

Efeito do comprimento de sobreposição na resistência de juntas adesivas de simples sobreposição.

André Ferreira, Luís Linhares, Pedro Gustavo, Vasco Branco.

19 de Dezembro de 2013

Resumo: Prepararam-se duas juntas de um aço macio DIN St33 e duas de um aço duro DIN 55 Si 7 com adesivo de poliuretano rígido SikaForce® 7888 com diferentes comprimentos de sobreposição, ensaiaram-se à tração e observou-se o efeito da variação do comprimento de sobreposição, juntamente com o tipo de aço, na resistência à tração da junta.

0 – Introdução

Pretendeu-se com esta experiência:

- Aprender os cuidados a ter na preparação e execução de uma junta adesiva;
- Ensaiar à tração juntas de simples sobreposição usando o mesmo adesivo mas fazendo diferentes combinações de comprimentos de sobreposição para um substrato de aço duro e um de aço macio;
- Observar a influência da variação do comprimento de sobreposição e do material que compõem o substrato, na resistência à tração da junta.
- Comparar as forças de rotura previstas pelos modelos de Volkersen, Hart-Smith e Goland e Reissner com as obtidas experimentalmente e determinar qual o critério que melhor se aproxima a cada uma das combinações;
- Compreender o potencial das juntas adesivas como tecnologia alternativa para a junção de peças.

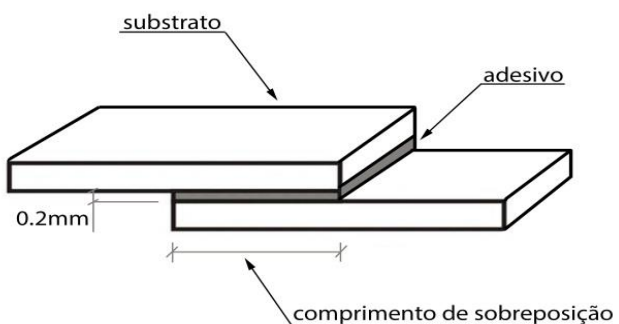


Fig. 1 – Elementos que constituem o provete.

1 – Procedimento

Começou-se por granalhar as zonas de contacto do provete com o adesivo usando um jato de partículas de óxido de Al. Este processo garante uma melhor preparação em termos de uniformidade de toda a superfície do que a que se

teria lixando manualmente. As partículas usadas são calibradas no sentido de produzissem rugosidade de forma a que o ângulo de contacto na molhagem seja inferior a 90°.

Devido à sua dureza, estas partículas também eliminam facilmente a contaminação à superfície. Isto aumenta a energia superficial e promove uma melhor adesão do adesivo. Visto que não é preciso durabilidade não foi necessário anodização nem ataque químico.



Fig. 2 – Processo de granalhagem.

Depois limpam-se as superfícies com papel absorvente e acetona removendo os pós resultantes da granalhagem. O manuseamento fez-se com cuidado para não contaminar a superfície com gordura. A gordura tem baixa energia superficial logo é altamente indesejável, porque dificulta o processo de aderência do adesivo.



Fig. 3 – Aspetto da superfície após granalhagem.

Seguiu-se a aplicação do adesivo. Usando o molde produzido na FEUP controlou-se o alinhamento e comprimento de sobreposição do substrato bem como a espessura e excesso de adesivo. Isto consegue-se colocando o substrato

superior sobre um calço, que fica levantado em relação ao inferior de 0.2mm. A espessura do calço de 2.2mm é igual à soma da espessura do substrato 2.0mm com a espessura do adesivo pretendida de 0.2mm.



Calço (controla a espessura e o filete)

Fig. 4 – Posicionamento do calço e dos substratos no molde.

O adesivo SikaForce® 7888 vem em pasta num tubo com dois reservatórios, um de resina e outro de endurecedor. Uma pistola pneumática industrial permite a injeção da quantidade certa de resina e endurecedor.



Fig. 5 – Reservatórios da mistura adesiva e pistola de aplicação.

