



# 5.<sup>os</sup> JORNINC

Jornadas de Segurança  
aos **Incêndios Urbanos**

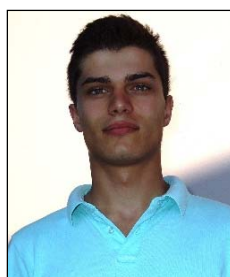
Lisboa • LNEC • 1 e 2 de junho de 2016



## ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES APARAFUSADAS AUTOPERFORANTES DE CHAPAS FINAS A TEMPERATURAS ELEVADAS



**Armandino Parente**  
Estudante  
IPB - Bragança



**Rui Dias**  
Estudante  
IPB - Bragança



**Luís Mesquita\***  
Professor  
IPB - Bragança

### RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo do comportamento das ligações autoperforantes de chapas finas sujeitas ao corte à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas. É realizada uma análise paramétrica dos diferentes modos de colapso da ligação para os diferentes níveis de temperatura, classe de resistência das chapas de aço da influência do efeito de bordo da ligação. São apresentados os resultados experimentais, utilizados para calibração e verificação do modelo numérico realizado pelo método dos elementos finitos. Este último será utilizado para a realização de uma análise paramétrica mais alargada do comportamento desta tipologia de ligações. Os resultados numéricos e experimentais são ainda comparados com a metodologia de cálculo simplificada apresentada nas normas Europeias.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ligações Autoperforantes; Temperaturas Elevadas; Chapas Finas; Ensaios Experimentais;

### 1. INTRODUÇÃO

O uso de aço galvanizado em estruturas tem aumentado em todo o mundo, nomeadamente na produção de elementos enformados a frio. Estes elementos são produzidos através de bobinas de aço revestido por zinco ou alumínio/zinco que posteriormente são conformadas com a forma pretendida e a sua espessura é normalmente inferior a 3 [mm]. Estes elementos são geralmente

---

\*Autor correspondente – Instituto Politécnico de Bragança, Departamento de Mecânica Aplicada, Campus Sta Apolonia Ap. 1134, 5300-857 Bragança, Portugal.  
email: lmesquita@ipb.pt

utilizados para produção de estruturas de aço leve (“light steel framing”), devido à sua leveza e resistência mecânica específica.

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. Tratando-se de chapas finas, com espessuras que normalmente variam entre 0.5 e 3 [mm], as ligações aparafusadas destes elementos são realizadas com parafusos autoperfurantes, sem necessidade de uma abertura prévia de um furo, como é apresentado na Figura 1.



Figura 1 – Utilização de parafusos autoperfurantes nos perfis enformados a frio.

A especificidade da tipologia destas ligações originam um comportamento distinto em relação às ligações aparafusadas convencionais. No caso das ligações autoperfurantes a resistência da ligação é normalmente determinada pela resistência ao esmagamento das chapas, e só em alguns casos de ligações de chapas mais espessas pela resistência ao corte do parafuso. Esta distinção é ainda mais acentuada no caso de estruturas submetidas a condições de incêndio. A taxa de aquecimento das chapas finas é superior à taxa de aquecimento dos parafusos, por em geral possuir uma massividade superior. Assim, com o aumento de temperatura, a diminuição da resistência ao esmagamento das chapas é superior ao da diminuição da resistência ao corte do parafuso, havendo uma inversão do modo de rotura em relação ao que ocorre à temperatura ambiente.

Este fenómeno já tem sido estudado por alguns investigadores, através de testes experimentais e simulações computacionais a temperaturas elevadas. Yan e Young realizaram testes do comportamento das ligações autoperfurantes a temperaturas elevadas em regime estacionário, [1], em que a carga mecânica é aplicada após a estabilização da temperatura, e em regime transiente, [2], no qual a ligação é sujeita a uma pré carga mecânica e posterior aumento de temperatura a taxa constante. Lu et al realizaram um estudo experimental e numérico sobre ligações aparafusadas com parafusos autoperfurantes a diferentes níveis de temperatura: 20 [°C], 200 [°C], 400 [°C] e 600 [°C]. 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], [3]. Os mesmos autores também realizaram um estudo numérico das ligações através do método dos elementos finitos no software Abaqus com uma análise explícita, [4].

