

Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi

Ricardo João Camilo Carbas

Relatório do Projecto Final do MIEM

Orientador: Prof. Lucas F. M. da Silva

Co-Orientador: Eng.º Miguel A. V. de Figueiredo



Universidade do Porto

Faculdade de Engenharia

FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho de 2008

Resumo

A junta de sobreposição simples é o tipo de junta adesiva mais estudada na literatura. No entanto, a previsão da força de rotura dessas juntas ainda é uma questão controversa, uma vez que envolve uma série de factores que são difíceis de quantificar, tais como o comprimento de sobreposição, a tensão de cedência do aderente, a plasticidade do adesivo e a espessura. O caso mais complicado é quando o adesivo é frágil e comprimentos de sobreposição elevados são usados. Em qualquer caso, há ainda um problema que é mais difícil de ter em conta, a durabilidade. Há uma falta de dados experimentais e critérios quando a junta é submetida a temperatura e/ou humidade. Este trabalho teve como objectivo a utilização do método Taguchi para diminuir o número de testes experimentais a realizar e quantificar as diversas variáveis que afectam a força de rotura das juntas a longo prazo, especialmente o efeito da preparação superficial.

Abstract

The single lap joint is the most studied type of adhesive joint in the literature. However, the joint strength prediction of such joints is still a controversial issue as it involves a lot of factors that are difficult to quantify such as the overlap length, the yielding of the adherend, the plasticity of the adhesive and the bondline thickness. The most complicated case is that where the adhesive is brittle and the overlap long. In any case, there is still a problem that is even more difficult to take into account which is the durability. There is a lack of experimental data and design criteria when the joint is subjected to temperature and/or humidity. The objective of this work is to use the Taguchi method to decrease the number of experimental tests to carry out and quantify the various variables affecting the strength of single lap joints in long term, especially the effect of the surface preparation.

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar ao Professor Lucas da Silva a disponibilidade permanente, o saber científico e a maneira como me soube orientar em todas as fases do trabalho.

Agradeço ao Director do Laboratório de Ensaios Tecnológicos (LET) da FEUP, Eng.º Miguel Figueiredo, a ajuda a nível experimental e estatístico que sempre me disponibilizou. Também ao LET desejo agradecer toda a disponibilidade e flexibilidade que me foi concedida na realização experimental, nomeadamente ao Eng.º Rui Silva pela ajuda no sistema de aquisição de dados e ao Sr. Francisco Moreira pela ajuda prestada na montagem da instalação experimental.

Agradeço à D. Emília a ajuda disponibilizada no tratamento visual da rotura das juntas.

Agradeço ao Eng.º Filipe Chaves a ajuda e orientação que sempre me disponibilizou na etapa de fabricação das juntas.

Agradeço à Eng.ª Mariana Banea e ao Eng.º Eduardo Marques pela disponibilidade prestada.

Por fim à minha família pelo apoio que sempre me disponibilizaram.

Conteúdo

1	INTRODUÇÃO	1
2	JUNTAS ADESIVAS ESTRUTURAIS	3
	2.1 COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO	5
	2.2 TIPOS DE ADESIVOS	6
	2.3 CEDÊNCIA DO SUBSTRATO.....	8
	2.4 ESPESSURA DO ADESIVO.....	9
	2.5 ESPESSURA DO SUBSTRATO	11
	2.6 TRATAMENTO SUPERFICIAL	11
	2.7 DURABILIDADE	13
	2.8 VELOCIDADE DO ENSAIO.....	14
	2.9 FABRICAÇÃO	14
3	MÉTODO DE TAGUCHI	16
	3.1 PERSPECTIVA HISTÓRICA.....	16
	3.2 O MÉTODO	17
	3.3 PROJECTO DE UM PLANO EXPERIMENTAL DE TAGUCHI	18
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	20
	4.1 FABRICAÇÃO	22
	4.2 SEGURANÇA INDIVIDUAL	24
	4.3 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DOS SUBSTRATOS.....	27
	4.4 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO ADESIVO	27
	4.5 GEOMETRIA DA JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES.....	38
	4.6 TRATAMENTO SUPERFICIAL	39
	4.6.1 <i>Tratamento mecânico (P)</i>	39
	4.6.2 <i>Revestimento por conversão química (A1)</i>	39
	4.6.3 <i>Revestimento por Conversão Química (A2)</i>	40

Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi

4.7 DURABILIDADE	40
4.8 ENSAIO DE TRACÇÃO DAS JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES	41
5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	44
6 ANÁLISE ESTATÍSTICA	52
6.1 ANÁLISE DE VARIÂNCIA	52
6.2 REGRESSÃO LINEAR.....	60
6.3 VALIDAÇÃO.....	62
7 CONCLUSÃO	64
BIBLIOGRAFIA.....	65
APÊNDICE I – GRÁFICOS OBTIDOS NO ENSAIO DCB.....	67
APÊNDICE II – GRÁFICOS OBTIDOS NO ENSAIO DE TRACÇÃO DAS JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES.....	70

Lista de Figuras

FIGURA 1 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM JUNTAS REBITADAS [1]	3
FIGURA 2 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM JUNTAS COLADAS [1]	3
FIGURA 3 – FORÇAS DE ARRANCAMENTO E DE CLIVAGEM [1]	4
FIGURA 4 – GARANTIR QUE O ADESIVO TRABALHA AO CORTE [1]	4
FIGURA 5 – RESISTÊNCIA DE UMA JUNTA DE SIMPLES SOBREPOSIÇÃO EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO [1]..	6
FIGURA 6 – EFEITO DO COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO NA FORÇA DE ROTURA, PARA ADESIVOS DÚCTEIS E FRÁGEIS [7].....	7
FIGURA 7 – DIFERENÇA DA DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO AO LONGO DA SOBREPOSIÇÃO PARA UMA JUNTA SOBREPOSIÇÃO SIMPLES. A) ADESIVO FRÁGIL, B) ADESIVO DÚCTIL [8]	7
FIGURA 8 – ENSAIO DE TRACÇÃO NUMA JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES, ANALISANDO O COMPORTAMENTO DE UM ADESIVO EPÓXIDO E UM POLIURETANO [9]	8
FIGURA 9 – DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO DE CORTE NO ADESIVO NUMA JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES [1]	9
FIGURA 10 – DEFORMAÇÃO PLÁSTICA DOS SUBSTRATOS [1]	9
FIGURA 11 – DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES DE CORTE [1]	10
FIGURA 12 – CURVAS FORÇA-DESLOCAMENTO DE JUNTAS DE SIMPLES SOBREPOSIÇÃO, PARA DIFERENTES ESPESSURAS DO ADESIVO [1, 13]	10
FIGURA 13 – REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DO FACTOR DE MOMENTO FLECTOR [7].....	11
FIGURA 14 – REPRESENTAÇÃO DE DEFEITOS POSSÍVEIS EM SUPERFÍCIES COM ELEVADA RUGOSIDADE [4].....	12
FIGURA 15 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS DIFERENTES MODOS DE ROTURA EM JUNTAS COLADAS DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES [1]	12
FIGURA 16 – TENSÃO DE ROTURA VERSUS TEMPO DE ENVELHECIMENTO, PARA SUBSTRATOS EM AÇO MACIO E ADESIVO EPÓXIDO [12]	13
FIGURA 17 – INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO ENSAIO NAS CURVAS DE TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE UM ADESIVO DÚCTIL [13]	14
FIGURA 18 – APLICAÇÃO DE ADESIVOS EM PASTA [1]	15
FIGURA 19 – CONTACTO POR TRANSLAÇÃO E POR BASCULAMENTO [1]	15
FIGURA 20 – MOLDE PARA A FABRICAÇÃO DAS JUNTAS ADESIVAS	22
FIGURA 21 – CONSTITUINTES PRINCIPAIS DO MOLDE	22
FIGURA 22 – PRENSA HIDRÁULICA INTOCO [®]	23
FIGURA 23 – BATA	25
FIGURA 24 – LUVAS DE LÁTEX.....	25
FIGURA 25 – LUVAS TÉRMICAS.....	26
FIGURA 26 – ÓCULOS DE PROTECÇÃO	26
FIGURA 27 – MÁSCARA.....	26

Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi

FIGURA 28 – ADESIVO ARALDITE [®] AV 138M COM ENDURECEDOR HV 998	28
FIGURA 29 – OBJECTOS USADOS PARA PROCEDER À MISTURA DO ADESIVO	29
FIGURA 30 – ADESIVO ARALDITE [®] 2015.....	29
FIGURA 31 – PISTOLA PARA APLICAÇÃO DO ADESIVO ALRALDITE [®] 2015.....	30
FIGURA 32 – DIFERENTES TAXAS DE DEPOSIÇÃO DE ARALDITE [®] 2015, A) MENOR TAXA DE DEPOSIÇÃO E B) MAIOR TAXA DE DEPOSIÇÃO	30
FIGURA 33 – ADESIVO SIKAFLEX-255 FX E RESPECTIVA PISTOLA DE APLICAÇÃO	31
FIGURA 34 – DIFERENTES TAXAS DE DEPOSIÇÃO DE SIKAFLEX-255 FX, A) MENOR TAXA DE DEPOSIÇÃO E B) MAIOR TAXA DE DEPOSIÇÃO	31
FIGURA 35 – PRIMÁRIO SIKA [®] PRIMER-206 G+P	31
FIGURA 36 – MODOS DE ROTURA [1]	32
FIGURA 37 – GEOMETRIA DO ENSAIO DCB (DIMENSÕES EM MM)	33
FIGURA 38 – FITAS NORMALIZADAS DE 0,2 E 0,5 MM	33
FIGURA 39 – LOCALIZAÇÃO DA COLOCAÇÃO DAS FITAS NORMALIZADAS.....	33
FIGURA 40 – EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO DIRECTA DO COMPRIMENTO DA FENDA	35
FIGURA 41 – EQUIPAMENTO USADO NO ENSAIO DCB	36
FIGURA 42 – PORMENOR DA SOLICITAÇÃO APLICADA	36
FIGURA 43 – GEOMETRIA DA JUNTA DE SIMPLES SOBREPOSIÇÃO (DIMENSÕES EM MM).....	38
FIGURA 44 – REGULAÇÃO DE ESPESSURA DE ADESIVO ATRAVÉS DE CALÇO EQUALIZADOR	38
FIGURA 45 – LIXAGEM DOS SUBSTRATOS	39
FIGURA 47 – SOLICITAÇÃO EXTERNA APLICADA.....	41
FIGURA 46 – ESTUFA WEISS TECHNIK	41
FIGURA 48 – FURO PARA APLICAÇÃO DO PINO-GUIA (EM MM)	42
FIGURA 49 – PREPARAÇÃO DAS JUNTAS PARA O ENSAIO.....	43
FIGURA 50 – SISTEMA DE FIXAÇÃO JUNTA/MÁQUINA	43
FIGURA 51 – CURVAS FORÇA/DEFORMAÇÃO PARA OS ENSAIOS Nº 4 E 7 (VER TABELA 6).....	46
FIGURA 52 – PONTOS EXPERIMENTAIS CORRESPONDENTES AO AÇO MACIO E TRÊS CURVAS CORRESPONDENTES À $T_s = 1, 2$ E 3 MM USANDO AS EQUAÇÕES 9 E 10 (DEFORMAÇÃO PLÁSTICA DO SUBSTRATO)	47
FIGURA 53 – PONTOS EXPERIMENTAIS CORRESPONDENTES AO AÇO DURO E TRÊS CURVAS CORRESPONDENTES AOS ADESIVOS AV 138M, 2015 E PU, USANDO A EQUAÇÃO 5 (CEDÊNCIA GLOBAL DO ADESIVO)	48
FIGURA 54 – CURVAS DE TRACÇÃO DO ENSAIO Nº 5	48
FIGURA 55 – COMPARAÇÃO DA CURVA FORÇA/DESLOCAMENTO ENTRE UM ADESIVO FRÁGIL (ENSAIO Nº 17) E UM DÚCTIL (ENSAIO Nº 18) QUANDO O AÇO ESTÁ NO DOMÍNIO ELÁSTICO	49
FIGURA 56 – ROTURA ADESIVA A) ENSAIO Nº 3 E B) ENSAIO Nº 5.....	49
FIGURA 57 – ROTURA MISTA, ENSAIO Nº 7.....	50
FIGURA 58 – ROTURA COESIVA NA INTERFACE, ENSAIO Nº 8	50
FIGURA 59 – ROTURA ADESIVA A) ENSAIO Nº 10 E B) ENSAIO Nº 16.....	51

Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi

FIGURA 60 – GRÁFICO DA RESPOSTA MÉDIA COM INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95% PARA O EFEITO DA TENSÃO DE CEDÊNCIA DO SUBSTRATO	53
FIGURA 61 – GRÁFICO DA RESPOSTA MÉDIA COM INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95% PARA O EFEITO DO COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO	54
FIGURA 62 – GRÁFICO DA RESPOSTA MÉDIA COM INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95% PARA O EFEITO DA INTERACÇÃO DA TENSÃO DE CEDÊNCIA DO SUBSTRATO * COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO.....	55
FIGURA 63 – GRÁFICO DA RESPOSTA MÉDIA COM INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95% PARA O EFEITO DA INTERACÇÃO DA TENSÃO DE CEDÊNCIA DO SUBSTRATO * COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO [3]	55
FIGURA 64 – GRÁFICO DA RESPOSTA MÉDIA COM INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95% PARA O EFEITO DA ESPESSURA DO SUBSTRATO.....	56
FIGURA 65 – GRÁFICO DA RESPOSTA MÉDIA COM INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95% PARA O EFEITO DA ESPESSURA DO ADESIVO.....	57
FIGURA 66 – GRÁFICO DA RESPOSTA MÉDIA COM INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95% PARA O EFEITO DA TAXA CRÍTICA DE LIBERTAÇÃO DE ENERGIA.....	58
FIGURA 67 – GRÁFICO DA RESPOSTA MÉDIA COM INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95% PARA O TRATAMENTO SUPERFICIAL ...	58
FIGURA 68 – GRÁFICO DA RESPOSTA MÉDIA COM INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95% PARA O ENVELHECIMENTO.....	59
FIGURA 69 – GRÁFICO DA RESPOSTA MÉDIA COM INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95% PARA A VELOCIDADE DO ENSAIO	60
FIGURA 70 – GRÁFICO FORÇA/DESLOCAMENTO DA ARALDITE [®] AV138	67
FIGURA 71 – GRÁFICO FORÇA/DESLOCAMENTO DA ARALDITE [®] 2015	68
FIGURA 72 – GRÁFICO FORÇA/DESLOCAMENTO DO SIKAFLEX-255 FX.....	69

Lista de Tabelas

TABELA 1 – CALENDARIZAÇÃO DO PROJECTO AO LONGO DO SEMESTRE	2
TABELA 2 – MATRIZ ORTOGONAL DE TAGUCHI	21
TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DOS AÇOS [2]	27
TABELA 4 – CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DOS ADESIVOS [2]	28
TABELA 5 – VALORES DAS TAXAS DE LIBERTAÇÃO DE ENERGIA PARA OS DIFERENTES ADESIVOS.....	37
TABELA 6 – TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA DOS ADESIVOS ESTUDADOS.....	42
TABELA 7 – PLANO EXPERIMENTAL BASEADO NA MATRIZ ORTOGONAL DE TAGUCHI (L ₁₈).....	44
TABELA 8 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA).....	52
TABELA 9 – VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DA PREVISÃO DA FORÇA DE ROTURA ESTATÍSTICA	63

1 Introdução

Neste projecto serão estudadas juntas adesivas de sobreposição simples. Estas juntas são as mais estudadas na literatura, existindo vários critérios simples de dimensionamento. No entanto, o projecto dessas juntas continua a ser controverso porque a resistência depende de muitos factores difíceis de quantificar, como o comprimento de sobreposição, a cedência do substrato, a plasticidade do adesivo e a espessura do adesivo. Além destes factores existe ainda o factor ambiental a que a junta está sujeita, a temperatura e a humidade relativa. O problema mais difícil de resolver é a questão da durabilidade, pois existe uma falta de resultados experimentais para a resistência da junta a longo prazo. Com o tempo, a interface adesivo/substrato é atacada pelo meio ambiente e provoca uma rotura prematura da junta. No entanto, existem métodos de preparação da superfície químicos que permitem uma boa resistência da interface a longo prazo contra os agentes atmosféricos. Para avaliar a influência de vários tipos de preparação da superfície do substrato sobre a resistência da junta a longo prazo e também os diferentes factores referidos anteriormente, será necessário a um número de ensaios impraticável. De modo a reduzir o número de ensaios experimentais, foi usado o método de Taguchi. A redução do número de ensaios experimentais origina uma redução óbvia do tempo e dos custos de fabricação.