O dispositivo tem um bico que extrai o conteúdo dos reservatórios nas devidas proporções. Porque a mistura manual introduz bolhas de ar e não se pretende porosidade na preparação, colocou-se uma pequena porção num copo e misturou-se usando uma misturadora por centrifugação. Isto permite obter uma mistura totalmente livre de bolhas. Com uma espátula aplicou-se manualmente na área de colagem.



Fig. 6 – Máquina de centrifugação (dta.); Espátula e copo com adesivo (esq.).

Prepararam-se 4 provetes, dois em aço macio DIN St33 e dois em aço duro DIN 55 Si 7 com comprimentos de sobreposição de 12.5 e 50mm.

Para evitar que o adesivo, por descuido, caísse no molde, endurecesse e ficando o molde com adesivo, todo o molde foi previamente untado com um agente desmoldante.

Depois fechou-se o molde e aplicou-se uma força de 1000kg para garantir que o posicionamento das juntas não se alterasse durante o processo de cura.



Fig. 7 – Molde fechado.

A cura durou sete dias e fez-se à temperatura ambiente seguindo as indicações do fabricante.

Após a colagem, os provetes foram retirados do molde e verificou-se que apresentavam excesso de adesivo nos bordos da junta. O excesso de adesivo é desejável porque garante uma transmissão de força mais suave. No entanto, garantir que todas as preparações fiquem com o mesmo excesso é difícil, o que tornaria os ensaios incomparáveis. Optou-se então por remover esse excesso de todos os provetes. Confirmou-se ao microscópio a espessura de adesivo e, estando correta, referenciou-se os provetes como MC - “Macio Curto”; ML - “Macio Longo”; DC - “Duro Curto” e DL - “Duro Longo”.

Finalmente, ensaiaram-se, um de cada vez, os 4 provetes à tração a uma velocidade constante de 2mm/min sendo guardados os dados relativos ao tempo decorrido, deslocamento e força aplicada.



Fig. 8 – Ensaio de tração na máquina MTS. Note-se a rotação da junta devido ao momento fletor.

2 - Previsões usando diferentes critérios

Dados:

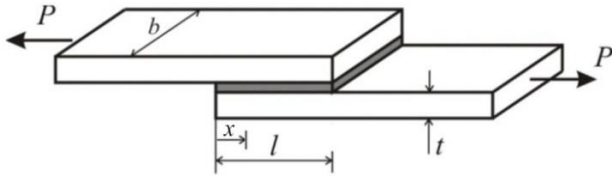


Fig. 9 – Nomenclatura utilizada.

- Tensão de cedência ao corte do adesivo
 $\tau_y = 25MPa$
- Módulo de elasticidade ao corte do adesivo
 $G_a = 0.678 GPa$
- Espessura de adesivo
 $t_a = 0.2mm$
- Espessura dos substratos
 $t_1 = t_2 = 2mm$
- Comprimento de sobreposição
 $l = 12,5 e 50mm$
- Largura do substrato
 $b = 25mm$
- Módulo elasticidade dos substratos
 $E_1 = E_2 = 210GPa$
- Tensão de cedência dos substratos
 $\sigma_y = \begin{cases} 185MPa & (\text{aço macio}) \\ 1110MPa & (\text{aço duro}) \end{cases}$

Critério de Volkersen

Segundo o modelo de Volkersen, a tensão de corte é máxima nas extremidades da junta. Este critério tem apenas em conta as deformações relativas à elasticidade. Desta forma, o critério é válido durante a deformação elástica dos substratos desde que haja continuidade na interface ou quando o adesivo e substrato tem comportamento frágil, isto é, não deformam plasticamente. Nestas situações este critério constitui uma boa aproximação ao problema. Contudo, na atividade experimental foi usado um adesivo que se sabe ser dúctil. Por não ter em conta o comportamento real do adesivo que é dúctil, o resultado virá afetado de erro e, por isso, espera-se que as forças de rotura experimentais sejam superiores já que irão incluir a tensão de deformação plástica.

Adicionalmente, devido à espessura do adesivo e dos substratos e ao facto de estarem sobrepostos, quando o provete é tracionado, as forças ficam desviadas do eixo neutro e formam um binário que se traduz num momento fletor na zona de sobreposição e cuja influência na resistência quer do adesivo quer do substrato não pode ser desprezada (fig.13).