Este trabalho apresenta um conjunto de ensaios experimentais e numéricos acerca do comportamento de ligações aparafusadas sujeitas ao corte simples de chapas de aço a temperaturas elevadas. As ligações são feitas com recurso a parafusos autoperfurantes. É realizado um estudo paramétrico ao nível da espessura das chapas a ligar e a influência da posição da ligação para vários valores de temperaturas elevadas, representativas da situação de incêndio.

## 2. VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA DAS LIGAÇÕES APARAFUSADAS

O dimensionamento das ligações aparafusadas deve ser efetuado à temperatura ambiente e também numa situação acidental de incêndio, no qual é necessário conhecer o valor de cálculo da resistência da ligação em função da temperatura de exposição. À temperatura ambiente, as ligações aparafusadas resistentes ao esmagamento, segundo a EN1993-1-8, devem verificar os critérios de segurança em relação à sua resistência ao corte e ao esmagamento. Esta metodologia difere da apresentada na EN1993-1-3, que fornece regras 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.

### 2.1 Dimensionamento de ligações aparafusadas à temperatura ambiente

A metodologia de dimensionamento das ligações aparafusadas sujeitas ao corte, definidas como da Categoria A segundo o EC3 parte 1.8, [5], define que o valor de cálculo do esforço transversal no estado de limite último do parafuso 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 ( $F_{v,Ed} < F_{b,Rd}$ ).

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

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

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.

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha f_u d t}{\gamma_{M2}} \quad (3)$$

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

$$\alpha = 3.2\sqrt{t/d} \leq 2.1 \quad \text{para } t = t_1 \quad (4)$$

$$\alpha = 3.2\sqrt{t/d} \leq 2.1 \quad \text{para } t_1 \geq 2.5t \text{ e } t < 1.0[mm] \quad (5)$$

$$\alpha = 2.1 \quad \text{para } t_1 \geq 2.5t \text{ e } t \geq 1.0[mm] \quad (6)$$

$t$  representa a espessura da chapa mais fina e  $t_1$  a espessura da chapa mais espessa. Nos casos não apresentados,  $\alpha$  é obtido por interpolação ( $t < t_1 < 2.5t$ ). Adicionalmente é necessário verificar a resistência ao corte do parafuso. Contudo esta parte do Eurocódigo 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 (7).

$$F_{v,Rd} = \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_{M2}} \quad (7)$$

$$F_{v,Rd} \geq 1.2F_{b,Rd} \text{ ou } F_{v,Rd} \geq 1.2F_{n,Rd} \quad (8)$$

Os valores experimentais são normalmente determinados através de ensaios experimentais realizados pelos fabricantes dos parafusos aquando da certificação do produto baseado 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 [7].

O anexo D da norma 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 a temperaturas elevadas é determinada pelas equações seguintes, nas quais  $F_{v,Rd}$  e  $F_{b,Rd}$  correspondem à resistência do parafuso à temperatura ambiente.

$$F_{v,t,Rd} = F_{v,Rd} k_{b,\theta} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M,fi}} \quad (9)$$

$$F_{b,t,Rd} = F_{b,Rd} k_{b,\theta} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M,fi}} \quad (10)$$

$k_{b,\theta}$  representa o valor de redução determinado para a temperatura dos parafusos. 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 é determinada em função deste parâmetro e da sua resistência à temperatura ambiente.

### 3. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1 Ensaios de ligações aparafusadas de chapas finas

Este trabalho apresenta um conjunto de ensaios experimentais a temperaturas elevadas acerca do comportamento de ligações aparafusadas sujeitas ao corte simples de chapas de aço finas galvanizadas, utilizadas na produção de perfis enformados a frio. A chapa de aço galvanizada é da classe DX51D +Z (EN10342) com  $f_y = 284 [MPa]$  e  $f_u = 355 [MPa]$ . As ligações são feitas com recurso a parafusos autoperfurantes. O parafuso de cabeça sextavada, com a referência SFS SD6-H15 Ø5,5 x 22 [mm] e com um diâmetro de  $D=5,5$  [mm], [9]., é colocado ao longo da linha central das chapas e a diferentes distâncias da extremidade ao centro do furo, conforme as seguintes medidas 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 1.5+1.5, 2.0+1.5 e 2.0+2.0 [mm], para diferentes níveis de temperatura, representativas de uma ação de incêndio.