Este projecto está dividido nas seguintes etapas:

- Numa primeira etapa procedeu-se à recolha bibliográfica sobre juntas adesivas estruturais, juntas de sobreposição simples, critérios simples de dimensionamento e preparação superficial dos substratos;
- Posteriormente procedeu-se à selecção do material e fabricação das juntas. Foi determinado um plano reduzido de testes, de acordo com o método de Taguchi que tem em conta as seguintes variáveis: material e espessura do substrato, tipo e espessura do adesivo, comprimento de sobreposição, tratamento superficial, durabilidade e velocidade de ensaio.
- Na etapa seguinte realizou-se os ensaios experimentais, medindo experimentalmente as forças de rotura das juntas adesivas. Fez-se uma previsão da força

de rotura das juntas adesivas usando critérios simples de dimensionamento existentes na literatura;

- A última etapa foi a análise estatística dos resultados experimentais. Determinou-se uma regressão linear que permite obter a força de rotura das juntas em função dos parâmetros estudados.

Para melhor avaliar a distribuição temporal do projecto ao longo do semestre, apresenta-se na Tabela 1 um plano organizacional das diferentes etapas do projecto.

Tabela 1 – Calendarização do projecto ao longo do semestre

Calendarização do projecto "Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi"

Tarefa	Ano: 2008	mês																											
		Fevereiro				Março				Abril				Maio				Junho				Julho							
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV				
1	Recolha bibliográfica																								
2	Seleção do material e fabricação das juntas																						
3	Ensaio experimentais									.	.	.	.	.	.	.	.				
4	Análise estatística dos resultados experimentais													.	.	.	.	.	.	.	.
5	Elaboração do relatório																								

2 Juntas adesivas Estruturais

Ao longo dos anos, desde o século XX até ao presente século XXI, pode-se verificar que existe uma progressiva utilização de ligações com adesivos. Os adesivos vêm progressivamente substituindo os sistemas de fixação mecânica convencionais, tais como: parafusos, brasagem, rebitagem, soldagem e outras ligações mecânicas.

Actualmente é cada vez mais utilizada a ligação por adesivos estruturais, substituindo ou usada em conjunto com os sistemas de fixação mecânica convencionais, com inúmeras vantagens em relação a estas. Algumas das características dos adesivos estruturais são [1]:

- Reduzida concentração de tensões, transferência de carga suave em largas áreas de colagem;

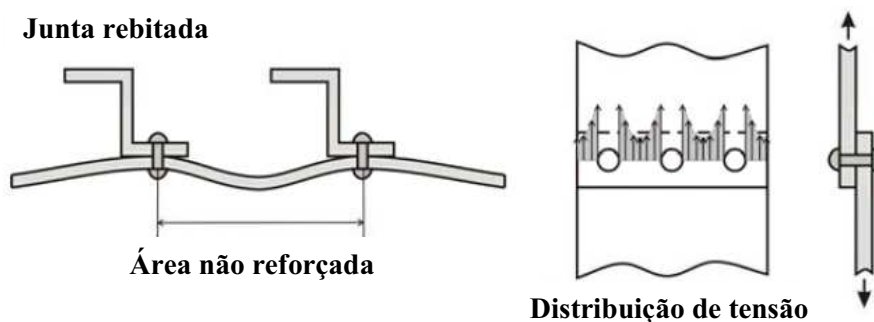


Figura 1 – Distribuição de tensões em juntas rebitadas [1]

- Aumento da rigidez das estruturas;

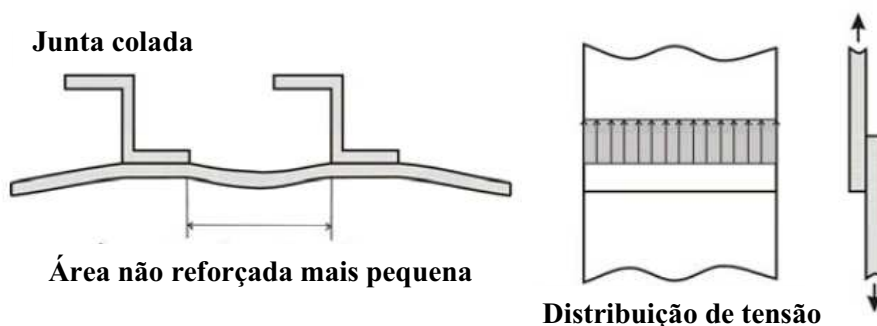


Figura 2 – Distribuição de tensões em juntas coladas [1]

- Resistência superior à fadiga;
- Excelente relação resistência - peso;
- Custo reduzido devido de processos de fabricação mais baratos;
- Aerodinâmica otimizada dada a variedade de projectos possíveis;
- Melhor aparência visual;
- Excelentes propriedades eléctricas e térmicas;
- Permite a fixação de vários tipos de materiais;
- Resistência à corrosão no caso de juntas de substratos incompatíveis.

Embora os adesivos apresentam um grande número de vantagens, é necessário ter atenção algumas limitações que este tipo de material apresenta, nomeadamente [1]:

- Projectar ligações que eliminem as forças de arrancamento e clivagem;

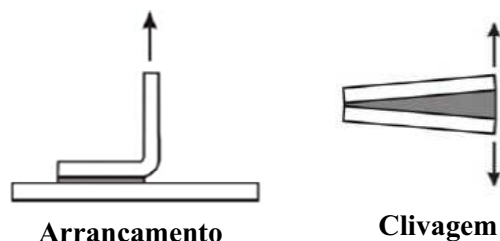


Figura 3 – Forças de arrancamento e de clivagem [1]

- Evitar as tensões localizadas e garantir que o adesivo trabalhe ao corte;

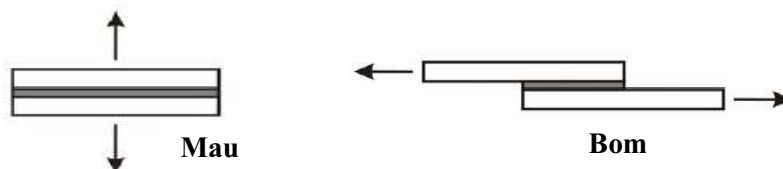


Figura 4 – Garantir que o adesivo trabalha ao corte [1]

- Necessidade de uma cuidada preparação superficial;
- Difícil fazer o controlo de qualidade e segurança nas juntas adesivas;
- Reduzida resistência à temperatura e humidade.

A susceptibilidade da maior parte dos adesivos à degradação por um ou mais factores ambientais é das principais limitações da aplicação dos adesivos em ligações. A temperatura, a humidade e a radiação solar são alguns parâmetros com influência na durabilidade das juntas adesivas.

As juntas adesivas são cada vez mais utilizadas nas aplicações industriais, daí a necessidade de uma análise mais detalhada das estruturas. Esta análise passa por uma escolha mais adequada da geometria das juntas, dos adesivos e do fabrico das juntas adesivas. Mas estas escolhas têm como base as condições ambientais, as solicitações e a aplicação a que a junta será sujeita.

Este estudo paramétrico consiste na análise de diferentes factores e sua influência na resistência de uma junta adesiva de sobreposição simples.

Os factores a analisar são: a cedência do substrato e sua espessura, o tipo e espessura do adesivo, o comprimento de sobreposição, o tratamento superficial, a durabilidade e a velocidade do ensaio de tracção.

2.1 Comprimento de sobreposição

Nas juntas de sobreposição simples, os bordos da junta são as zonas que apresentam uma maior concentração de tensões. A tensão média é mais baixa do que a tensão nos bordos da junta, e essa distribuição não uniforme das tensões ao longo da camada adesiva faz com que a rotura ocorra normalmente para cargas de valor inferior aos valores que o adesivo consegue suportar [5].

O comprimento de sobreposição é um parâmetro importante. A resistência da junta aumenta significativamente para valores pequenos da razão entre o comprimento de sobreposição (l) e a espessura do substrato (t). Mas a partir de determinados valores de l/t , o ganho de resistência é marginal e o peso do conjunto aumenta desnecessariamente. Para os adesivos frágeis e substratos de aço duro verifica-se que a partir de um determinado comprimento de sobreposição, o aumento deste não se repercute na resistência da junta, onde a resistência da junta será ditada pelas características do adesivo. No caso de substratos que se deformam plasticamente a resistência da junta é ditada pelas características do substrato (domínio plástico) e o aumento do comprimento de sobreposição não se repercute na resistência da junta. (ver Figura 5) [1]. O comprimento de sobreposição, cedência do substrato e tipo de adesivo devem ser tratados em conjunto.

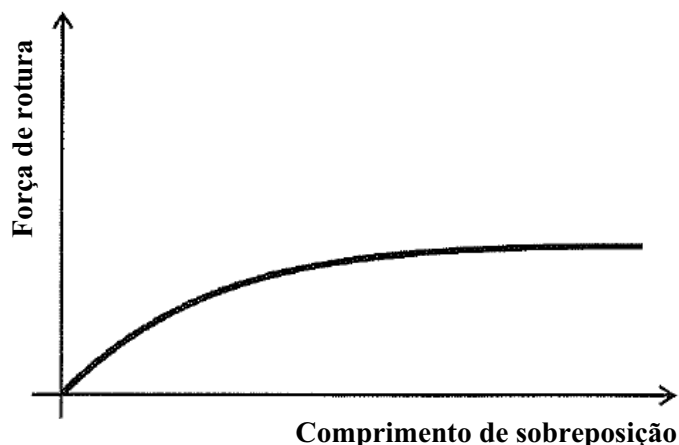


Figura 5 – Resistência de uma junta de simples sobreposição em função do comprimento de sobreposição [1]

2.2 Tipos de adesivos

Os adesivos epóxicos apresentam uma resistência mecânica muito superior que os poliuretanos. Os epóxicos curam através de reacções químicas e precisam de um agente de cura ou catalisador. Os adesivos poliuretanos (PU) curam por reacção química com a humidade. Este último tipo de adesivos quando usado em substratos não porosos, como por exemplo o aço, o centro da junta precisa de mais tempo para curar. Os adesivos de um componente têm algumas vantagens comparativamente com os de dois componentes, pois existe uma menor probabilidade de existir impurezas no adesivo devido à mistura e uma menor probabilidade de aprisionamento de ar no seio do adesivo.

Na Figura 6 pode verificar-se a diferença da força de rotura para os adesivos dúcteis e frágeis, em função do comprimento de sobreposição. O valor da força de rotura vai aumentando, sendo inicialmente superior para adesivos frágeis, mas para comprimentos de sobreposição elevados, verifica-se que os adesivos dúcteis apresentam uma força de rotura muito superior à dos adesivos frágeis.

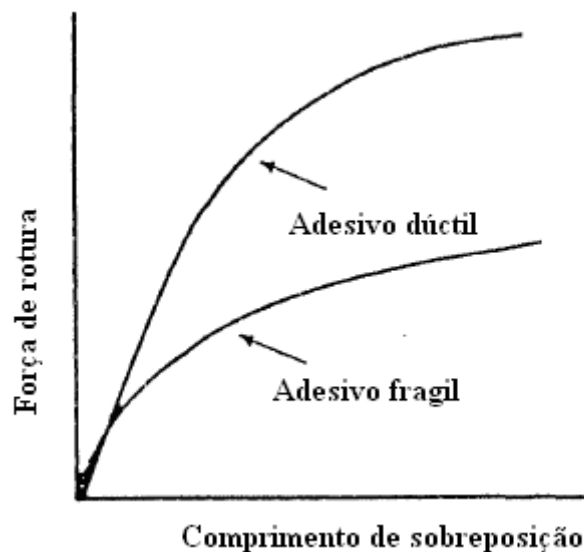


Figura 6 – Efeito do comprimento de sobreposição na força de rotura, para adesivos dúcteis e frágeis [7]

Pode verificar-se na Figura 7 para uma junta de sobreposição simples a diferença da distribuição das tensões de corte na junta para um adesivo frágil e para um adesivo dúctil. É evidente a tensão elevada nas extremidades da junta para o adesivo frágil e uma maior uniformidade da tensão ao longo da junta para o adesivo dúctil. O adesivo dúctil consegue aproveitar todo o comprimento de sobreposição, contrariamente ao frágil, o que explica que a força de rotura aumenta praticamente linearmente com o comprimento de sobreposição no caso dos adesivos dúcteis.

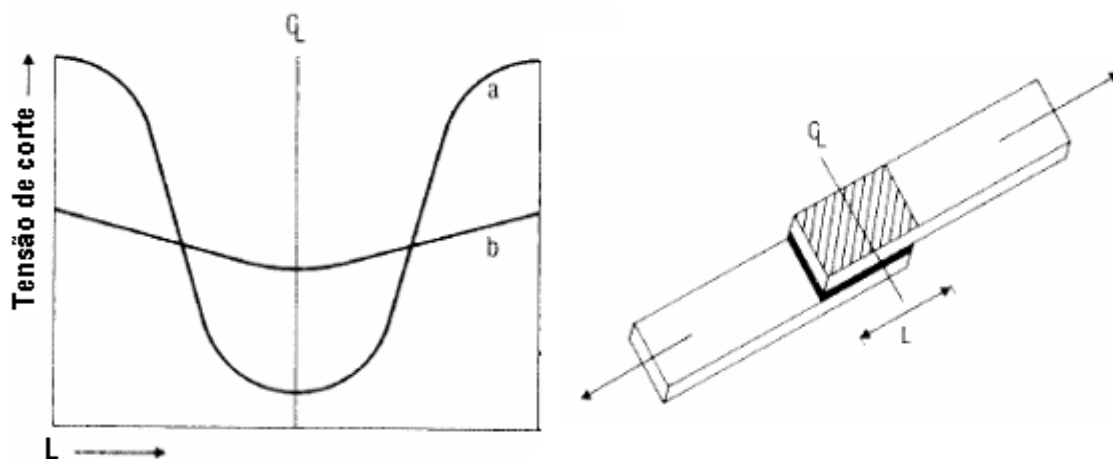


Figura 7 – Diferença da distribuição da tensão ao longo da sobreposição para uma junta sobreposição simples. a) Adesivo frágil, b) Adesivo dúctil [8]

Na Figura 8 vêm representados as curvas força-deslocamento de ensaios de tracção de juntas de sobreposição simples para um adesivo epóxico e um poliuretano. Pode-se verificar que as juntas coladas com o adesivo epóxico suportam forças mais elevadas, mas uma reduzida deformação e a junta colada com o adesivo poliuretano suporta forças moderadas e elevadas deformações. Neste ensaio foi considerada espessura de adesivo óptima para o adesivo epóxico e para o poliuretano, sendo o adesivo dúctil aquele que apresenta uma maior espessura.