Contudo, este é um método muito usado porque as previsões dão sempre valores abaixo dos valores reais e por isso, do lado da segurança.

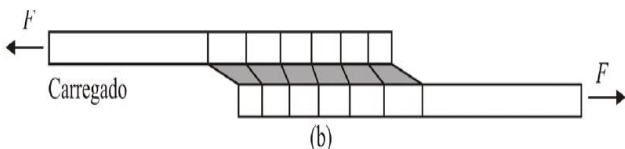


Fig. 10 – Modelo de Volkersen. ^[1]

Cálculo da força correspondente ao momento em que a tensão atinge a tensão de cedência do adesivo.

$$\frac{\tau}{\bar{\tau}} = \frac{\lambda l}{k \sinh(\lambda l)} [(k-1) \cosh(\lambda(l-x)) + \cosh(\lambda x)]$$

$$k = \frac{E_1 t_1}{E_2 t_2} + 1$$

$$\lambda = \left[\frac{G_a}{t_a} \left(\frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right) \right]^{0.5}$$

Substituindo pelos valores indicados anteriormente, determina-se λ e k :

$$k = 2$$

$$\lambda = 127.05$$

Considerando a expressão $\bar{\tau} = \frac{P}{b \cdot l}$ e substituindo-a na equação de Volkersen resolvendo em ordem a P vem:

$$P = \frac{b l \tau k \sinh(\lambda l)}{\lambda [(k-1) \cosh(\lambda(l-x)) + \cosh(\lambda x)]}$$

A tensão de corte máxima no adesivo ocorre nas extremidades, o que corresponde a $x = 0$ ou $x = l$. Isto significa que nas extremidades é necessária menos força para se atingir a rotura do adesivo, como se pode verificar nos gráficos obtidos da equação acima, para comprimentos de sobreposição de 12.5 e 50 mm e incrementos de x de 2.5 e 10 mm respetivamente.

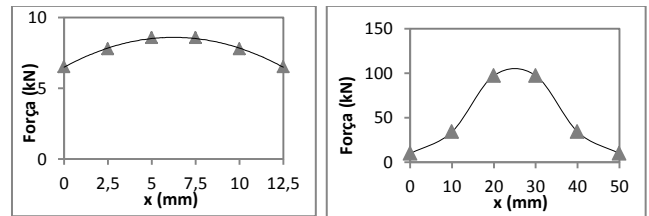


Fig. 11 - Andamento da força a aplicar ao provete para se dar a cedência em determinadas posições do adesivo.

Assim sendo:

- Para $l = 12,5mm \rightarrow P = 6500,4 N$
- Para $l = 50mm \rightarrow P = 9804,4 N$

As forças de rotura para os aços macio e duro são as mesmas já que o único valor relativo às propriedades do substrato que entra na expressão é o módulo de elasticidade que é o mesmo para ambos os aços. O comprimento de sobreposição é, por isso, o único fator de comparação.

Lembre-se que nenhum destes valores serve de boa aproximação aos resultados experimentais já que o adesivo é dúctil e o critério é mais apropriado para adesivos frágeis.

Critério de cedência generalizada no adesivo

Ao perceber que a plasticidade do adesivo aumenta a resistência relativamente a uma análise puramente elástica, Hart-Smith propôs um modelo alternativo ao de Volkersen ao modelar o adesivo como tendo um comportamento elasto-plástico, isto é, contabilizando a plasticidade do adesivo.

Ao ceder plasticamente um adesivo dúctil suporta uma força adicional até atingir a sua tensão de rotura. Assim, conclui-se que é preferível ter uma junta com um adesivo dúctil porque, além de ter maior resistência, é mais seguro, já que a deformação plástica pode ser observada indicando a eminência da rotura.

Porém, para comprimentos de sobreposição muito grandes atinge-se a tensão de rotura antes da completa deformação plástica ao longo de todo o comprimento de sobreposição, aparecendo ao centro uma zona deformada apenas elasticamente. Isto acontece porque, se o aço for macio e deformar plasticamente, concentra a deformação na extremidade da sobreposição e não deixa o adesivo trabalhar totalmente.