Os testes apresentados permitem aferir da influência destes parâmetros na resistência da ligação e adicionalmente no modo de rotura da mesma.

O setup experimental é composto por um sistema de aplicação de carga, no qual a força de tração é realizada por uma máquina de ensaios universal (Figura 2), originando um esforço atuante de corte no parafuso. Os elementos são colocados no interior de um forno resistivo, cuja temperatura, medida por termopares do tipo K, é controlada por um sistema PID. Após a estabilização da temperatura pretendida e aplicação de uma pré carga inicial, de aproximadamente 0.1 [kN], é iniciado o teste com um controlo de deslocamento à velocidade de 1 [mm/min], tendo como referência a documentação técnica da ECCS, [10]. De acordo com este procedimento, a carga de colapso da ligação é determinada pela carga máxima obtida num alongamento de 3 [mm], medido através de um extensómetro num comprimento de referência de 150 [mm]. Para a determinação do deslocamento do comprimento de referência foram utilizados dois varões auxiliares fixos às chapas de aço que permitem o acoplamento do extensómetro mecânico numa zona exterior do forno, conforme se pode ver na Figura 2.

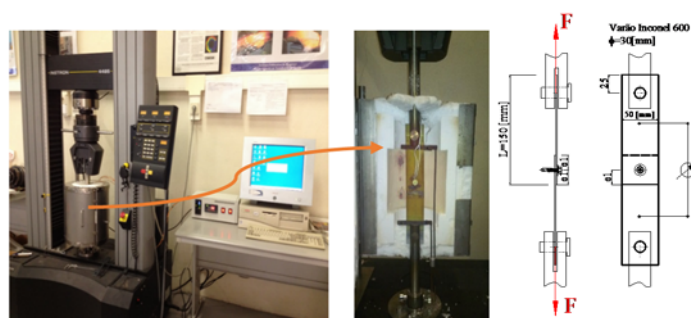


Figura 2 - Setup experimental para ensaio de ligações aparafusadas.

Nas ligações aparafusadas solicitadas ao corte, o modo de colapso deve-se essencialmente aos mecanismos de rotura por corte do parafuso (SFM), rotura por esmagamento da chapa (BFM), 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). 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.

A Figura 3 apresenta os resultados experimentais das ligações de chapas 1.5+1.5 [mm], ao nível da força aplicada em função do deslocamento, para diferentes distâncias do efeito de bordo e do valor de temperatura.

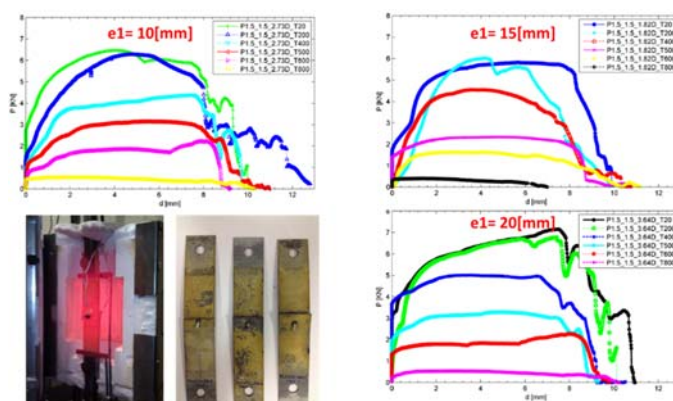


Figura 3 - Resultados experimentais das chapas 1.5+1.5 [mm] à temperatura de 20, 200, 400, 500, 600 e 800 [°C].

A Tabela 1 apresenta os resultados da carga máxima, do valor de carga aos 3 [mm] de deslocamento e o modo de rotura verificado em cada teste. Na mesma tabela a resistência da ligação, obtida nos testes experimentais, pode ser comparada com os valores de cálculo dos métodos simplificados do EC3-1-8 e EC3-1-3, considerando fatores parciais de segurança unitários.