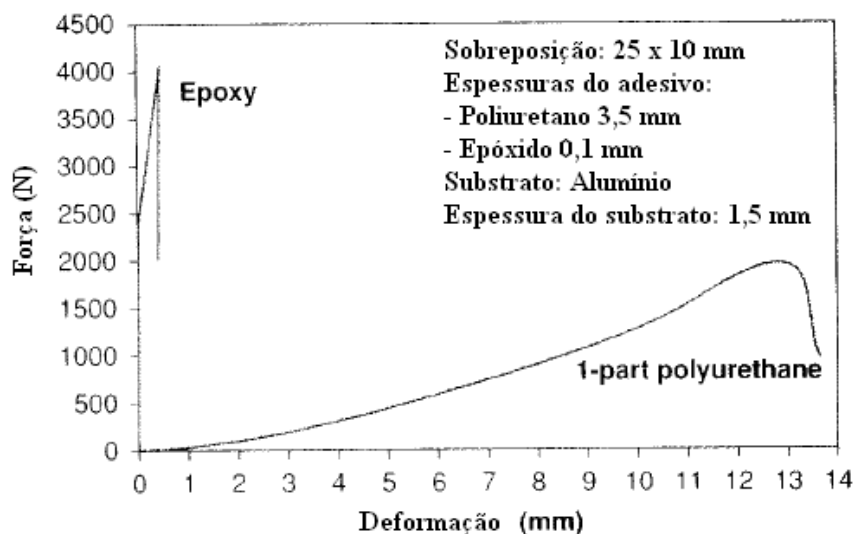


Figura 8 – Ensaio de tracção numa junta de sobreposição simples, analisando o comportamento de um adesivo epóxico e um poliuretano [9]

2.3 Cedência do substrato

A influência do material do substrato é um aspecto que contribui para o sucesso da junta colada. Para os aços de baixa resistência mecânica (aço macio) a resistência da junta é independente do adesivo e para os aços de alta resistência mecânica (aço duro) a resistência da junta aumenta à medida que se usa adesivos mais resistentes e mais dúcteis [2-3].

Quando uma junta de sobreposição simples é sujeita a um ensaio de tracção, verifica-se uma concentração de tensões nas extremidades da junta, como se pode ver na Figura 9.

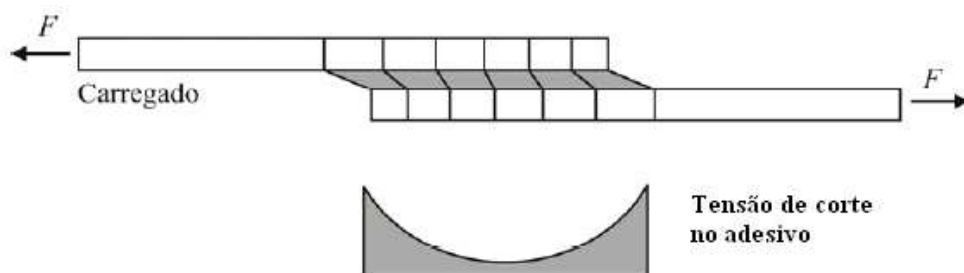


Figura 9 – Distribuição da tensão de corte no adesivo numa junta de sobreposição simples [1]

Para substratos de aço macio, a deformação plástica do substrato irá originar uma rotura prematura do adesivo que tem uma deformação limitada em relação à do aço (ver Figura 10). O aço duro não deforma plasticamente, podendo nesse caso o adesivo trabalhar ao longo de todo o comprimento de sobreposição, sobretudo se for dúctil. A rotura é nesse caso controlada pelo adesivo.

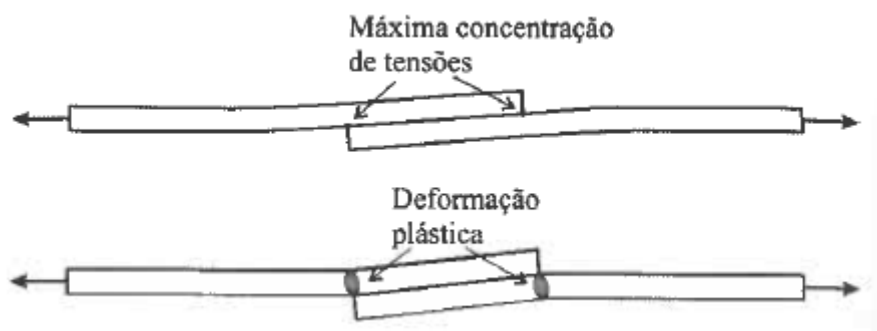


Figura 10 – Deformação plástica dos substratos [1]

2.4 Espessura do adesivo

A espessura da camada de adesivo é um factor importante quando se trata de adesivos estruturais. Deve-se garantir uma espessura óptima para o adesivo, para se poder obter o melhor desempenho da junta. As espessuras mais usadas e recomendadas pelos fabricantes são entre 0,1 e 0,2 mm. Verifica-se experimentalmente que a resistência de uma junta diminui com o aumento da espessura do adesivo a partir de 0,1 – 0,2 mm. Para espessuras inferiores a 0,1 mm, existe uma queda abrupta da resistência da junta, possivelmente devido ao facto de existir o risco de falhas de colagem [1].

A diminuição da resistência da junta com o aumento da espessura pode ser explicada por várias partes:

1. Para elevadas espessuras de adesivo ocorre o risco de introduzir defeitos na junta, tais como bolhas de ar, micro fendas;
2. Nas extremidades da junta o momento flector aumenta (depende da espessura do adesivo e do substrato), traduzindo-se numa diminuição da resistência da junta [6];
3. A plastificação no caso dos adesivos dúcteis ocorre para cargas superiores em juntas de elevada espessura, mas propaga-se mais rapidamente até à rotura, logo originará uma menor resistência da junta.

A Figura 11 mostra que a plastificação generalizada ocorre mais facilmente numa junta com maior espessura de adesivo [1].

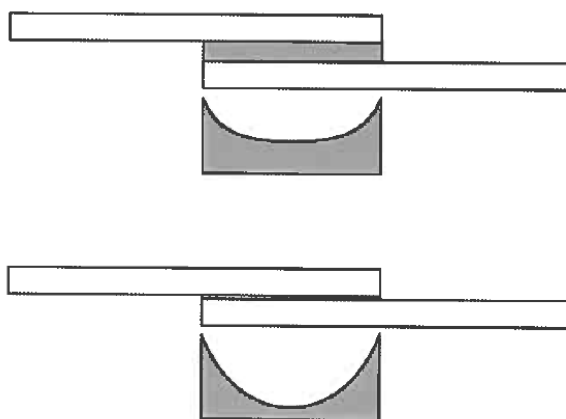


Figura 11 – Distribuição das tensões de corte [1]

Pode ver-se na Figura 12 a diminuição da resistência das juntas com o aumento da espessura de adesivo epóxico de alta resistência.

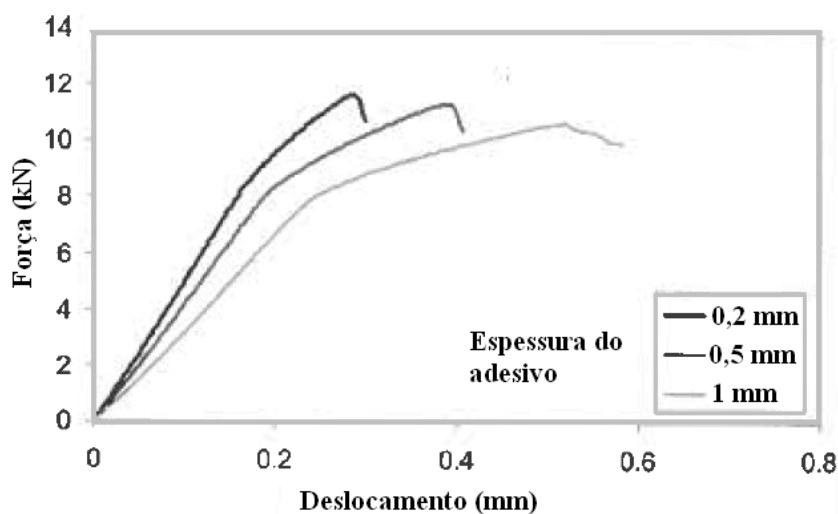


Figura 12 – Curvas força-deslocamento de juntas de simples sobreposição, para diferentes espessuras do adesivo [1, 13]

2.5 Espessura do substrato

A variação da espessura dos substratos é um aspecto a ter em atenção, uma vez que a sua má selecção pode diminuir a resistência a junta. Para as juntas de sobreposição simples, devido à sua geometria, verifica-se um momento flector e esse momento depende da espessura do adesivo e do substrato (ver Figura 13). Quando essas espessuras aumentam, o momento flector também aumenta, traduzindo-se numa diminuição da resistência da junta para espessuras elevadas. Mas para os substratos de aço macio é benéfico aumentar a espessura para este se tornar mais resistente e menos susceptível à deformação plástica.



Figura 13 – Representação geométrica do factor de momento flector [7]

2.6 Tratamento superficial

Os tratamentos superficiais destinam-se a formar superfícies resistentes e fáceis de molhar. A resistência de uma junta adesiva aumenta significativamente quando partículas soltas tais como produtos de corrosão, pintura pouco aderente e outros contaminantes são removidos da superfície.

A rugosidade é um parâmetro com influência na resistência das juntas coladas, porque leva a um aumento da área de contacto entre os dois substratos e aumenta as ligações de interface. Os substratos devem apresentar na zona de sobreposição uma rugosidade intermédia (de forma a que não ocorra o aparecimento do “aprisionamento” de ar na interface da junta). Para substratos com uma baixa rugosidade, o adesivo adere facilmente, mas quando sujeito a uma carga pode aparecer mais rapidamente o fenómeno de rotura adesiva devido a um baixo ancoramento do adesivo. Por outro lado, uma elevada rugosidade pode apresentar um aumento de concentração de tensões e conseqüente diminuição da resistência da junta porque o adesivo não penetra totalmente nas cavidades. A Figura 14 permite observar o fenómeno de não penetração do adesivo nas cavidades do substrato.

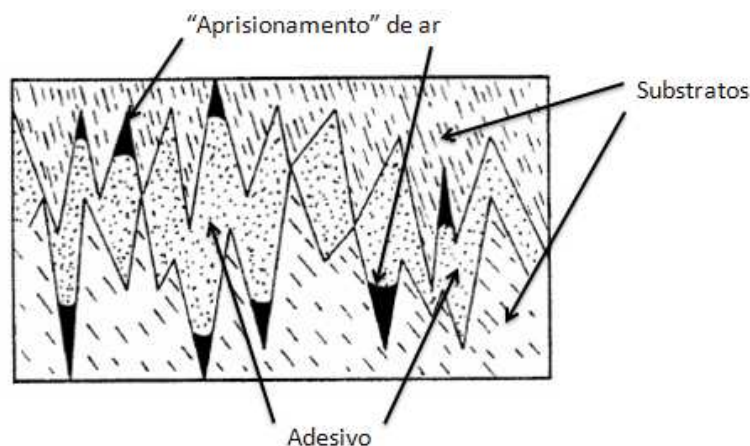


Figura 14 – Representação de defeitos possíveis em superfícies com elevada rugosidade [4]

A máxima resistência da junta é obtida com uma rugosidade intermédia, pois são as condições ideais para que não ocorra rotura adesiva (falta de adesão entre o adesivo e substrato) e não existe uma elevada concentração de tensões.

Os tratamentos mecânicos mais usados são a grenalhagem e a lixagem. Relativamente à grenalhagem a pressão deve ser adaptada à dureza do aço, porque é necessário ter em conta as deformações geradas pelas tensões de compressão, especialmente em chapas finas.

O tratamento química aplicado aos aços substituiu a camada de óxido por uma camada sintética diferente. Este tipo de tratamento químico confere aos substratos diversas vantagens, tais como boa uniformidade e aumento da durabilidade particularmente em ambientes adversos [2].

Na Figura 15 pode-se observar a diferença entre rotura adesiva e coesiva, onde o objectivo com o tratamento superficial será obter uma rotura coesiva.

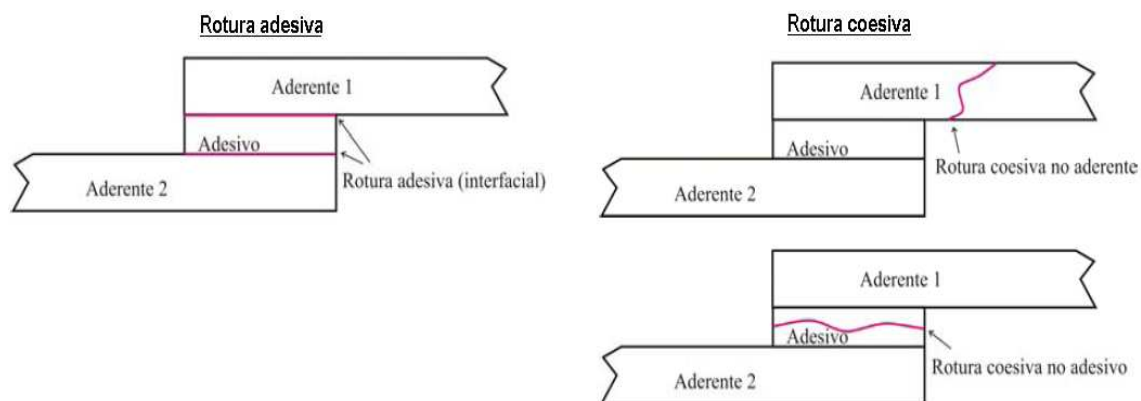


Figura 15 – Representação esquemática dos diferentes modos de rotura em juntas coladas de sobreposição simples [1]

2.7 Durabilidade

A durabilidade é o grande problema das juntas adesivas. O processo de degradação da junta adesiva é acelerado se estiver num ambiente húmido e a temperaturas moderadamente elevadas. Temperaturas elevadas aceleram o mecanismo de difusão da água junto à camada limite superficial (na interface adesivo-substrato), degradando as propriedades de adesão na interface. A difusão da humidade causa alterações dimensionais, cria tensões que provocam fissuração, baixa a temperatura de transição vítrea e pode em certos casos, levar à hidrólise do próprio adesivo [1].

A estabilidade térmica do adesivo no seu interior e a estabilidade térmica do adesivo na camada limite são partes que devem ser consideradas quando as temperaturas são elevadas [11].

Na Figura 16 pode-se observar a tensão de rotura de juntas de aço macio e coladas com um epóxico, sujeita a um envelhecimento a diferentes temperaturas. Pode-se verificar a crescente diminuição da tensão de rotura com o aumento da temperatura e da humidade relativa de 100%, comparativamente com as condições normais (20 °C, 55% humidade relativa).

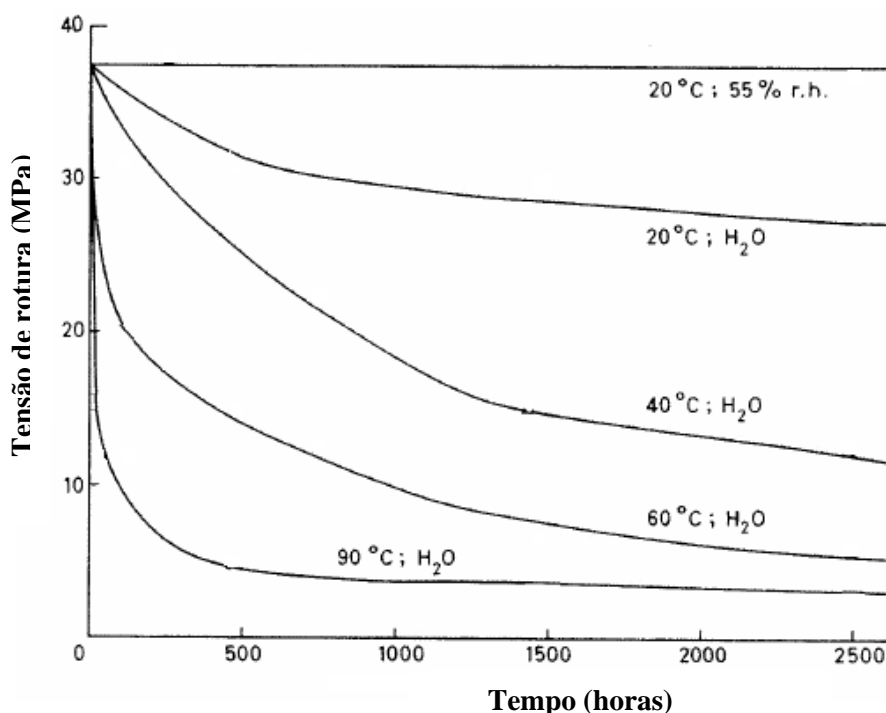


Figura 16 – Tensão de rotura versus tempo de envelhecimento, para substratos em aço macio e adesivo epóxico [12]

2.8 Velocidade do ensaio

Quando se procede a um ensaio de tracção, este pode ser realizado a diferentes velocidades. Essa velocidade influencia o valor da resistência e da ductilidade do adesivo. Pode verificar-se esse facto na Figura 17 que apresenta curvas de tensão-deformação para velocidades rápida e lenta de um adesivo dúctil [13].