Ao contabilizar apenas a deformação plástica do adesivo, este modelo não é aplicável aos aços macios onde ocorre a deformação plástica do substrato. Contudo espera-se que este critério seja uma boa aproximação aos resultados obtidos nas experiências relativas aos aços duros, uma vez que a tensão de rotura nestes casos é determinada pela resistência do adesivo e há baixa deformação plástica do substrato.

Este critério permite, assim, calcular a força de rotura no momento em que todo o comprimento de sobreposição atingiu a tensão de cedência do adesivo o que só acontece quando se trabalha com adesivos muito dúcteis, como é o caso do adesivo em estudo.

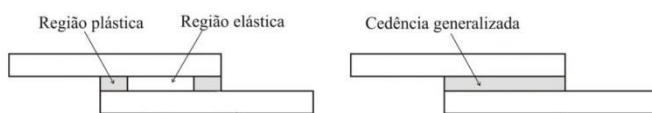


Fig. 12 – Modelo de Hart-Smith. [1]

$$P_{\text{máx}} = \tau_y b l$$

- Para $l = 12,5\text{mm} \rightarrow P_{\text{máx}} = 7812,5\text{ N}$
- Para $l = 50\text{mm} \rightarrow P_{\text{máx}} = 31250\text{ N}$

Os valores obtidos são independentes do aço já que ambos têm a mesma tensão de cedência ao corte. Porém os valores não podem ser usados como aproximação para o aço macio porque é dúctil e deforma plasticamente mas, sendo o adesivo dúctil, funciona bem para o aço duro.

Critério de cedência dos substratos

O critério de Hart-Smith não considera que os substratos podem plastificar.

Quando os substratos se deformam plasticamente, a sua cedência provoca uma deformação adicional no adesivo e leva-o mais rapidamente à rotura. Adams et al (1997) criaram uma metodologia para as situações em que tanto o adesivo como o substrato se deformam plasticamente. Os investigadores propõem que para montagens com substratos que não se deformem plasticamente e adesivos dúcteis se

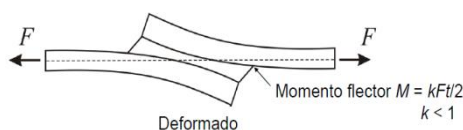


Fig. 13 – Modelo de Goland e Reissner. [1]

adote o modelo de Hart-Smith mas para substratos e adesivos dúcteis e que se deformem plasticamente e apoiando-se na teoria de Goland e Reissner sugerem que:

$$\text{se } \frac{l}{t} < 20 \text{ então } k \approx 1 \text{ então } P_{\text{máx}} = \frac{\sigma_y b t}{4}$$

$$\text{se } \frac{l}{t} \geq 20 \text{ então } k \approx 0 \text{ então } P_{\text{máx}} = \sigma_y b t$$

Neste critério é importante determinar a razão entre o comprimento de sobreposição e a espessura do substrato, e consequentemente, identificar o valor do fator k que permitirá contabilizar o efeito rotação da junta devido ao momento fletor.

Este critério deverá ser uma boa previsão das forças de rotura dos aços macios, pois sendo dúcteis espera-se que se deformem plasticamente e o critério tem em conta a deformação do substrato. Note-se que a rotura, neste caso, é devida à baixa resistência do aço e não ao adesivo ou seja, é a deformação plástica do aço que controla a rotura.

O critério de cedência no substrato apresenta-se como sendo a melhor opção para prever as forças de rotura. Permite calcular a força correspondente ao momento em que o aço começa a deformar plasticamente.

- Para $l = 12,5\text{mm}$:

$$\frac{l}{t} = 6,25 < 20 \text{ então } k \approx 1 \text{ e } P_{\text{máx}} = \frac{\sigma_y b t}{4}$$

$$P_{\text{máx}} = 2312,5\text{ N para aço macio}$$

$$P_{\text{máx}} = 13750\text{ N para aço duro}$$

- Para $l = 50\text{mm}$:

$$\frac{l}{t} = 25 \geq 20 \text{ então } k \approx 0 \text{ e } P_{\text{máx}} = \sigma_y b t$$

$$P_{\text{máx}} = 9250\text{ N para aço macio}$$

$$P_{\text{máx}} = 55000\text{ N para aço duro}$$

Apesar de calculados, os valores obtidos para o aço duro não se podem usar como previsão porque para tal e segundo Adams et al (1997) deve usar-se o critério de Hart-Smith.