Os valores da resistência da ligação diminuem tendencialmente com o aumento da temperatura, com a exceção dos testes realizados a 200 [°C] que requerem testes adicionais de confirmação. Para a mesma combinação de chapas a ligar, 1.5+1.5 ou 2.0+1.5, verifica-se que a resistência aumenta com o aumento da distância  $e_1$ , qualquer que seja a temperatura a que a ligação se encontre. No entanto, a tabela mostra que a distância à extremidade ( $e_1$ ) e principalmente a temperatura da ligação influencia o modo de rotura. Para as chapas a ligar mais finas (1.5+1.5) quando é utilizada uma distância  $e_1=10$  [mm] o modo de rotura é sempre devido ao esmagamento da chapa, enquanto que para  $e_1=20$  [mm] o modo mais preponderante é o da rotação/escorregamento do parafuso. Para a combinação de chapas a ligar 2.0+1.5 com uma distância  $e_1=20$  [mm] o modo de rotura é por corte do parafuso, com exceção do caso à temperatura ambiente. Já para as chapas a ligar de 2.0+2.0 a uma temperatura de 500 [°C] o modo de rotura é sempre por corte do parafuso, independentemente da distância da ligação à extremidade.

Tabela 1: Características e resultados obtidos dos ensaios (carga máxima, carga a 3 [mm] de deformação e modo de rotura)