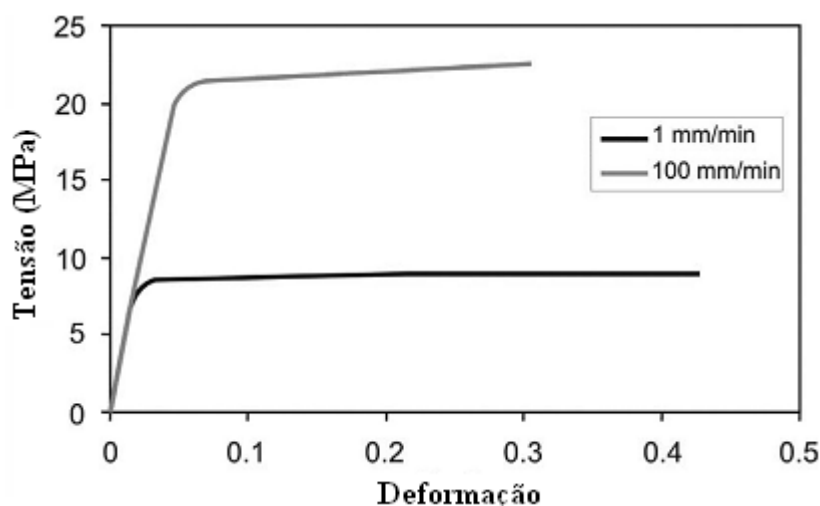


Figura 17 – Influência da velocidade do ensaio nas curvas de tensão-deformação de um adesivo dúctil [13]

Quanto mais próxima for a temperatura do ensaio da temperatura de transição vítrea (T_g) do adesivo, mais viscoelástico é o seu comportamento. Os adesivos estruturais são normalmente usados em estruturas rígidas e precisam de apresentar um módulo tão elevado quanto possível. Por isso devem ser usados a temperaturas abaixo das suas temperaturas de transição vítrea. Para o caso de adesivos dúcteis, nomeadamente borrachas, estes são usados a temperaturas muito acima da T_g , verificando-se também que o efeito da variação da velocidade não tem muita influência sempre que a temperatura usada seja distante da T_g .

2.9 Fabricação

Na fabricação de uma junta colada um aspecto importante, a ter em conta no caso de adesivos em pasta e *mastics*, é a aplicação do adesivo na superfície de colagem, que deve ser de forma a permitir um escoamento uniforme em toda a extensão da sobreposição ou preferencialmente numa única direcção para evitar o aparecimento de

defeitos. Na Figura 18 pode-se ver exemplos de aplicação de adesivos em pasta, de forma a diminuir a porosidade.

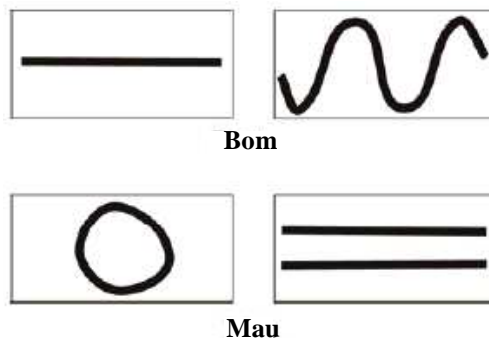


Figura 18 – Aplicação de adesivos em pasta [1]

Relativamente ao estabelecimento do contacto entre ambos os substratos, podem-se referenciar dois tipos, o contacto por translação e o contacto por basculamento. Na Figura 19 pode-se observar os dois tipos de contacto. O contacto por basculamento deve ser sempre usado que possível, pois é aquele onde mais facilmente se evita a formação de vazios ou porosidade no interior da camada colada.

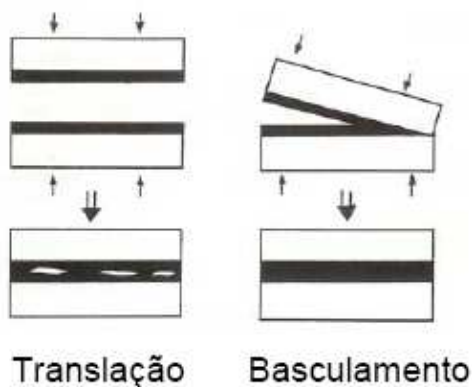


Figura 19 – Contacto por translação e por basculamento [1]

3 Método de Taguchi

Um método de planeamento de experiências é um teste ou uma série de testes em que são realizadas alterações deliberadas nas variáveis de entrada de um processo ou de um sistema de modo a que se possa observar e identificar as razões para as alterações nas variáveis de saída ou respostas [14].

O método de Taguchi é um método onde se procede a um plano de experiências onde é somente executada uma fracção do número total de combinações das variáveis de entrada. Taguchi propôs a utilização de matrizes compostas por colunas ortogonais [15].

O método de Taguchi pode ser entendido como uma nova abordagem de planeamento, voltado para o projecto do produto e do processo.

3.1 *Perspectiva histórica*

Desde 1940 que foram introduzidos diversos conceitos estatísticos que têm sido úteis à engenharia no campo da melhoria da qualidade. Taguchi criou um método conhecido mundialmente como Método Taguchi. Este método proporcionou-lhe em 1960 a atribuição do prémio Deming e é frequentemente referenciado na área da qualidade [16]. Taguchi desenvolveu matrizes ortogonais que podem ser usadas no planeamento de experiências. A maior contribuição do método que criou reside não só na formulação matemática dos planos de experiências, mas principalmente na filosofia de qualidade que acompanha o método. A sua abordagem é mais do que um método de planeamento de experiências, é um conceito que produz uma melhoria de qualidade completamente diferente das práticas tradicionais. O método foi classificado pelo próprio Taguchi de *off-line quality control*, pois a sua aplicação é realizada recorrendo a uma pequena amostra proveniente de uma fase experimental que tem níveis de qualidade com uma variância elevada, quando comparada com as peças obtidas já em linha de produção *on-line quality control*. A qualidade ideal seria, no limite, obtida fazendo com que todas as combinações possíveis de variação do processo fossem

testadas e analisadas. No entanto, iria implicar longos tempos de preparação com custos insuportáveis e combinações pouco relevantes para a análise a efectuar.

3.2 O método

O objectivo do método é minimizar a variabilidade do produto, identificando os meios de lhe conferir robustez durante o processo de fabrico, perante as fontes de variação a que ele é submetido. O método de Taguchi é também denominado por projecto robusto. A forma de se atingir robustez é através de experimentação. Se a experimentação não for conduzida de forma eficiente, pode reflectir-se em elevados custos, longo tempo de desenvolvimento e análise. O método de Taguchi, permite:

- **Reduzir as fontes de “ruído”** – ruído ou factores de perturbação são os factores que causam a variabilidade do produto. Tais ruídos podem ser enquadrados em três tipos:

1. Ruído externo: são factores ambientais em que o produto é utilizado, como por exemplo, humidade do ar, poeira, temperatura ambiente;

2. Ruído interno: são alterações que ocorrem quando um produto se começa a deteriorar durante o armazenamento, por fricção ou por desgaste das peças;

3. Ruído unidade a unidade: são diferenças entre produtos individuais devido a imperfeições no processo de fabrico, como por exemplo variações no *setup* da máquina, erro de medição, etc.

- **Reduzir custos** – custo menor devido a se proceder a um menor número de experiências, relativamente aos métodos tradicionais;

- **Reduzir o tempo de desenvolvimento do produto** – menor número de experiências e conseqüente menor tempo de desenvolvimento do produto;

- **Atingir robustez** – experiências que apresentem ‘peso’ significativo no desenvolvimento do produto.

O princípio fundamental é que para assegurar uma qualidade consistente, deve-se procurar projectar produtos que sejam insensíveis a defeitos provenientes de flutuações no processo de produção e no ambiente de uso do produto, ou seja, o produto e o

processo de produção devem ser projectados de modo que o seu desempenho seja o menos sensível a todos os tipos de ruídos [16].

3.3 Projecto de um plano experimental de Taguchi

Para a selecção e definição de um plano experimental de Taguchi deve-se considerar as seguintes etapas [15-17]:

Etapa 1: Identificação dos factores do sistema

Nesta etapa realiza-se a identificação dos factores e deve-se envolver a colaboração de todo o pessoal envolvido no projecto, de preferência em sessões do tipo *brainstorming*. Para cada um dos factores são previstas as possíveis influências e interacções com os demais.

Etapa 2: Escolha dos níveis dos factores a experimentar

Deve reflectir as limitações de recursos e considerações de ordem funcional ou de engenharia. Em relação ao número de níveis a utilizar, a decisão deverá ser nas etapas iniciais de experimentação, a utilização de muitos factores e poucos níveis para minimizar a dimensão inicial do plano de experiências, mas não se deve descurar a eventual necessidade de nova utilização do método.

Etapa 3: Selecção da matriz ortogonal de Taguchi adequada

Escolher-se-á uma matriz ortogonal de Taguchi compatível com o número de factores e respectivos níveis. A matriz escolhida deverá ter um número de graus de liberdade maior ou igual ao total de graus de liberdade exigidos pelos factores e/ou interacções seleccionadas. Deve-se atender às limitações que se imponham sob o ponto de vista da exequibilidade.

Etapa 4: Atribuição de factores e/ou interacções às colunas da matriz ortogonal

A atribuição dos factores e/ou interacções às colunas da matriz ortogonal é feita através das tabelas triangulares e gráficos lineares da respectiva matriz ortogonal de Taguchi.

Etapa 5: Realização dos ensaios

Na execução dos ensaios, cada ensaio corresponde a uma linha da matriz ortogonal. Os ensaios devem ser realizados de uma forma aleatória, atenuando deste

modo factores não controlados que poderão sofrer variação durante a execução dos ensaios e ter influência sobre os resultados obtidos.

Etapa 6: Análise de dados

A análise dos dados é feita recorrendo à análise de variância (ANOVA – *Analysis of variance*) para analisar os dados obtidos na execução do plano de experiências. Permite analisar a dispersão total presente num conjunto de dados, identificando as suas origens e avaliando a contribuição de cada variável para a dispersão total.

Etapa 7: Realização de ensaios de confirmação

As condições apuradas como óptimas na fase anterior devem verificar a regressão linear, obtida com os resultados obtidos anteriormente. Realizar uma nova experiência, sob as condições apuradas como óptimas na fase anterior. Se os resultados forem considerados satisfatórios e não surgir a hipótese que uma nova análise possa obter resultados substancialmente melhorados a partir de um novo estudo, implementar-se-á a solução apurada, no processo de fabrico. No caso de novo estudo, o método deve ser melhorado de acordo com as pistas reveladas pelo estudo anterior.

4 Programa experimental

A matriz ortogonal de Taguchi utilizada para este estudo foi uma matriz de 8 factores ou variáveis, a resistência do substrato, o comprimento de sobreposição, a espessura do substrato, a espessura do adesivo, o tipo de adesivo, o tratamento superficial, a durabilidade e a velocidade do ensaio.

A matriz ortogonal de Taguchi seleccionada foi a $L_{18} (2^1 \times 3^7)$ (ver Tabela 2). A matriz contém 18 linhas correspondentes ao número de testes, uma coluna com 2 níveis (a resistência do substrato) e 7 colunas com 3 níveis. Se fossem testadas todas as combinações possíveis, o número de testes seria de 4374, o que é inviável em termos de tempo e de custos. Na primeira coluna foi atribuída a tensão de cedência do material (σ_{ys}), na segunda o comprimento de sobreposição (l), na terceira a espessura do substrato (t_s), na quarta a espessura do adesivo (t_a), na quinta a taxa crítica de libertação de energia do adesivo (G_{Ic}), na sexta o tratamento superficial (S_T), na sétima a durabilidade (A) e na oitava a velocidade do ensaio (V_e).

A influência de cada variável foi avaliada pela resposta média e pela análise de variância (ANOVA). O software estatístico usado foi o SuperANOVA[®].

Na Tabela 2 pode-se observar a matriz de Taguchi preenchida com os níveis considerados para cada coluna.

Tabela 2 – Matriz ortogonal de Taguchi

Ensaio nº.	σ_{ys} [MPa]	l [mm]	t_s [mm]	t_a [mm]	G_{lc} [N/m]	S_T [-]	A [sem.]	V_e [mm/min.]
1	184	12,5	1	0,5	2902	P	0	1
2	184	12,5	2	1	526	A1	1	10
3	184	12,5	3	2	346	A2	4	100
4	184	25	1	0,5	526	A1	4	100
5	184	25	2	1	346	A2	0	1
6	184	25	3	2	2902	P	1	10
7	184	50	1	1	2902	A2	1	100
8	184	50	2	2	526	P	4	1
9	184	50	3	0,5	346	A1	0	10
10	1260	12,5	1	2	346	A1	1	1
11	1260	12,5	2	0,5	2902	A2	4	10
12	1260	12,5	3	1	526	P	0	100
13	1260	25	1	1	346	P	4	10
14	1260	25	2	2	2902	A1	0	100
15	1260	25	3	0,5	526	A2	1	1
16	1260	50	1	2	526	A2	0	10
17	1260	50	2	0,5	346	P	1	100
18	1260	50	3	1	2902	A1	4	1

 σ_{ys} - Tensão de cedência do substrato l - Comprimento de sobreposição t_s - Espessura do substrato t_a - Espessura do adesivo G_{lc} - Taxa crítica de libertação de energia do adesivo S_T - Tratamento superficial A - Envelhecimento V_e - Velocidade do ensaio

4.1 Fabricação

As juntas adesivas foram fabricadas recorrendo a um molde que pode ser visto na Figura 20.



Figura 20 – Molde para a fabricação das juntas adesivas

Na Figura 21 pode-se ver o interior do molde e seus constituintes, que permite a fabricação de 6 juntas em simultâneo. Apresenta pinos de alinhamento, para o alinhamento dos substratos, e blocos posicionadores que permitem controlar o comprimento de sobreposição nas juntas de sobreposição simples.

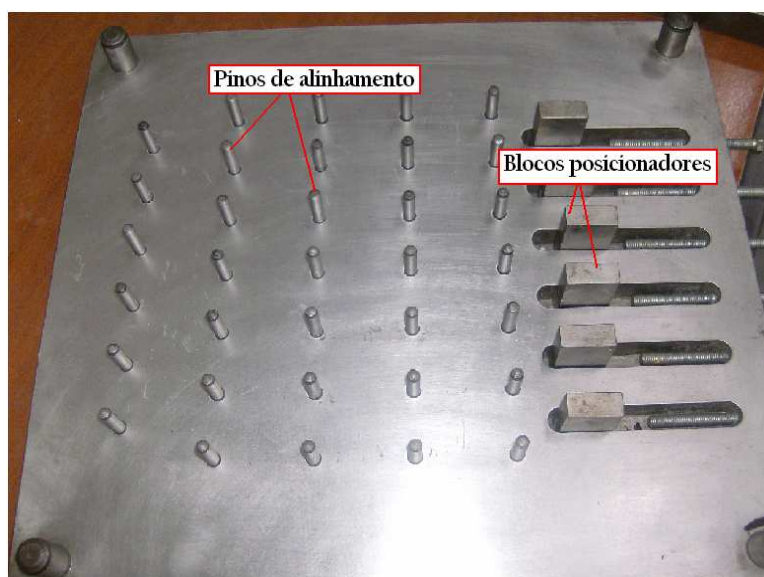


Figura 21 – Constituintes principais do molde

Um outro equipamento essencial para a fabricação das juntas adesivas é a prensa hidráulica INTOCO®. Na Figura 22 pode-se observar os diferentes componentes da prensa. O botão on/off liga ou desliga a prensa, nos controladores de temperatura insere-

se a temperatura desejada para as placas (superior e inferior), a válvula de controlo de pressão ajusta o valor da pressão de fecho da prensa e no controlador de movimento procede-se ao fecho ou abertura da prensa e verifica-se o valor da pressão de fecho da prensa, sob a forma digital.