Na tabela 1 resumem-se os valores obtidos para as previsões segundo os diferentes critérios.

Tabela 1 – Previsões para a força de rotura.

Critério de previsão	Força de rotura [N]			
	MC	DC	ML	DL
Volkersen	6500	6500	9804	9804
Cedência generalizada	7813	7813	31250	31250
Cedência dos substratos	2313	13750	9250	55000

Critério não aplicável.

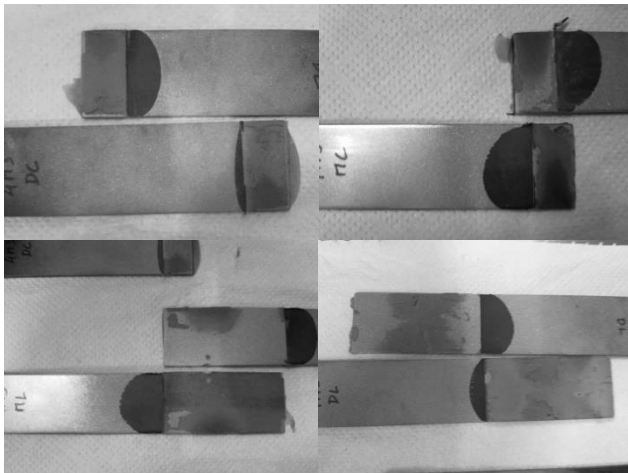


Fig. 15 – Provetes após ensaios.

2 – Resultados

Com os dados recolhidos traçou-se o gráfico fig. 14, representado para cada provete.

Para execução deste gráfico foram eliminados os dados relativos ao ajuste e posicionamento dos mordentes sendo apenas contabilizados a partir do início do carregamento.

Adicionalmente, fotografou-se os provetes para verificar o tipo de rotura (adesiva / coesiva).

3 – Análise dos resultados

MC – É perceptível a não linearidade que corresponde à deformação plástica do aço macio. O adesivo tem resistência suficiente para aguentar a integridade da junta mesmo à tensão de cedência do aço. A força de rotura é de 7180N. A deformação plástica do aço macio acabou por promover a rotura prematura do adesivo ainda que coesiva (fig. 15), i.e., a rotura deu-se no adesivo, e não na interface - o que denunciaria uma má colagem. Aliás, em todos os casos a rotura foi coesiva, como se pode verificar pela existência de adesivo colado em ambas as faces de cada provete. Note-se também que a rotura ainda que coesiva pode não ser evidente a olho nu já que basta que um filme de um átomo de espessura fique agarrado ao substrato para que a rotura seja coesiva no adesivo.

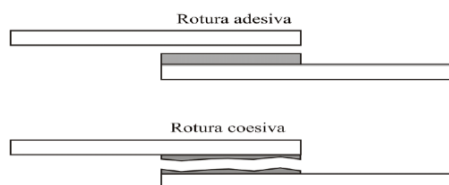


Fig. 16 – Esquema explicativo dos tipos de rotura possíveis.^[1]

ML – Aumentando o comprimento de sobreposição para o quádruplo, não se verifica o aumento em proporção da tensão de rotura já que esta se ficou por 11899N.