| Referência          | P <sub>MAX</sub><br>[kN] | P <sub>[d=3mm]</sub><br>[kN] | Modo<br>Rotura | EC3-1-8 |         | EC3-1-3 |         |
|---------------------|--------------------------|------------------------------|----------------|---------|---------|---------|---------|
|                     |                          |                              |                | Fb,t,Rd | Fv,t,Rd | Fb,t,Rd | Fv,t,Rd |
| P1.5+1.5_1.82d_T20  | 5.820                    | 5.514                        | BFM            | 4.438   | 6.808   | 4.894   | 3.430   |
| P1.5+1.5_1.82d_T200 | 6.008                    | 5.659                        | BFM            | 5.432   | 8.332   | 5.991   | 4.198   |
| P1.5+1.5_1.82d_T400 | 4.537                    | 4.435                        | BFM            | 3.075   | 4.718   | 3.392   | 2.377   |
| P1.5+1.5_1.82d_T500 | 2.336                    | 2.303                        | BFM            | 1.771   | 2.716   | 1.953   | 1.369   |
| P1.5+1.5_1.82d_T600 | 1.622                    | 1.616                        | BFM+TFM        | 1.052   | 1.613   | 1.160   | 0.813   |
| P1.5+1.5_2.73d_T20  | 6.459                    | 6.266                        | TFM+SFM        | 6.656   | 6.808   | 4.894   | 3.430   |
| P1.5+1.5_2.73d_T200 | 6.260                    | 5.686                        | BFM            | 8.147   | 8.332   | 5.991   | 4.198   |
| P1.5+1.5_2.73d_T400 | 4.387                    | 3.871                        | TFM            | 4.613   | 4.718   | 3.392   | 2.377   |
| P1.5+1.5_2.73d_T500 | 3.141                    | 2.964                        | TFM            | 2.656   | 2.716   | 1.953   | 1.369   |
| P1.5+1.5_2.73d_T600 | 2.223                    | 1.777                        | SFM            | 1.578   | 1.613   | 1.160   | 0.813   |
| P1.5+1.5_3.64d_T20  | 7.152                    | 6.051                        | TFM            | 7.322   | 6.808   | 4.894   | 3.430   |
| P1.5+1.5_3.64d_T200 | 6.765                    | 6.003                        | TFM            | 8.962   | 8.332   | 5.991   | 4.198   |
| P1.5+1.5_3.64d_T400 | 5.004                    | 4.999                        | TFM            | 5.074   | 4.718   | 3.392   | 2.377   |
| P1.5+1.5_3.64d_T500 | 3.281                    | 3.125                        | TFM            | 2.921   | 2.716   | 1.953   | 1.369   |
| P1.5+1.5_3.64d_T600 | 2.266                    | 1.766                        | SFM            | 1.735   | 1.613   | 1.160   | 0.813   |
| P2.0+1.5_1.82d_T20  | 5.750                    | 5.101                        | BFM            | 4.438   | 6.808   | 5.173   | 4.310   |
| P2.0+1.5_1.82d_T200 | 6.631                    | 6.325                        | BFM            | 5.432   | 8.332   | 6.332   | 5.275   |
| P2.0+1.5_1.82d_T400 | 4.977                    | 4.940                        | BFM            | 3.075   | 4.718   | 3.585   | 2.987   |
| P2.0+1.5_1.82d_T500 | 3.001                    | 2.996                        | BFM            | 1.771   | 2.716   | 2.064   | 1.720   |
| P2.0+1.5_1.82d_T600 | 1.670                    | 1.664                        | BFM+SFM        | 1.052   | 1.613   | 1.226   | 1.021   |
| P2.0+1.5_2.73d_T20  | 8.086                    | 6.636                        | SFM            | 6.656   | 6.808   | 5.173   | 4.310   |
| P2.0+1.5_2.73d_T200 | 8.666                    | 7.452                        | SFM            | 8.147   | 8.332   | 6.332   | 5.275   |
| P2.0+1.5_2.73d_T400 | 5.702                    | 5.380                        | TFM+SFM        | 4.613   | 4.718   | 3.585   | 2.987   |
| P2.0+1.5_2.73d_T500 | 3.511                    | 3.485                        | TFM+SFM        | 2.656   | 2.716   | 2.064   | 1.720   |
| P2.0+1.5_2.73d_T600 | 1.863                    | 1.788                        | TFM+SFM        | 1.578   | 1.613   | 1.226   | 1.021   |
| P2.0+1.5_3.64d_T20  | 8.274                    | 6.481                        | TFM            | 7.322   | 6.808   | 5.173   | 4.310   |
| P2.0+1.5_3.64d_T200 | 7.501                    | 7.114                        | SFM            | 8.962   | 8.332   | 6.332   | 5.275   |
| P2.0+1.5_3.64d_T400 | 4.730                    | 4.515                        | TFM+SFM        | 5.074   | 4.718   | 3.585   | 2.987   |
| P2.0+1.5_3.64d_T500 | 3.458                    | 3.426                        | TFM+SFM        | 2.921   | 2.716   | 2.064   | 1.720   |
| P2.0+1.5_3.64d_T600 | 1.885                    | 1.681                        | TFM+SFM        | 1.735   | 1.613   | 1.226   | 1.021   |
| P1.5+1.5_1.82d_T800 | 0.397                    | 0.344                        | BFM            | 0.186   | 0.285   | 0.205   | 0.144   |
| P1.5+1.5_2.73d_T800 | 0.537                    | 0.526                        | TFM            | 0.279   | 0.285   | 0.205   | 0.144   |
| P1.5+1.5_3.64d_T800 | 0.532                    | 0.532                        | TFM            | 0.307   | 0.285   | 0.205   | 0.144   |
| P2.0+2.0_1.82d_T20  | 8.059                    | 6.196                        | SFM            | 5.917   | 6.808   | 7.535   | 4.310   |
| P2.0+2.0_2.73d_T20  | 8.977                    | 5.981                        | SFM            | 8.875   | 6.808   | 7.535   | 4.310   |
| P2.0+2.0_3.64d_T20  | 9.364                    | 7.060                        | SFM            | 9.763   | 6.808   | 7.535   | 4.310   |
| P2.0+2.0_1.82d_T500 | 3.474                    | 3.474                        | SFM            | 2.361   | 2.716   | 3.007   | 1.720   |
| P2.0+2.0_2.73d_T500 | 3.640                    | 3.452                        | SFM            | 3.541   | 2.716   | 3.007   | 1.720   |
| P2.0+2.0_3.64d_T500 | 3.839                    | 3.650                        | SFM            | 3.895   | 2.716   | 3.007   | 1.720   |

#### 4. MODELAÇÃO NUMÉRICA DAS LIGAÇÕES APARAFUSADAS DE CHAPAS FINAS

O modelo estrutural utilizado nas simulações computacionais, através do método dos elementos finitos, encontra-se apresentado na Figura 4. Este modelo segue o setup experimental utilizado nas secções anteriores, no qual uma das extremidades da placa possui o deslocamento restringido e na outra placa é aplicada uma carga mecânica continuamente crescente até se obter a carga de colapso. As simulações são efetuadas no software Ansys através de simulações não lineares ao nível da geometria e do material. Os elementos estruturais, incluindo o parafuso, são modelados através de elementos sólidos tridimensionais (Solid186 e Solid187) e as

superfícies de contato chapa-parafuso e chapa-chapa modeladas por elementos contato (Conta174 e Targe170). Todas as superfícies de contato são consideradas rugosas com um coeficiente de atrito igual a 0.2, mantendo-se uma malha mais refinada nestas superfícies com vista a uma melhor simulação do contato entre os nós dos elementos finitos.