Figura 22 – Prensa hidráulica INTOCO®

Antes de se ter efectuado a fabricação da junta, procedeu-se previamente ao tratamento de limpeza e aplicação de desmoldante ao molde. Seguidamente será ilustrada a sequência do tratamento do molde.

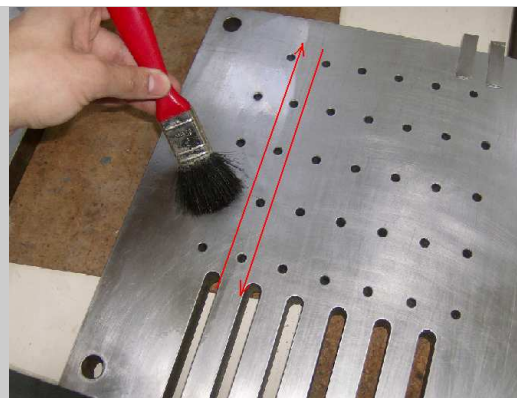
1º Procedeu-se à limpeza das partes do molde, de possíveis resíduos de adesivos existente. Esse procedimento é feito recorrendo ao auxílio de uma espátula que não deve ser muito dura para não danificar a superfície do molde.



2º Colocou-se o molde na prensa, para que o molde fique a uma temperatura de aproximadamente 40°C.



3º Aplicação do desmoldante com o auxílio de um pincel, através de 3 passagens. Em cada passagem tentou-se garantir uma aplicação homogénea por toda a superfície interior das partes do molde.



O desmoldante foi aplicado nas superfícies do molde que estiveram em contacto com a junta adesiva a fabricar e teve por objectivo facilitar a desmoldação da junta. A aplicação do desmoldante garante a não adesão do adesivo ao molde, caso contacte com o molde. O desmoldante usado foi o Frekote® 770-NC sendo da LOCTITE. Um cuidado a ter na aplicação deste químico é que deve ser feito em locais bem ventilados.

4.2 *Segurança individual*

Para garantir a segurança individual no processo de produção, fez-se uso dos seguintes objectos:

Bata – usada para garantir que não há um contacto directo dos químicos usados com o corpo ou a roupa.



Figura 23 – Bata

Luvas de látex – usadas para evitar que os produtos químicos contactem directamente com as mãos, pois o seu contacto directo poderia originar na pele uma dermatite de contacto.



Figura 24 – Luvas de látex

Luvas térmicas – têm como finalidade permitir o manuseamento de objectos quentes.



Figura 25 – Luvas térmicas

Óculos – são usados quando se procede ao arrancamento de apara (no caso do ensaio DCB), para proteger os olhos de possível projecção da apara.



Figura 26 – Óculos de protecção

Máscara – tem como finalidade impedir a inalação de qualquer tipo de químicos ou poeiras.



Figura 27 – Máscara

4.3 Características mecânicas dos substratos

O material usado para os substratos foi aço. Usou-se dois aços de dureza distinta, aço macio e aço duro. Na Tabela 2 pode verificar-se as características mecânicas do material.

Tabela 3 – Características mecânicas dos aços [2]

Material	Aço	Aço
Norma DIN	C75	St33
Módulo de Elasticidade E (GPa)	198	198
Tensão de Cedência σ_y (MPa)	1260	184
Tensão de Ruptura σ_r (MPa)	1413	465
Deformação de Ruptura ϵ_r (%)	20,0	35,0

4.4 Características mecânicas do adesivo

Os adesivos usados na fabricação das juntas, foram de três tipos distintos. Um adesivo frágil, um outro intermédio e um dúctil. A escolha recaiu em adesivos da marca HUNTSMAN e SIKA. Na Tabela 3 pode-se verificar as características mecânicas dos adesivos.

Tabela 4 – Características mecânicas dos adesivos [2]

Adesivo	Araldite® AV138M / HV998	Araldite® 2015	Sikaflex-255 FC
Módulo de corte G (MPa)	1559 ± 11	487 ± 77	1.351 ± 0,04
Tensão de cedência de corte τ_{ya} (MPa)	25,0 ± 0,55	17,9 ± 1,8	8,26 ± 0,30
Tensão de rotura de corte τ_r (MPa)	30,2 ± 0,40	17,9 ± 1,8	8,26 ± 0,30
Deformação de rotura de corte γ_f (%)	5,50 ± 0,44	43,9 ± 3,4	330 ± 27

Adesivo frágil – Araldite® AV 138M com endurecedor HV 998

Trata-se de uma pasta adesiva de epóxico constituída por uma mistura de dois componentes. Este tipo de adesivo apresenta uma boa resistência à temperatura elevada (120°C). Na Figura 28 pode-se observar os dois componentes constituintes do adesivo.

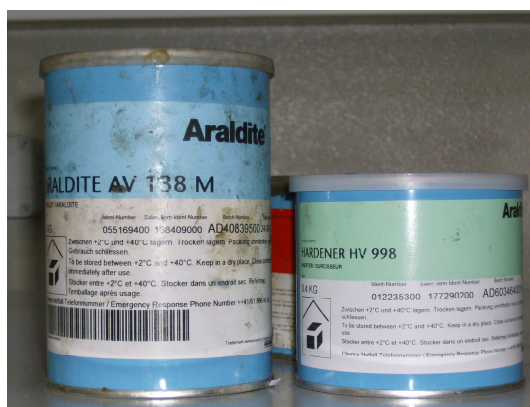


Figura 28 – Adesivo Araldite® AV 138M com endurecedor HV 998

A mistura dos componentes resina/endurecedor faz-se numa razão de 100/40 respectivamente. Para se proceder à mistura fez-se uso de um ‘vidro de relógio’, uma balança digital e uma espátula (Figura 29). O adesivo foi aplicado nos substratos com uma espátula, mas antes de aplicação deve-se garantir a perfeita homogeneidade da resina com o endurecedor.



Figura 29 – Objectos usados para proceder à mistura do adesivo

Adesivo intermédio – Araldite® 2015

Trata-se de uma pasta adesiva epóxido constituída por uma mistura de dois componentes. Este tipo de adesivo apresenta uma boa resistência à clivagem. Na Figura 30 pode-se ver a forma comercialmente disponível do adesivo.



Figura 30 – Adesivo Araldite® 2015

O modo de aplicação é feito através de uma pistola, como se verifica na Figura 31. A mistura dos dois componentes efectua-se ao longo do bico e na extremidade livre (a quando da aplicação) apresenta-se um adesivo homogéneo.



Figura 31 – Pistola para aplicação do adesivo Alraldite® 2015

Nesse mesmo bico o corte ou não na extremidade permite obter uma maior ou menor taxa de deposição. Na Figura 32 verifica-se a diferença entre a maior ou menor taxa de deposição, sendo usada uma maior taxa de deposição quando se pretende colar uma maior área (ver Figura 32b) e é usada uma menor taxa de deposição quando a área a colar é mínima ou pequena (ver Figura 32a).

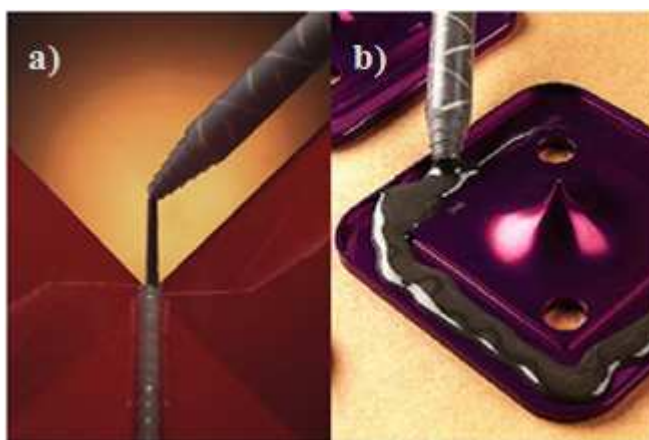


Figura 32 – Diferentes taxas de deposição de Araldite® 2015, a) menor taxa de deposição e b) maior taxa de deposição

Fonte: www.adhesivehelp.com

Adesivo dúctil – Sikaflex-255 FX

Trata-se de uma pasta adesiva de PU (poliuretano), de um componente e apresenta elevadas características elásticas. É um adesivo que cura por acção da humidade, formando um elastómero de grande durabilidade. Pode-se verificar na Figura 33 a forma comercialmente disponível do adesivo e o modo de aplicação (através de uma pistola).



Figura 33 – Adesivo Sikaflex-255 FX e respectiva pistola de aplicação

Para este tipo de adesivo a maior/menor taxa de deposição na superfície a colar é conseguida com o corte ou não do bico. Na Figura 34a) pode-se verificar um cordão de adesivo com uma baixa taxa de deposição e na Figura 34b) um cordão de adesivo com uma maior taxa de deposição.

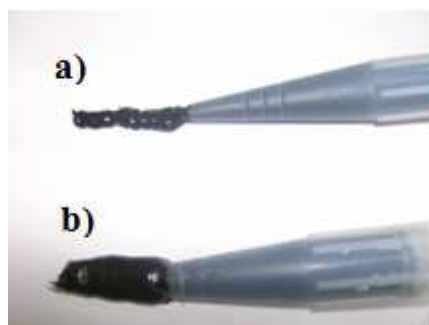


Figura 34 – Diferentes taxas de deposição de Sikaflex-255 FX, a) menor taxa de deposição e b) maior taxa de deposição

Antes de se proceder à aplicação do adesivo no substrato, teve-se previamente de proceder à aplicação de primário na área de aplicação do adesivo, com o auxílio de um pincel. O primário usado foi o Sika® Primer-206 G+P (Figura 35).



Figura 35 – Primário Sika® Primer-206 G+P

A propagação de um defeito interior ocorrerá, quando a energia disponível na extremidade desse defeito (G – Taxa de Libertação de Energia) devido à solicitação aplicada, igualar à energia necessária de Propagação da fenda (G_c – Taxa Crítica de Libertação de Energia) que depende das propriedades do material [1]. As situações de carregamento existentes são modo I, modo II e modo III. Os tipos de carregamento vêm ilustrados na Figura 36.

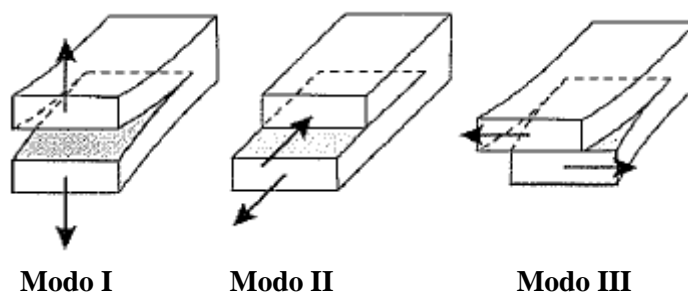


Figura 36 – Modos de rotura [1]

O ensaio mais usado é o *Double Cantilever Beam* (DCB) em que o tipo de carregamento é modo I de acordo com a norma ASTM D3433-99. Na Figura 39 está representada a geometria dos substratos para o ensaio DCB. Neste ensaio mediu-se a Taxa crítica de libertação de energia em modo I (G_{Ic}) da junta colada. O equipamento usado no ensaio foi a máquina servo-hidráulica MTS, modelo 661.23B-01 e capacidade máxima de carregamento ± 250 kN, que se encontra instalada no LET (Laboratório de Ensaio Tecnológicos). Os substratos usados para o teste foram substratos em aço. A fixação dos substratos na máquina MTS foi conseguida através do orifício (localizado na extremidade esquerda da Figura 37) existente no substrato. A velocidade do carregamento foi de 1 mm/min.

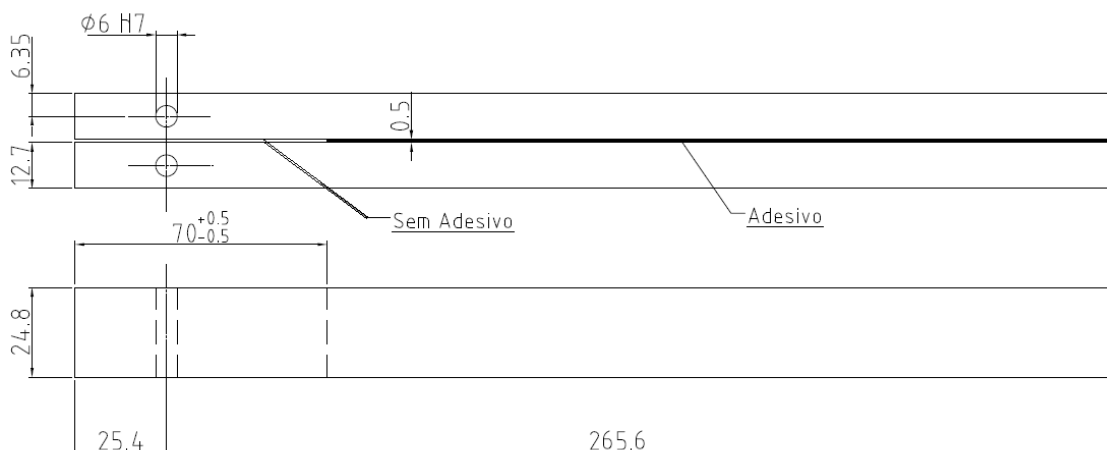


Figura 37 – Geometria do ensaio DCB (dimensões em mm)

Na fabricação dos provetes para o ensaio DCB, recorreu-se à utilização da prensa hidráulica INTOCO® e a espessura de adesivo (0,5 mm) foi conseguida com a utilização de fitas de aço com espessura constante (ver Figura 38).



Figura 38 – Fitas normalizadas de 0,2 e 0,5 mm

Na Figura 39 pode-se observar a localização da colocação das fitas.

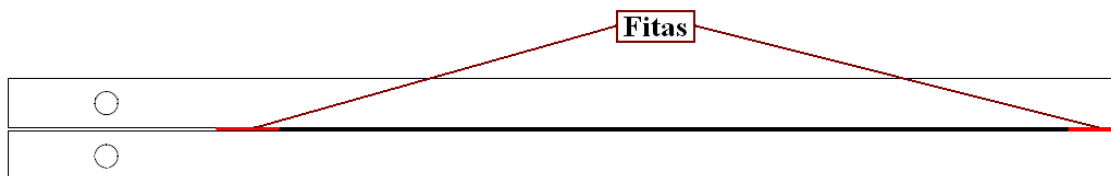
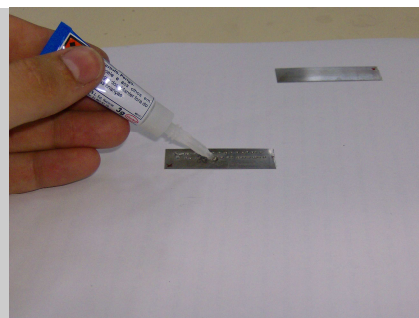


Figura 39 – Localização da colocação das fitas normalizadas

A fita utilizada para a extremidade esquerda apresenta uma ligeira saliência ($\approx 0,1$ mm), de forma a garantir uma pré-fenda ao adesivo, facilitando assim a iniciação da fenda. Será ilustrada seguidamente os passos para a obtenção dessa fita.

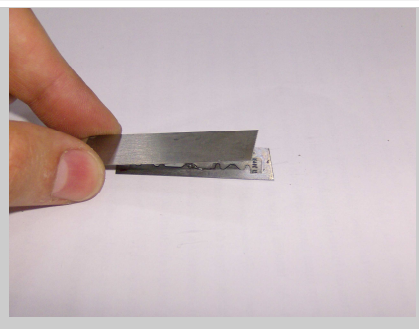
1º Procedeu-se ao corte de duas fitas de 0,2 mm, de comprimento superior a 25 mm. Num lado de uma fita aplicou-se cianoacrilato.



