.030 | 2.526 | 7.345 | 4.208 | BFM + TFM |
| 280_10_10_15_T400 | 2.303 | 2.237 | 3.340 | 2.094 | 6.088 | 3.488 | BFM + TFM |
| 280_10_10_15_T500 | 1.638 | 1.586 | 2.371 | 1.486 | 4.321 | 2.475 | BFM + TFM |
| 280_10_10_15_T600 | 0.940 | 0.929 | 0.948 | 0.594 | 1.728 | 0.990 | BFM |
| 280_10_10_15_T800 | 0.193 | 0.156 | 0.289 | 0.181 | 0.526 | 0.302 | BFM |
| 280_10_10_20_T20 | 3.495 | 3.419 | 4.310 | 2.702 | 7.856 | 4.950 | BFM + TFM |
| 280_10_10_20_T200 | 3.350 | 3.221 | 4.030 | 2.526 | 7.345 | 4.628 | BFM + TFM |
| 280_10_10_20_T400 | 2.250 | 1.966 | 3.340 | 2.094 | 6.088 | 3.836 | BFM + TFM |
| 280_10_10_20_T500 | 1.546 | 1.246 | 2.371 | 1.486 | 4.321 | 2.723 | BFM + TFM |
| 280_10_10_20_T600 | 0.875 | 0.787 | 0.948 | 0.594 | 1.728 | 1.089 | BFM + TFM |
| 280_10_10_20_T800 | 0.226 | 0.190 | 0.289 | 0.181 | 0.526 | 0.332 | BFM + TFM |

Tabela 31- Resultados obtidos para os provetes da classe de chapa SGD280 com combinação de espessuras de chapa 0.5 [mm] e 1 [mm].

| Ref | P_max | P_3mm | EC3-1-3 | | EC3-1-8 | | Modo de Falha |
|-------------------|-------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| | | | F _{V,Rd} | F _{b,Rd} | F _{V,Rd} | F _{b,Rd} | |
| 280_05_10_10_T20 | 2.250 | 1.772 | 4.310 | 0.955 | 7.856 | 1.500 | BFM |
| 280_05_10_10_T200 | 2.089 | 1.974 | 4.030 | 0.893 | 7.345 | 1.403 | BFM |
| 280_05_10_10_T400 | 1.686 | 1.654 | 3.340 | 0.740 | 6.088 | 1.163 | BFM |
| 280_05_10_10_T500 | 1.230 | 1.153 | 2.371 | 0.525 | 4.321 | 0.825 | BFM |
| 280_05_10_10_T600 | 0.800 | 0.796 | 0.948 | 0.210 | 1.728 | 0.330 | BFM |
| 280_05_10_10_T800 | 0.209 | 0.204 | 0.289 | 0.064 | 0.526 | 0.101 | BFM |
| 280_05_10_15_T20 | 2.427 | 1.981 | 4.310 | 0.955 | 7.856 | 2.250 | BFM |
| 280_05_10_15_T200 | 2.400 | 2.035 | 4.030 | 0.893 | 7.345 | 2.104 | BFM |
| 280_05_10_15_T400 | 1.949 | 1.943 | 3.340 | 0.740 | 6.088 | 1.744 | BFM |
| 280_05_10_15_T500 | 1.401 | 1.389 | 2.371 | 0.525 | 4.321 | 1.238 | BFM |
| 280_05_10_15_T600 | 0.784 | 0.741 | 0.948 | 0.210 | 1.728 | 0.495 | BFM |
| 280_05_10_15_T800 | 0.226 | 0.220 | 0.289 | 0.064 | 0.526 | 0.151 | BFM + TFM |
| 280_05_10_20_T20 | 2.583 | 1.777 | 4.310 | 0.955 | 7.856 | 2.475 | BFM + TFM |
| 280_05_10_20_T200 | 2.636 | 1.964 | 4.030 | 0.893 | 7.345 | 2.314 | BFM |
| 280_05_10_20_T400 | 1.766 | 1.516 | 3.340 | 0.740 | 6.088 | 1.918 | BFM |
| 280_05_10_20_T500 | 1.342 | 1.311 | 2.371 | 0.525 | 4.321 | 1.361 | BFM + TFM |
| 280_05_10_20_T600 | 0.703 | 0.564 | 0.948 | 0.210 | 1.728 | 0.545 | BFM + TFM |
| 280_05_10_20_T800 | 0.166 | 0.156 | 0.289 | 0.064 | 0.526 | 0.166 | BFM + TFM |

Tabela 32- Resultados obtidos para os provetes da classe de chapa SGD320.