O comportamento não linear do material das placas foi simulado através das curvas tensão-deformação apresentadas no Eurocodigo 3 parte 1.2 a temperaturas elevadas, [8]. Estas curvas são determinadas em função do valor característico da tensão de cedência do material das chapas e dos coeficientes de redução em função da temperatura aí apresentados.

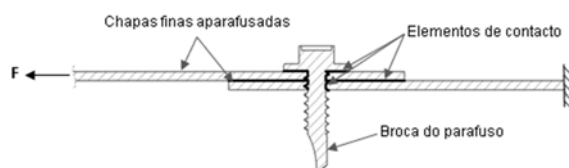


Figura 4 - Modelo geométrico utilizado na simulação numérica e representação das superfícies de contato.

No caso de chapas finas, sendo consideradas de classe 4, o valor da tensão de cedência e a sua variação com a temperatura deve ser considerado igual à tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.2%. Para esta classe não são apresentados os coeficientes de redução da tensão de cedência a 2%. Esta alteração obriga a uma ligeira modificação das equações de cálculo das curvas tensão-deformação apresentadas pelo Eurocódigo 3 parte 1-2, consistindo num processo iterativo de cálculo dos coeficientes de redução a 2%, e respetiva tensão de cedência, de modo que a tensão limite de proporcionalidade a 0.2% coincida com os valores fornecidos no anexo E da EN1993-1-2, [8].

No Ansys quando é realizada uma análise elasto-plástica é necessário converter as curvas tensão-deformação de engenharia para tensão verdadeira e deformação verdadeira, considerando as tensões e deformações nominais das curvas fornecidas pelo EC3-1-2. As curvas tensão-deformação verdadeiras são introduzidas para diferentes níveis de temperatura das chapas de aço galvanizadas S350GD+Z, isto é com uma tensão de cedência a 0.2% de 350 [MPa], considerando o endurecimento até 400 [°C].

Na ausência de uma classificação da classe do material dos parafusos, e considerando o resultado de um conjunto de testes de tração realizados aos parafusos à temperatura ambiente (com uma tensão última média de 1135.67 [MPa]), foram classificados como sendo da classe 10.9. As curvas tensão deformação seguem um modelo bilinear definido pela tensão de cedência nominal e por um módulo tangente igual a  $E/100$ .

#### 4.1 Simulações numéricas

As simulações realizadas à temperatura ambiente seguem um princípio de análise por duas etapas (steps). No primeiro não é aplicada qualquer carga mecânica ( $F=0$ ), e consiste na determinação das condições de equilíbrio de pressão de contato devido às condições de contato



entre as várias superfícies. Como não foi determinada a carga de pretensão dos parafusos, esta não é incluída na análise numérica. A segunda etapa consiste na aplicação de uma carga linearmente crescente no tempo, com incrementos mínimos de 1 [N], até se atingir a carga de colapso da ligação.