2º Nesse lado aplicou-se uma lâmina de gume afiado, com 0,1 mm de espessura.



3º Aplicou-se cianoacrilato sobre a lâmina e colocou-se a fita de 0,2 mm por cima. Assim garante-se uma espessura de 0,5 mm e uma saliência que garanta a pré-fenda no adesivo.



Para a fabricação dos provetes, o tratamento superficial aplicado aos substratos foi a lixagem. Este tipo de tratamento mecânico será tratado em detalhe na secção 4.6.1. Este mesmo tratamento superficial (P) foi usado para os três adesivos estudados, para garantir que o que variou foi apenas o adesivo e tudo o resto se manteve igual. As condições ambientais na fabricação e no ensaio foram de $22 \pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $54 \pm 4\%$.

A obtenção dos valores experimentais do comprimento da fenda foi conseguida por medição directa, com auxílio de uma lente ampliadora e de um medidor de deslocamento (ver Figura 40). O aparelho de medição de deslocamento apresenta uma precisão da ordem dos 0,01mm.

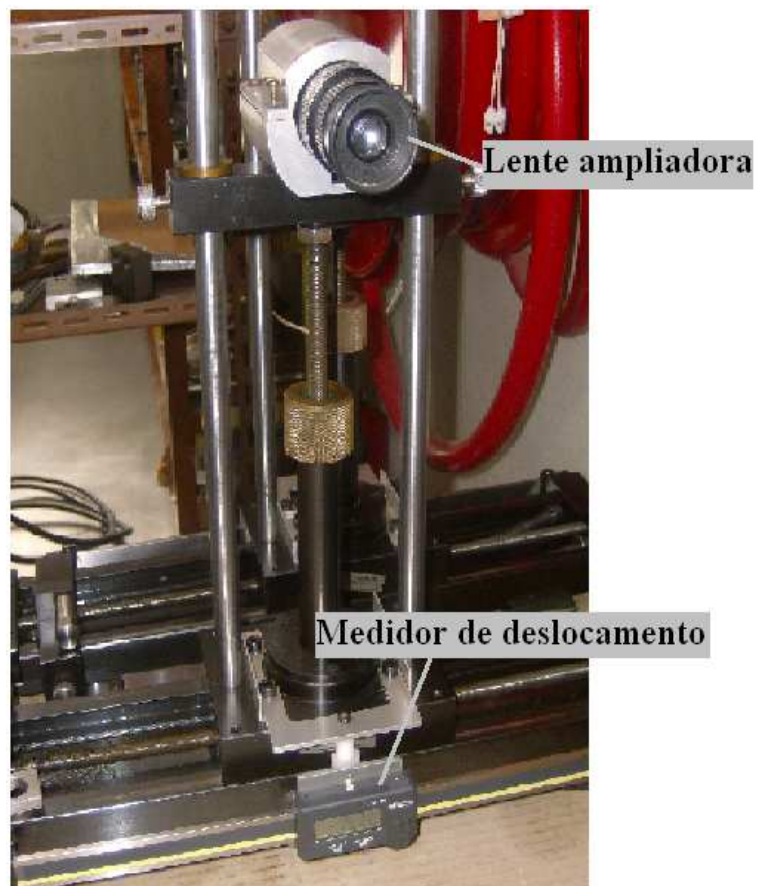


Figura 40 – Equipamento de medição directa do comprimento da fenda

Pode-se observar na Figura 41 o equipamento usado no ensaio DCB. Na Figura 42 pode-se observar um provete DCB a ser solicitado.

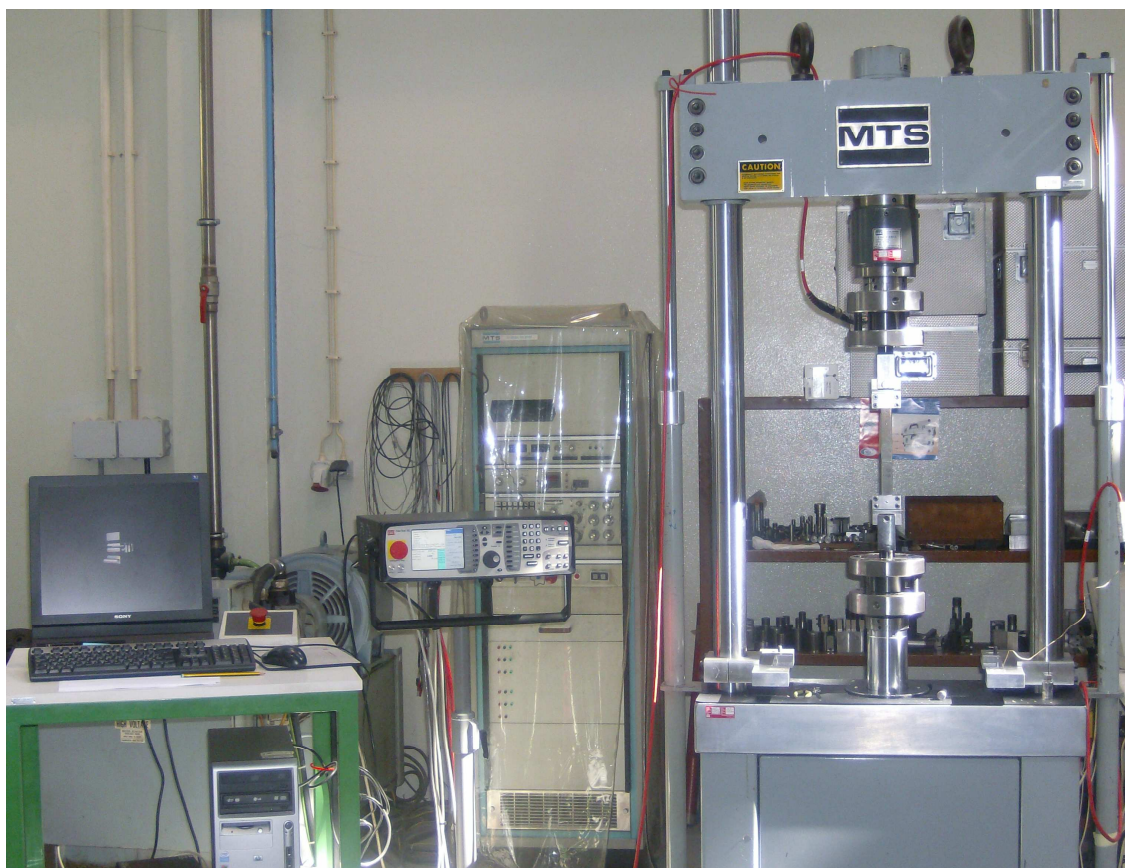


Figura 41 – Equipamento usado no ensaio DCB

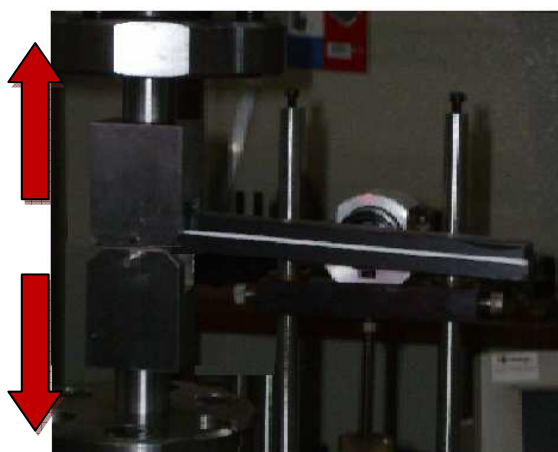


Figura 42 – Pormenor da solicitação aplicada

Para se proceder ao cálculo das taxas de libertação de energia, recorreu-se à equação de Irwin-Kyes [1]

$$G_c = \frac{F^2}{2 \times w} \frac{dC}{da} \quad (1)$$

Onde C é a *compliance* (inverso de rigidez, i. e. deslocamento / força) e a é o comprimento da fenda.

Fazendo uso da norma ASTM D3433-99 vem que:

- Para a taxa crítica de libertação de energia, considerando a força necessária para o aparecimento do início da fenda com uma solicitação em modo I;

$$G_{Ic} = \frac{[4 \times F^2(\text{max})] \times [3 \times a^2 + t_s^2]}{[E \times w^2 \times t_s^3]} \quad (2)$$

- Para a taxa de libertação de energia, considerando a força para a qual o crescimento da fenda pára com uma solicitação em modo I;

$$G_{Ia} = \frac{[4 \times F^2(\text{min})] \times [3 \times a^2 + t_s^2]}{[E \times w^2 \times t_s^3]} \quad (3)$$

Legenda:

$F(\text{max})$ = Carga para a qual se inicia a fenda, [N];

$F(\text{min})$ = Carga para a qual o crescimento da fenda para, [N];

E = Módulo de elasticidade do aderente, [MPa];

w = Largura do aderente, [mm];

a = Comprimento da fenda (distancia entre a ponta da fenda e o centro do orifício onde está alojado o pino), [mm];

t_s = Espessura do aderente, [mm].

Os valores da taxa de libertação de energia para os três adesivos vêm indicados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores das taxas de libertação de energia para os diferentes adesivos

		Média	Desvio Padrão
Araldite® AV 138M com endurecedor HV 998	G_{Ic} [N/m]	345,9	47,8
	G_{Ia} [N/m]	134,5	38,2
Araldite® 2015	G_{Ic} [N/m]	525,7	80,8
	G_{Ia} [N/m]	299,9	40,2
Sikaflex-255 FX	G_{Ic} [N/m]	2901,1	121,9
	G_{Ia} [N/m]	2230,7	122,9

Pode observar-se no Apêndice I o gráfico força/deslocamento do ensaio DCB para cada um dos três adesivos. Como esperado verifica-se que o adesivo mais frágil é aquele que apresenta uma menor taxa de libertação de energia e a mais elevada é a do adesivo dúctil. Quando se trata de um adesivo frágil (Araldite® AV 138M) a propagação da fenda é muito rápida e verifica-se uma queda súbita da força enquanto que para um adesivo dúctil, nomeadamente o Sikaflex-255 FC, a queda da força é muito mais reduzida e a propagação de a fenda é muito lenta.

4.5 Geometria da junta de sobreposição simples

Na Figura 43 pode-se observar a geometria da junta seleccionada (junta de simples sobreposição).

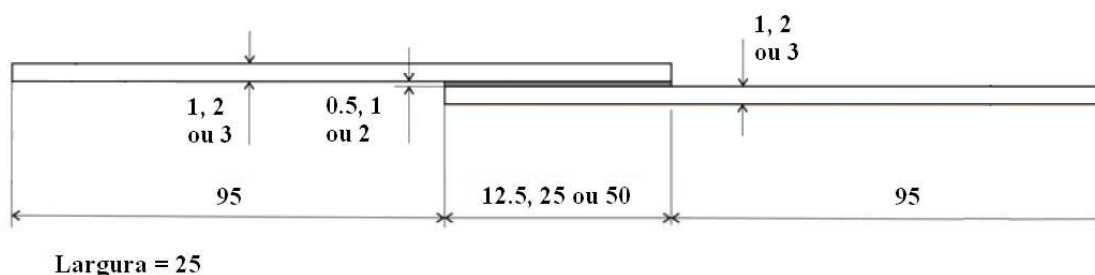


Figura 43 – Geometria da junta de simples sobreposição (dimensões em mm)

Os comprimentos de sobreposição usados na produção das juntas foram de 12,5, 25 e 50 mm, como se pode observar na Figura 43.

Para o adesivo, as espessuras seleccionadas foram de 0,5, 1 e 2 mm. Para se conseguir obter estas espessuras fez-se uso de calços equalizadores, que garantem uma espessura constante em toda a área da junta colada, como se pode verificar na Figura 44.

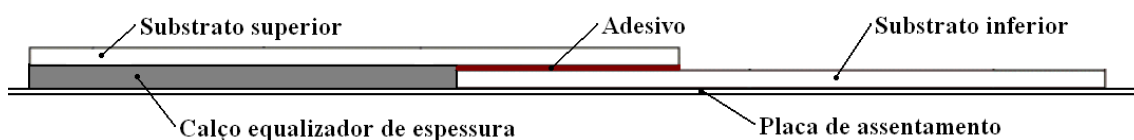


Figura 44 – Regulação de espessura de adesivo através de calço equalizador

As espessuras seleccionadas para os substratos foram de 1, 2 e 3 mm, como se pode observar na Figura 43.

4.6 Tratamento superficial

Os tratamentos superficiais que foram usados estão explicados a seguir.

4.6.1 Tratamento mecânico (P)

Este tratamento consiste numa limpeza prévia da área de aplicação do adesivo, com acetona. Seguidamente procede-se à lixagem dessa área com uma lixa de granulometria intermédia, lixa P180. A lixagem é inicialmente feita a 45° relativamente ao alinhamento longitudinal do substrato (ver Figura 45a)) e a lixagem precedente realizou-se a 90° da realizada anteriormente (ver Figura 45b)). Por fim procedeu-se novamente à limpeza da área lixada com acetona, com a finalidade de remoção de alguma partícula solta com o processo de lixagem.

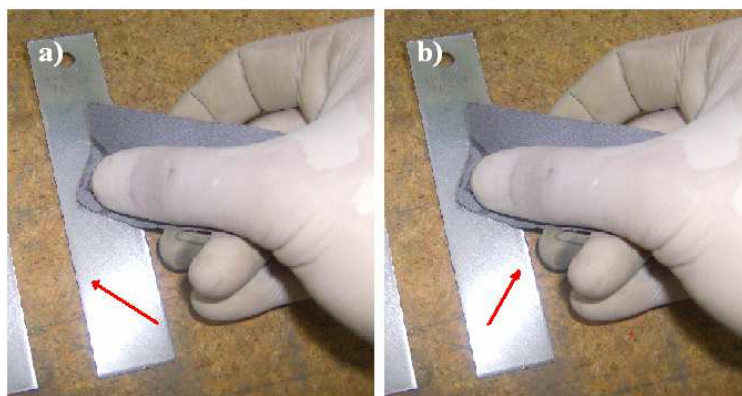


Figura 45 – Lixagem dos substratos

4.6.2 Revestimento por conversão química (A1)

Os processos químicos utilizados são da empresa CHEMETAL LTD. Os substratos em aço macio foram limpos por um spray desengordurante Gardoclean S5174, apresentando uma concentração de 30 g/l, à temperatura de 50°C e durante 2 minutos. Seguidamente procede-se a uma lavagem com água fria. Os substratos foram então tratados com Gardobond 901 em spray, para produzir um revestimento de fosfato amorfo, à temperatura de 70°C e durante 30 segundos. Este revestimento apresenta um peso nominal de cerca de 0,5 g/m². Proceceu-se a uma outra lavagem de água fria. Um segundo tratamento agora com Gardolene D 6800 foi então realizado. Este é um líquido

ácido e o revestimento foi feito por imersão. A solução usada na imersão continha Gardolene D 6800 com uma concentração de 1,6 g/l, água desmineralizada de pH entre 4,2-4,8 e a duração da imersão foi de 30 segundos. O Gardolene D 6800 melhora a resistência à corrosão e a aderência nas superfícies metálicas são envolvidos com revestimentos orgânicos convencionais. Os substratos foram então sujeitos a um jacto de ar comprimido e secos numa estufa.

Os substratos em aço duro foram tratados como os de aço macio. Foram decapados com 16% de ácido clorídrico (HCl) durante 2 minutos, para remoção do óxido, de forma a garantir a formação de uma camada de fosfato. Seguidamente foram sujeitos a uma desoxidação, realizada por fricção com um fio de aço muito fino, antes de aplicação de Gardoclean S5174.