| Ref | P_max | P_3mm | EC3-1-3 | | EC3-1-8 | | Modo de Falha |
|-------------------|-------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| | | | F _{V,Rd} | F _{b,Rd} | F _{V,Rd} | F _{b,Rd} | |
| 320_05_05_10_T20 | 1.267 | 1.033 | 4.310 | 1.035 | 7.856 | 1.625 | BFM |
| 320_05_05_10_T200 | 1.557 | 1.292 | 4.030 | 0.968 | 7.345 | 1.519 | BFM |
| 320_05_05_10_T400 | 0.940 | 0.803 | 3.340 | 0.802 | 6.088 | 1.259 | BFM |
| 320_05_05_10_T500 | 0.746 | 0.516 | 2.371 | 0.569 | 4.321 | 0.894 | BFM |
| 320_05_05_10_T600 | 0.446 | 0.285 | 0.948 | 0.228 | 1.728 | 0.358 | BFM |
| 320_05_05_10_T800 | 0.091 | 0.075 | 0.289 | 0.069 | 0.526 | 0.109 | BFM |
| 320_05_05_15_T20 | 1.267 | 1.099 | 4.310 | 1.035 | 7.856 | 2.438 | BFM + TFM |
| 320_05_05_15_T200 | 1.283 | 1.062 | 4.030 | 0.968 | 7.345 | 2.279 | BFM + TFM |
| 320_05_05_15_T400 | 0.945 | 0.552 | 3.340 | 0.802 | 6.088 | 1.889 | BFM + TFM |
| 320_05_05_15_T500 | 0.762 | 0.496 | 2.371 | 0.569 | 4.321 | 1.341 | BFM + TFM |
| 320_05_05_15_T600 | 0.489 | 0.344 | 0.948 | 0.228 | 1.728 | 0.536 | BFM + TFM |
| 320_05_05_15_T800 | 0.118 | 0.113 | 0.289 | 0.069 | 0.526 | 0.163 | BFM |
| 320_05_05_20_T20 | 1.128 | 0.879 | 4.310 | 1.035 | 7.856 | 2.681 | BFM + TFM |
| 320_05_05_20_T200 | 1.058 | 0.962 | 4.030 | 0.968 | 7.345 | 2.507 | BFM + TFM |
| 320_05_05_20_T400 | 0.875 | 0.558 | 3.340 | 0.802 | 6.088 | 2.078 | BFM + TFM |
| 320_05_05_20_T500 | 0.779 | 0.617 | 2.371 | 0.569 | 4.321 | 1.475 | BFM + TFM |
| 320_05_05_20_T600 | 0.462 | 0.305 | 0.948 | 0.228 | 1.728 | 0.590 | BFM + TFM |
| 320_05_05_20_T800 | 0.102 | 0.073 | 0.289 | 0.069 | 0.526 | 0.180 | BFM + TFM |

Tabela 33- Resultados obtidos para os provetes da classe de chapa SGD350

| Ref | P_max | P_3mm | EC3-1-3 | | EC3-1-8 | | Modo de Falha |
|-------------------|-------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| | | | F _{V,Rd} | F _{b,Rd} | F _{V,Rd} | F _{b,Rd} | |
| 350_10_10_10_T20 | 3.807 | 3.398 | 4.310 | 3.152 | 7.856 | 3.500 | BFM |
| 350_10_10_10_T200 | 3.597 | 3.415 | 4.030 | 2.947 | 7.345 | 3.273 | BFM |
| 350_10_10_10_T400 | 3.409 | 3.399 | 3.340 | 2.443 | 6.088 | 2.713 | BFM |
| 350_10_10_10_T500 | 2.282 | 1.937 | 2.371 | 1.734 | 4.321 | 1.925 | BFM + TFM |
| 350_10_10_10_T600 | 1.181 | 1.008 | 0.948 | 0.693 | 1.728 | 0.770 | BFM + TFM |
| 350_10_10_10_T800 | 0.279 | 0.252 | 0.289 | 0.211 | 0.526 | 0.235 | BFM + TFM |
| 350_10_10_15_T20 | 4.054 | 3.978 | 4.310 | 3.152 | 7.856 | 5.250 | BFM + TFM |
| 350_10_10_15_T200 | 3.941 | 3.919 | 4.030 | 2.947 | 7.345 | 4.909 | BFM + TFM |
| 350_10_10_15_T400 | 3.152 | 3.037 | 3.340 | 2.443 | 6.088 | 4.069 | BFM + TFM |
| 350_10_10_15_T500 | 2.196 | 2.110 | 2.371 | 1.734 | 4.321 | 2.888 | BFM + TFM |
| 350_10_10_15_T600 | 1.219 | 1.149 | 0.948 | 0.693 | 1.728 | 1.155 | BFM + TFM |
| 350_10_10_15_T800 | 0.285 | 0.220 | 0.289 | 0.211 | 0.526 | 0.352 | BFM + TFM |
| 350_10_10_20_T20 | 4.086 | 4.041 | 4.310 | 3.152 | 7.856 | 5.775 | BFM + TFM |
| 350_10_10_20_T200 | 4.166 | 3.995 | 4.030 | 2.947 | 7.345 | 5.400 | BFM + TFM |
| 350_10_10_20_T400 | 3.012 | 3.007 | 3.340 | 2.443 | 6.088 | 4.476 | BFM + TFM |
| 350_10_10_20_T500 | 1.922 | 1.808 | 2.371 | 1.734 | 4.321 | 3.176 | BFM + TFM |
| 350_10_10_20_T600 | 1.160 | 1.052 | 0.948 | 0.693 | 1.728 | 1.271 | BFM + TFM |
| 350_10_10_20_T800 | 0.295 | 0.247 | 0.289 | 0.211 | 0.526 | 0.387 | BFM + TFM |

A5. Desenhos técnicos