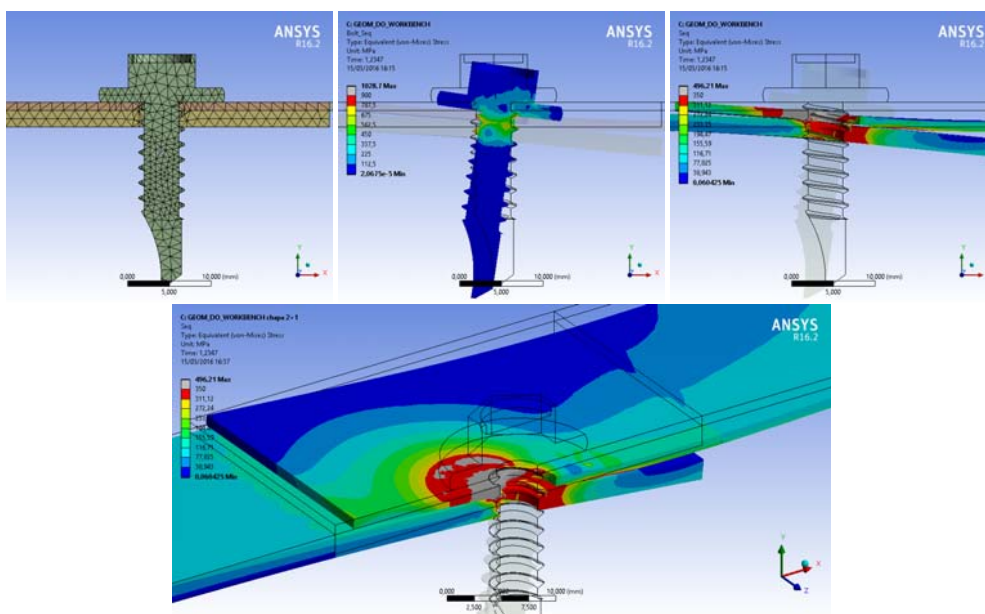


Figura 5 – Modelo de Elementos Finitos das chapas 2+1 [mm]. Distribuição das tensões equivalentes de von Mises nas chapas e no parafuso no instante do colapso.

A Figura 5 apresenta o modelo de elementos finitos da ligação aparafusada de duas chapas com 2 e 1 [mm] de espessura e uma distância à furação de 20 [mm]. Para reduzir o tempo de análise do modelo foi tida em consideração as condições de simetria do mesmo. A distribuição das tensões equivalentes de von Mises mostram a área plastificada das chapas, com tensões superiores à tensão de cedência, e uma pequena área plastificada do parafuso junto do filete do mesmo, com tensões superiores a 900 [MPa]. A carga aplicada no instante do colapso da ligação é de 4693,4 [N]. Os resultados das simulações realizadas com a combinação de espessuras de chapas 2+2 [mm] permitem obter uma carga máxima de 5600 [N].

## 5. CONCLUSÕES

Os testes experimentais apresentados permitiram determinar a resistência das ligações aparafusadas autoperfurantes em chapas finas determinando também a influência da espessura da chapa, do efeito de bordo ( $e_1$ ) e da temperatura. Para a mesma ligação, mantendo a espessura da chapa e a distância  $e_1$ , verifica-se em algumas combinações uma mudança do modo de rotura com o aumento de temperatura. Verificou-se também a ocorrência de 3 modos de falha sendo eles rotura pelo parafuso, rotura por arrancamento da chapa e ainda a combinação de ambos. As ligações com chapa dupla de 2.0 [mm] têm um modo de rotura por

corte do parafuso à temperatura ambiente e a 500 [°C]. Nas ligações com chapa dupla de 1.5 [mm] o modo de rotura varia com a distância e1 e passa de rotura por esmagamento para rotação e corte do parafuso a temperaturas mais elevadas.

O modelo numérico apresentado permite obter o comportamento e a capacidade de carga das ligações autoperfurantes. Os casos apresentados fornecem um valor da resistência da ligação próxima do valor característico fornecido pelo fabricante dos parafusos.

Encontra-se planeado um conjunto de testes experimentais adicionais para se efetuar uma análise paramétrica ao nível da classe do material da chapa de aço (SGD220, SGD280, SGD320 e SGD350) com várias espessuras da chapa.

## AGRADECIMENTOS

Os autores reconhecem o apoio e o fornecimento dos materiais utilizados no estudo das empresas SFS INTEC, LUSOSIDER e IRMALEX.

## REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Lu, W., et al., *Design of screwed steel sheeting connection at ambient and elevated temperatures*. Thin-Walled Structures, 2011. **49**(12): p. 1526-1533.
- [4] 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.
- [5] Portugal. 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.
- [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.
- [7] EOTA, *ETA-10/0198 Fastening screws for metal members and sheeting, Fastening screws SFS, SFS intec AG*. 2013: European Organisation for Technical Approvals.
- [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] SFS-INTEC, *Technical performance values for SFS fasteners*, SFS-INTEC, Editor. 2000: Prestbury.
- [10] ECCS-TC7, *ECCS TC 7: The Testing of Connections with Mechanical Fasteners in Steel Sheetting and Sections*. Vol. N° 124. 2009, Brussels: Brussels.