4.6.3 Revestimento por Conversão Química (A2)

A limpeza e decapagem do tratamento A1 também foram utilizadas para este tratamento. Na sequência destas, os substratos foram sujeitos a uma imersão de Gardolene V6513, um refinador de fosfato de titânio, com uma concentração de 0,4 g/l e água desmineralizada durante 30 segundos. Para além desta imersão, foram novamente imersos em Gardobond R2604, um fosfato de zinco, à temperatura de 53°C durante 3 minutos. Isso produz um filme de revestimento com peso nominal de 2,9 g/m². Os substratos foram então lavados com água fria e tratados com Gardolene D6800 como no tratamento A1. Seguidamente foram lavados com água fria projectando sobre eles ar seco e finalmente secos numa estufa.

4.7 Durabilidade

Para testar a durabilidade da junta, estas foram sujeitas a uma temperatura de 50°C e humidade relativa de 80%, durante 0, 1 e 4 semanas. Pode-se ver na Figura 46 a estufa usada (WEISS TECHNIK) no envelhecimento e o respectivo acondicionamento no seu interior.



Figura 46 – Estufa WEISS TECHNIK

4.8 Ensaio de tracção das juntas de sobreposição simples

As juntas foram submetidas à tracção, como se pode verificar na Figura 46, sendo sujeito o adesivo principalmente a um esforço de corte. Para garantir o alinhamento da solicitação aplicada, minimizando o momento que se faz sentir nas extremidades livres da junta colada, fez-se uso de calços como se pode observar na Figura 47.

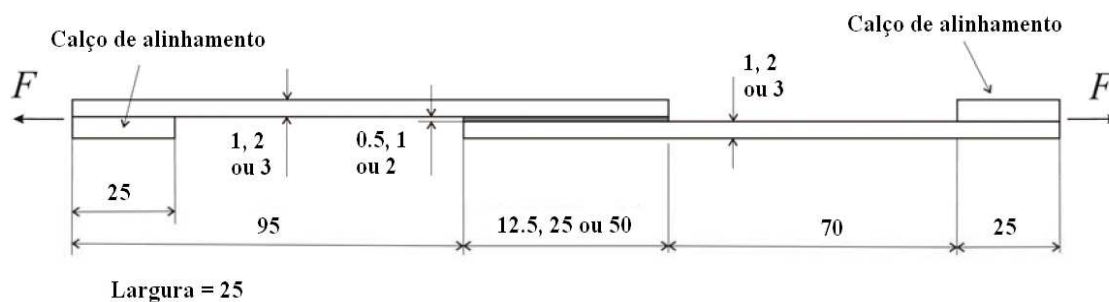


Figura 47 – Solicitação externa aplicada

O ensaio de tracção da junta de sobreposição simples foi realizado numa máquina servo-hidráulica MTS 661.23B-01, onde as velocidades do ensaio foram de 1, 10 e 100 mm/min.

Tabela 6 – Temperatura de transição vítrea dos adesivos estudados

	Araldite® AV 138M	Araldite ® 2015	Sikaflex-255 FC
T_g	>120 °C	67 °C	Temp. negativas

Para os adesivos estudados, espera-se que a velocidade do ensaio não tenha muita influência, uma vez que os ensaios foram realizados a uma temperatura muito afastada da sua temperatura de transição vítrea (ver Tabela 6). A velocidade do ensaio tem muita influência para temperaturas próximas da transição vítrea.

Todos os substratos tinham na sua extremidade livre, um furo Ø6 H7 (ver Figura 48) que serviu para aplicação de um pino guia.

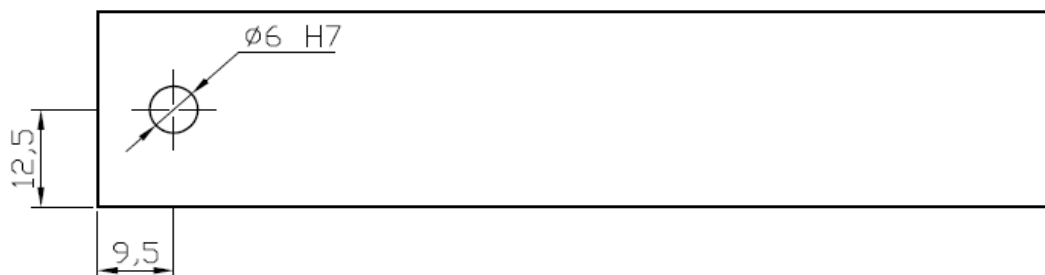


Figura 48 – Furo para aplicação do pino-guia (em mm)

Antes de se realizar o ensaio de tracção procedeu-se ao alojamento das juntas nas amarras e para garantir o perfeito posicionamento do conjunto substrato/calço com as amarras, fez-se uso do pino guia. O aperto das amarras foi realizado com auxílio a uma chave dinamométrica, garantindo que ambos os parafusos recebem um binário constante de 1.5 kN (ver Figura 49), para que a junta não escorregue no momento do ensaio.

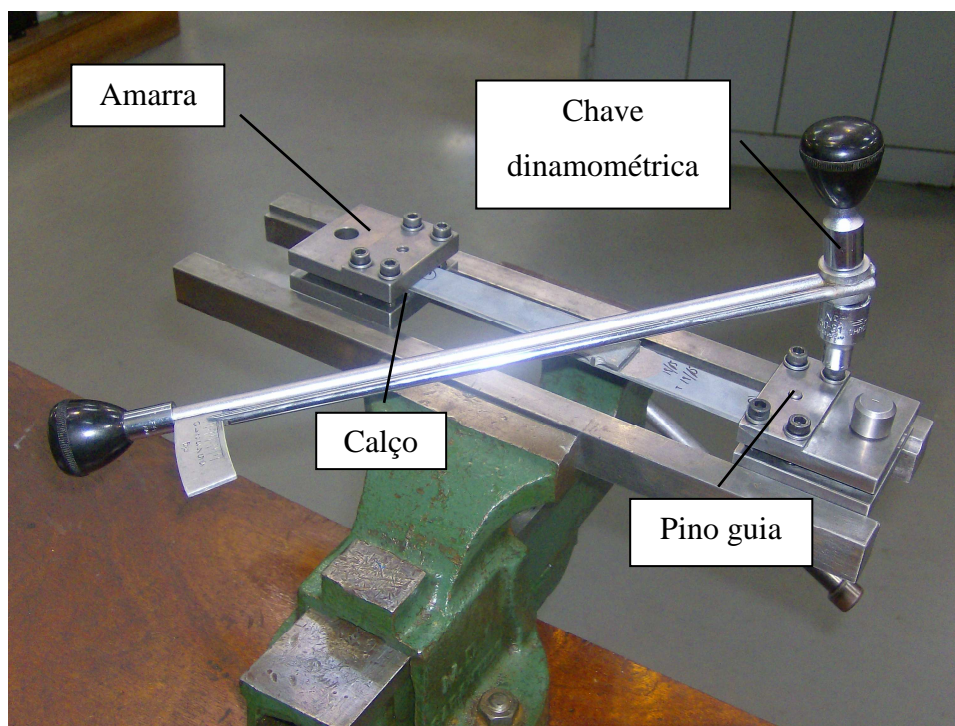


Figura 49 – Preparação das juntas para o ensaio

A fixação das juntas na máquina é conseguida com auxílio de uma cavilha que vai passar pelas amarras, como se pode observar a Figura 50.

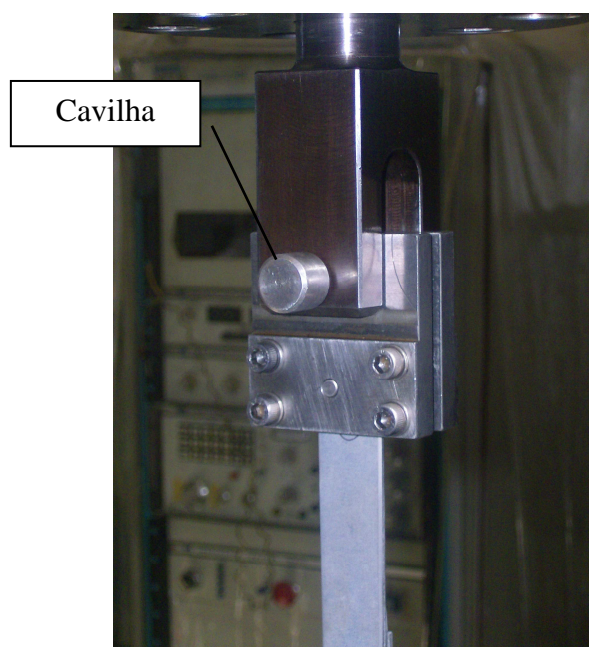


Figura 50 – Sistema de fixação junta/máquina

5 Resultados experimentais

A força de rotura experimental e o modo de rotura das juntas de sobreposição simples vêm apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Plano experimental baseado na matriz ortogonal de Taguchi (L_{18})

Ensaio nº.	σ_{ys}	l	t_s	t_a	G_{Ic}	S_T	A	V_e	$F_L^{experim}$		$F_L^{Calculado}$		Erro [%]
	[MPa]	[mm]	[mm]	[mm]	[N/m]	[-]	[sem.]	[mm/min.]	[kN]	Modo	[kN]	Crítério	
1	184	12,5	1	0,5	2902	P	0	1	2,36	DP/Coes	3,31	DP	40,3
2	184	12,5	2	1	526	A1	1	10	5,42	DP/Int	4,46	DP	17,7
3	184	12,5	3	2	346	A2	4	100	3,10	Ades	9,13	Volk.	194,5
4	184	25	1	0,5	526	A1	4	100	7,02	DP/Int	4,60	DP	34,5
5	184	25	2	1	346	A2	0	1	3,05	Ades	13,68	Volk.	348,5
6	184	25	3	2	2902	P	1	10	5,19	DP/Coes	6,90	DP	32,9
7	184	50	1	1	2902	A2	1	100	6,44	DP/Mist	4,60	DP	28,6
8	184	50	2	2	526	P	4	1	8,41	DP/Int	9,20	DP	9,4
9	184	50	3	0,5	346	A1	0	10	12,60	DP/Int	12,08	DP	4,1
10	1260	12,5	1	2	346	A1	1	1	1,81	Ades	8,58	Volk.	374,0
11	1260	12,5	2	0,5	2902	A2	4	10	3,84	Coes	2,58	CG	32,8
12	1260	12,5	3	1	526	P	0	100	6,97	Mist	5,60	CG	19,7
13	1260	25	1	1	346	P	4	10	5,24	Ades	11,03	Volk.	110,5
14	1260	25	2	2	2902	A1	0	100	4,48	Coes	5,16	CG	15,2
15	1260	25	3	0,5	526	A2	1	1	12,39	Coes	11,19	CG	9,7
16	1260	50	1	2	526	A2	0	10	6,12	Ades	22,37	CG	265,5
17	1260	50	2	0,5	346	P	1	100	13,67	Int	11,99	Volk.	12,3
18	1260	50	3	1	2902	A1	4	1	11,40	Coes	10,33	CG	9,4

F_L - Força de rotura

DP - Deformação plástica do substrato

CG - Cedência global do adesivo

Volk. - Segundo a metodologia de Volkersen

Coes - Rotura coesiva do adesivo

Int - Rotura coesiva do adesivo junto à interface da junta

Ades - Rotura adesiva

Mist - Rotura mista (rotura coesiva e adesiva)

Para adesivos frágeis fez-se recurso à metodologia de Volkersen que é dada pela seguinte fórmula [18]:

$$F_a = \tau_r \times \frac{2 \times w \times l \times \sinh(\lambda \times l)}{\lambda \times l \times [1 + \cosh(\lambda \times l)]} \quad (4)$$

Onde

$$\lambda^2 = \frac{G}{t_a} \left(\frac{2}{E \times t_s} \right)$$

F_a é a força de rotura do adesivo, t_a é a espessura do adesivo, t_s é a espessura do substrato, G módulo de corte do adesivo, E módulo de Young do substrato, w é a largura da junta, l é o comprimento de sobreposição e τ_r é a tensão de rotura ao corte.

Para os adesivos dúcteis e intermédios, a força de rotura é dada pela força correspondente à total deformação plástica do adesivo [1]:

$$F_a = \tau_y \times w \times l \quad (5)$$

Onde τ_y é a tensão de cedência ao corte do adesivo.

Para o caso em que os substratos se deformam plasticamente foi usado uma simples metodologia proposta por Adams et al [21]. A tensão (σ_t) agindo directamente no substrato devido à carga aplicada F é dada:

$$\sigma_t = \frac{F}{w \times t_s} \quad (6)$$

Onde t_s é a espessura do substrato. A tensão à superfície do substrato (σ_s) devido ao momento de flexão M é dada:

$$\sigma_s = \frac{6M}{w \times t_s^2} \quad (7)$$

Onde $M = \frac{k \times F \times t_s}{2}$, de acordo com Goland e Reissner [1]. A variável k é o factor

de momento flector, que relaciona o momento no substrato no fim da sobreposição (extremidade do substrato livre), com a força aplicada.

Assim a carga originará a deformação plástica dos substratos, é somada a componente de tracção e a componente de flexão:

$$F_s = \frac{\sigma_{ys} \times w \times t_s}{1 + 3k} \quad (8)$$

Onde σ_{ys} é a tensão de cedência do substrato. Para cargas baixas e pequenos comprimentos de sobreposição, k é aproximadamente 1. A força correspondente à cedência do substrato é dada como sendo:

$$F_s = \frac{\sigma_{ys} \times w \times t_s}{4} \quad (9)$$

No entanto, para juntas com uma elevada espessura do substrato, de tal forma que $\frac{l}{t_s} \geq 20$, o valor de k decresce e tende para zero. Neste caso vem que:

$$F_s = \sigma_{ys} \times w \times t_s \quad (10)$$

Na Figura 51 pode-se verificar duas curvas força/deformação do adesivo Araldite[®] 2015 (ensaio n^o 4) e o Sikaflex-255 FX (ensaio n^o 7). Para esta análise considerou-se os substratos em aço macio com 1 mm de espessura e a mesma velocidade de teste (100 mm/min.). Verifica-se que as duas curvas têm um comportamento muito semelhante, correspondendo à plasticidade do substrato. Neste caso a rotura é controlada pela plasticidade do substrato. É possível notar também que o epóxico apresenta uma rotura com uma forte queda da força, enquanto que o PU permite ter uma rotura progressiva.