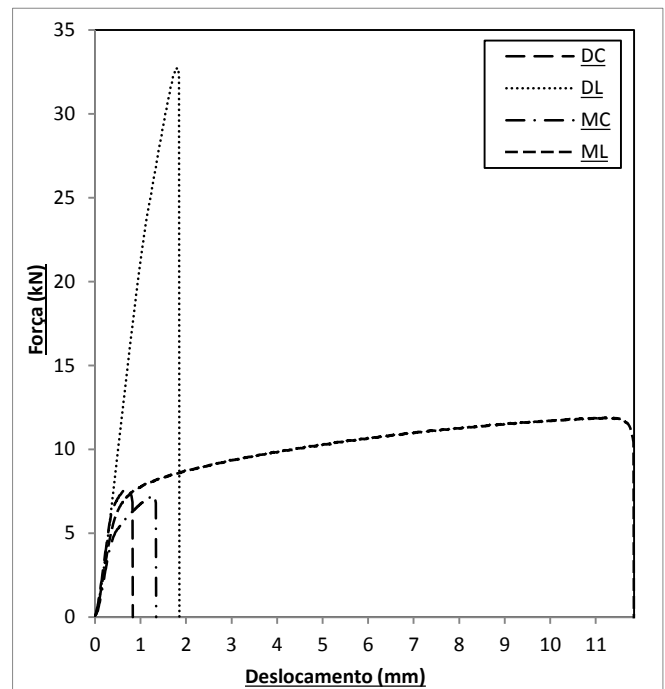


Fig. 14 – Curvas força-deslocamento dos ensaios de tração.

Para haver um aumento proporcional de resistência, esta teria que ter aumentado 4 vezes, $\left(\frac{50}{12.5}\right)$. A resistência da junta não foi, portanto, proporcional ao aumento do comprimento de sobreposição.

A curva segue o trajeto do MC mas atingida a tensão de cedência do aço há um ligeiro aumento da resistência porque o aço encrua, isto é, aumenta a sua resistência com a deformação plástica através de um mecanismo de endurecimento. A zona de deformação plástica é muito prolongada e ultrapassa os 11mm. Neste caso, quem controla a resistência é o aço e não a junta. Por observação verificou-se que a rotura foi coesiva.

DC – O aço não deformou plasticamente, o gráfico é praticamente linear até à rotura aos 7610N. A deformação plástica do adesivo ocorre mas não é detetável na curva porque o adesivo é muito pequeno. Note-se, no entanto, que a curva apresenta uma não linearidade na zona que precede a rotura. Ainda que pequena quando comparada com a dos aços macios, sendo este um aço duro, este comportamento não era esperado e poderá ser devido à deformação plástica do adesivo ou escorregamento entre as garras da máquina de ensaios e o provete.

DL – A rotura é coesiva e não há deformação plástica. Neste caso o aumento do comprimento resulta num aumento da tensão de rotura de 33000N que equivale aproximadamente a quatro vezes o valor da tensão de rotura para o DC. Quanto maior a área correspondente ao adesivo mais resistente foi a junta, mas isto porque o adesivo é dúctil e assim toda a área esta a trabalhar i.e., há deformação plástica do adesivo em toda a área de sobreposição.

Caso o adesivo fosse frágil, a situação seria semelhante à do DC já que o ponto crítico seria na extremidade da sobreposição e ter um comprimento de sobreposição maior não aumentaria a resistência.

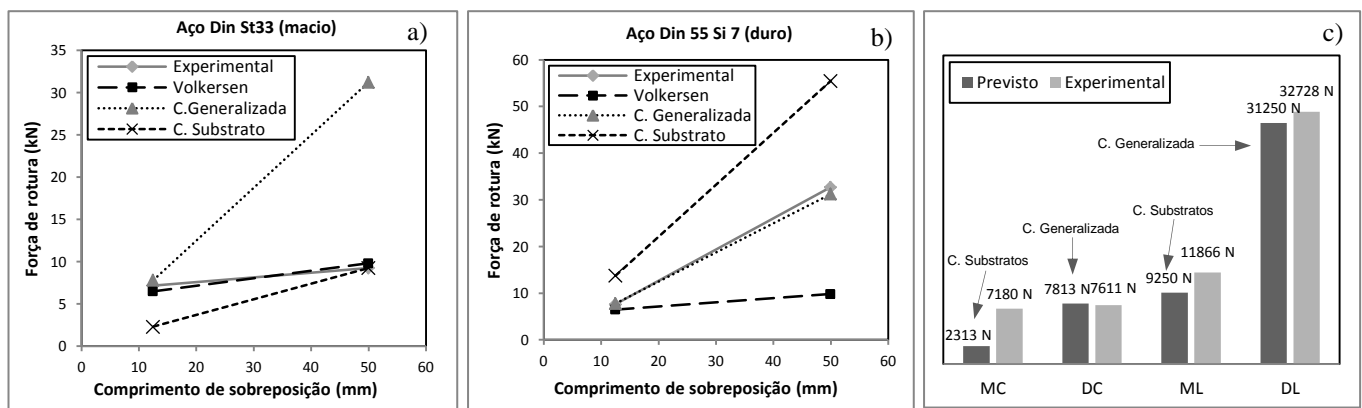


Fig. 17 – Forças de rotura experimentais previstas pelos diferentes critérios.

Curiosamente para o caso do aço macio a aproximação por Volkersen ainda que não válida pelas razões enunciadas, parece mais coerente com os resultados experimentais do que a aproximação pelo critério da cedência no substrato.

Por cada mm extra de sobreposição, consegue-se aumentar 125N para o aço macio e 670N para o aço duro de força de rotura. O aumento proporcional de força de rotura foi 1.7 e 4.3 vezes. A razão de aumento de comprimento de sobreposição para força de rotura é respetivamente 0.425 e 1.075. Significa isto que, para o aumento de 4 vezes o comprimento de sobreposição se verificou um aumento da força de rotura de $4 \cdot 1.075 = 4.3$ vezes para o aço duro e $4 \cdot 0.475 = 1.7$ vezes para o aço macio.

Na realidade os valores poderão ter algum afastamento aos calculados acima visto que, como já foi referido antes, apenas foram feitos dois ensaios para cada substrato, o que se traduz numa grande incerteza dos resultados.

5 – Comparação dos valores da força de rotura prevista e obtida experimentalmente com o comprimento de sobreposição

A influência do comprimento de sobreposição na resistência da junta, bem como a influência do tipo de substrato é posta em evidência na figura 17. Na mesma figura pode-se ainda verificar, a concordância ou não entre as diferentes previsões e os resultados experimentais.

Como a amostra, para cada aço, foi de apenas dois pontos – dois comprimentos de sobreposição, qualquer conclusão é mais educativa do que científica. No entanto, conseguiu-se, dentro de uma pequena margem de erro, obter valores razoáveis.

Aplicabilidade dos critérios usados

Aço macio

Há, para este caso, alguns pontos a referir:

- 1) A boa aplicabilidade do critério de cedência dos substratos, sendo os valores previstos sempre abaixo dos experimentais, sendo por isso uma previsão pelo lado da segurança;
- 2) Para o comprimento de sobreposição de 12.5mm, o critério da cedência dos substratos previu uma força de rotura 3.1 vezes inferior à obtida experimentalmente;

- 3) A aparente qualidade da previsão pelo critério de Volkersen é apenas coincidência visto ser um critério aplicável apenas a adesivos frágeis;
- 4) O critério da cedência generalizada ao não contabilizar a deformação plástica do substrato deu uma força de rotura muito superior.

Aço duro

- 1) Boa aplicabilidade do critério da cedência generalizada;
- 2) Não aplicabilidade de nenhum dos outros critérios.

Efeito do comprimento de sobreposição

Aço macio

Verifica-se um aumento da resistência da junta proporcional ($k = 0.425$) ao aumento do comprimento de sobreposição.

Aço duro

Verifica-se um aumento da resistência da junta aproximadamente directamente proporcional ($k = 1.025$) ao aumento do comprimento de sobreposição.

6 – Conclusões

Estudou-se o efeito da variação do comprimento de sobreposição de um adesivo dúctil em juntas de simples sobreposição com substratos de diferentes rigidezes pela análise de ensaios de tração. Pôde-se verificar:

- 1) A melhor aptidão do critério de cedência generalizada em prever a força de rotura para uma junta em que o substrato é rígido com adesivo dúctil;
- 2) A melhor aptidão do critério de cedência do substrato para prever a força de rotura para uma junta em que o substrato e adesivo são dúcteis;
- 3) A praticamente proporcionalidade direta, $k=1$, entre a força de rotura e o comprimento de sobreposição no caso de uma junta com substrato duro e adesivo dúctil, e uma proporcionalidade $k<1$, no caso de uma junta com substrato macio para o mesmo adesivo dúctil.

7 – Bibliografia:

[1] Silva, L.F.M.da, (2013). Disciplina de Processos de Fabrico II – Bloco de Adesivos [Apresentações Powerpoint].