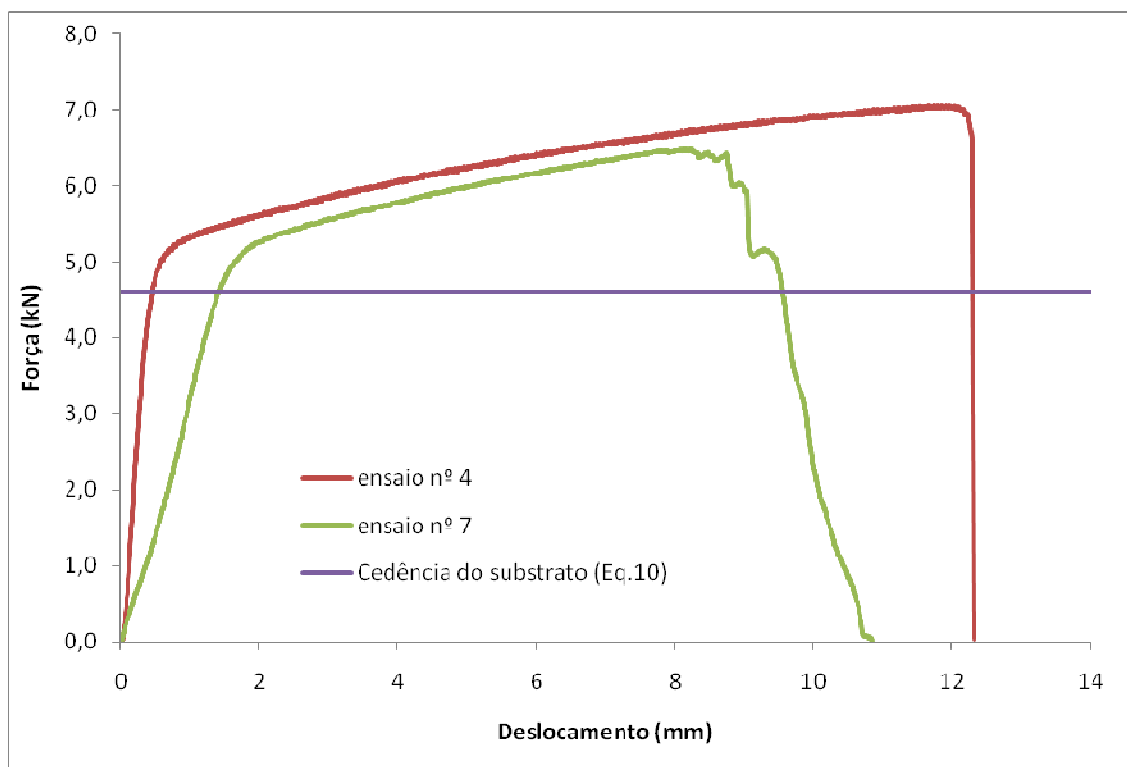


Figura 51 – Curvas força/deformação para os ensaios n^o 4 e 7 (ver Tabela 6)

A metodologia proposta por Adams et al [21]. funciona muito bem quando há deformação plástica dos substratos. A Figura 52 mostra os pontos experimentais que correspondem ao aço macio, onde se pode observar os resultados das três curvas relativas às previsões para $t_s = 1, 2$ e 3 mm, recorrendo às equações 9 e 10. As previsões são ligeiramente mais baixas do que os valores obtidos experimentalmente porque a cedência inicial do aço não tem em conta o endurecimento do aço por encruamento. Os pontos correspondentes aos ensaios n° 3 e 5 não foram incluídos porque houve rotura da junta antes da cedência plástica do substrato.

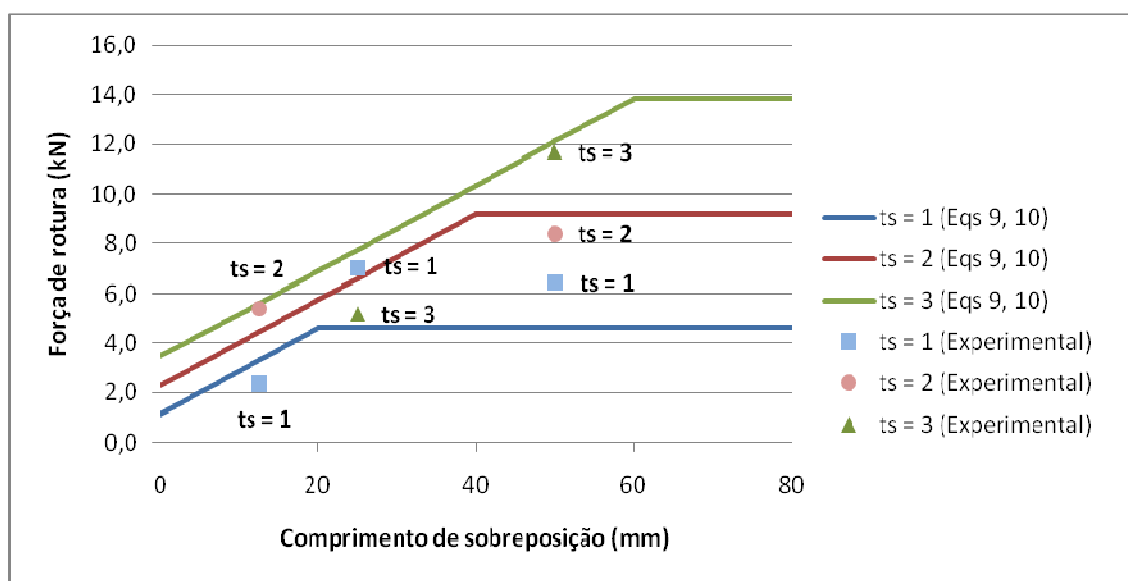


Figura 52 – Pontos experimentais correspondentes ao aço macio e três curvas correspondentes à $t_s = 1, 2$ e 3 mm usando as Equações 9 e 10 (deformação plástica do substrato)

Para os substratos em aço, em que permanecem no regime elástico, foi considerada a cedência global do adesivo no caso de adesivos dúctil (PU) e intermédio (2015). No caso do adesivo frágil (AV 138M), foi usado o critério de Volkersen. Pode observar-se na Figura 53 qua a cedência global do adesivo funciona muito bem para o PU e o Araldite® 2015. O ponto experimental com 50 mm de sobreposição e adesivo Araldite® 2015 (corresponde ao ensaio n° 16) não pode ser considerado como conclusivo uma vez que essa junta apresentou uma rotura adesiva. Como se pode verificar, relativamente ao Adesivo frágil (Araldite® AV 138M), existe uma elevada disparidade dos valores obtidos experimentalmente com a curva teórica. O critério de cedência global do adesivo é uma má aproximação para adesivos frágeis, tornando-se ainda mais evidente para comprimentos de sobreposição mais elevados (50 mm). Obtém-se neste caso melhores previsões usando a metodologia de Volkersen (ver Tabela 7).

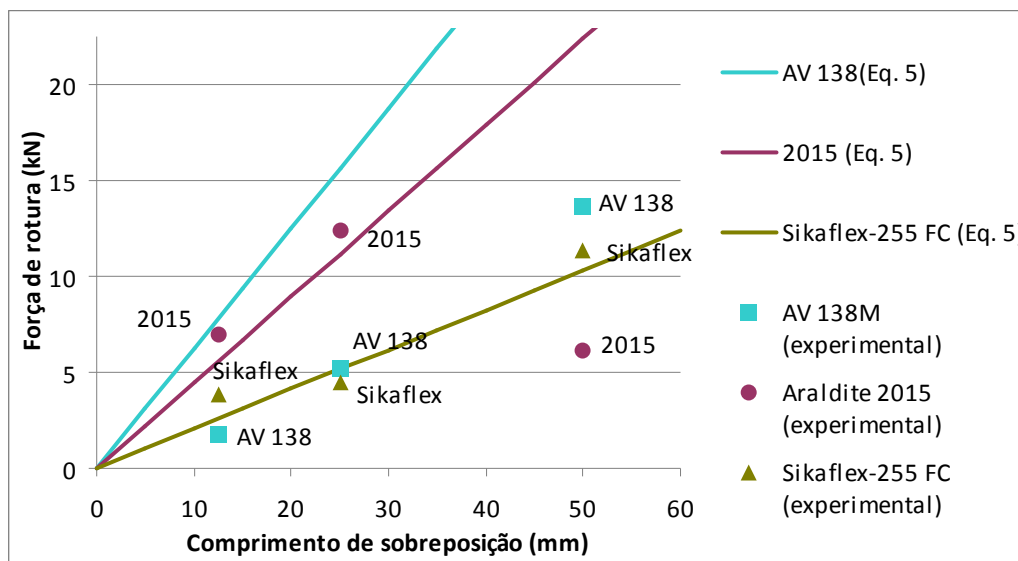


Figura 53 – Pontos experimentais correspondentes ao aço duro e três curvas correspondentes aos adesivos AV 138M, 2015 e PU, usando a Equação 5 (cedência global do adesivo)

O ensaio nº 5 apresenta uma rotura adesiva daí a se verificar na Figura 54 uma tão elevada dispersão nos resultados.

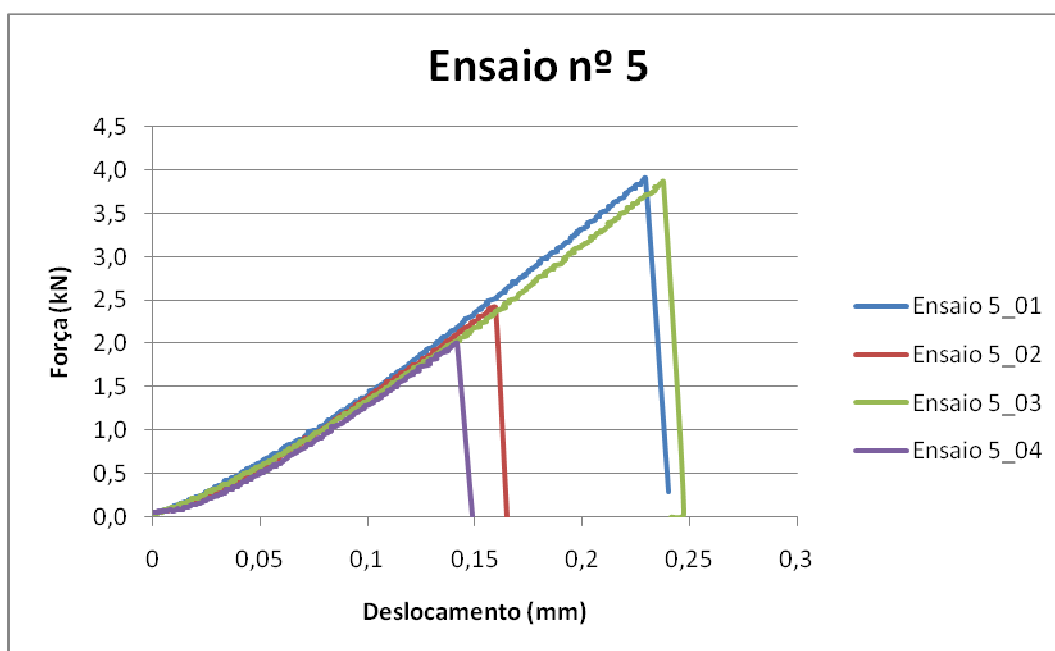


Figura 54 – Curvas de tracção do ensaio nº 5

Na Figura 55 pode verificar-se a comparação entre um adesivo frágil (ensaio nº 17) e um adesivo dúctil (ensaio nº 18). Ambos os gráficos apresentam uma força máxima relativamente próxima, mas a deformação da junta é completamente distinta. No ensaio nº 17 a rotura é abrupta, enquanto no ensaio nº 18 a rotura é mais suave e fácil de

detectar. O elevado deslocamento no caso do ensaio nº 18 não corresponde à deformação do aço (está no domínio elástico) mas sim ao deslocamento do adesivo.

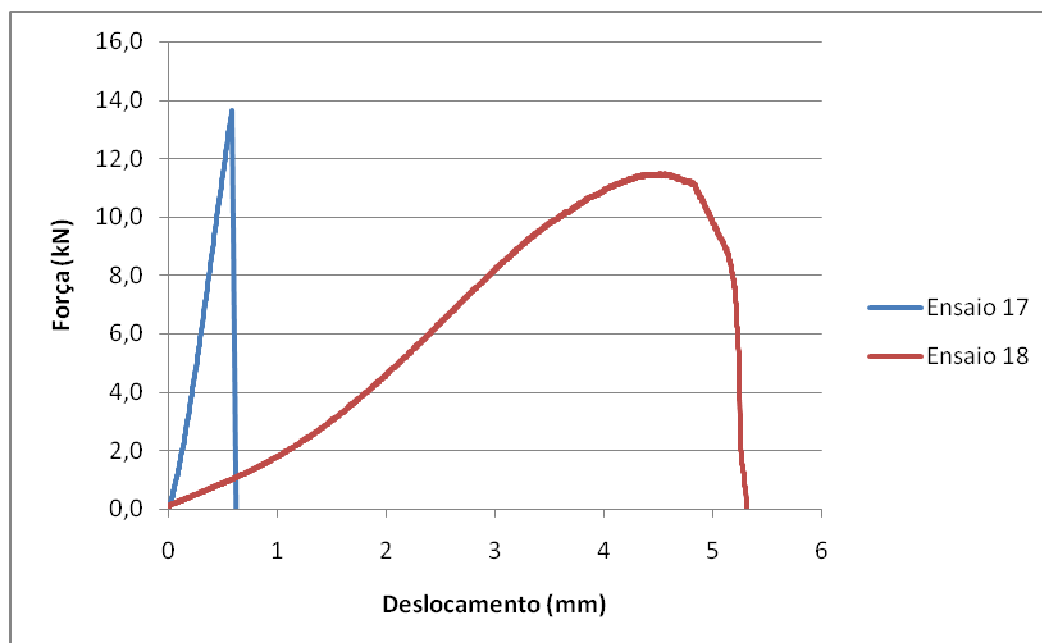


Figura 55 – Comparação da curva força/deslocamento entre um adesivo frágil (ensaio nº 17) e um dúctil (ensaio nº 18) quando o aço está no domínio elástico

Para os substratos em aço macio verificou-se que o tratamento superficial A2 não é muito satisfatório, especialmente para o adesivo Araldite® AV 138M em que a rotura é adesiva, como se pode verificar na Figura 56.

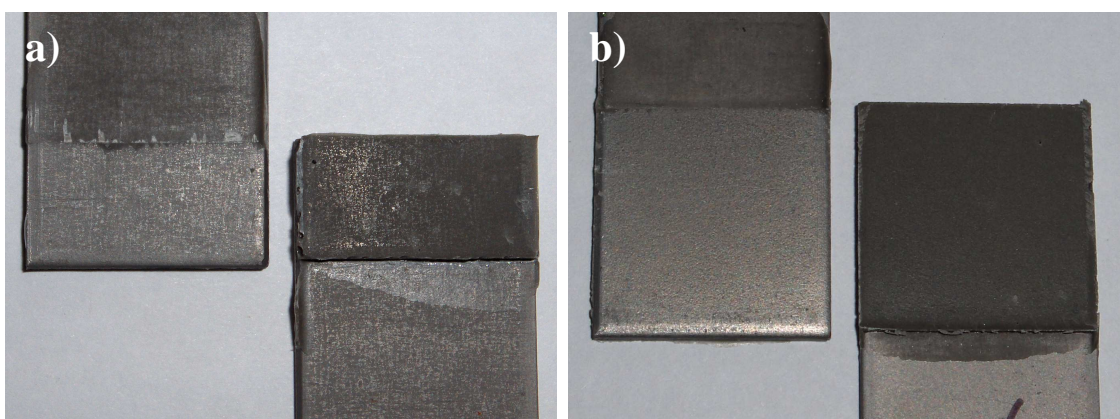


Figura 56 – Rotura adesiva a) ensaio nº 3 e b) ensaio nº 5

O PU apresenta uma rotura coesiva, com a exceção no ensaio nº 7 em que (aço macio e tratamento superficial A2) a rotura é mista (ver Figura 57).

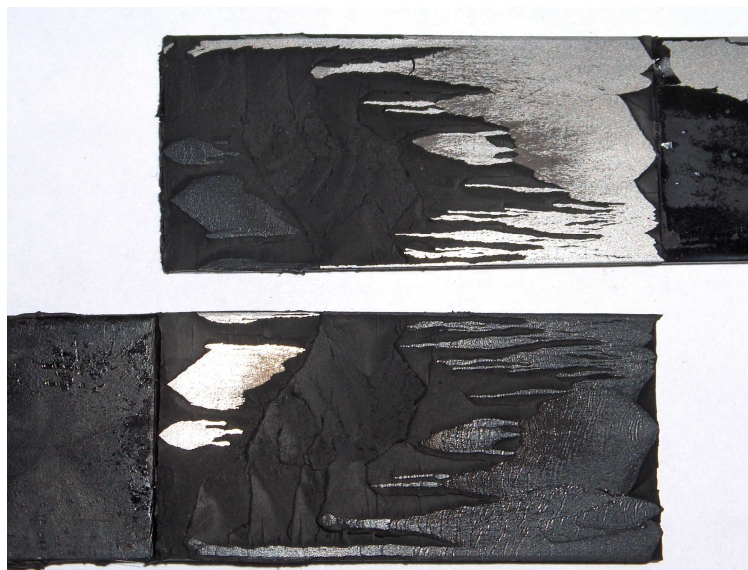


Figura 57 – Rotura mista, ensaio n° 7

Na Figura 58 pode verificar-se um caso de uma rotura coesiva do adesivo junto à interface.

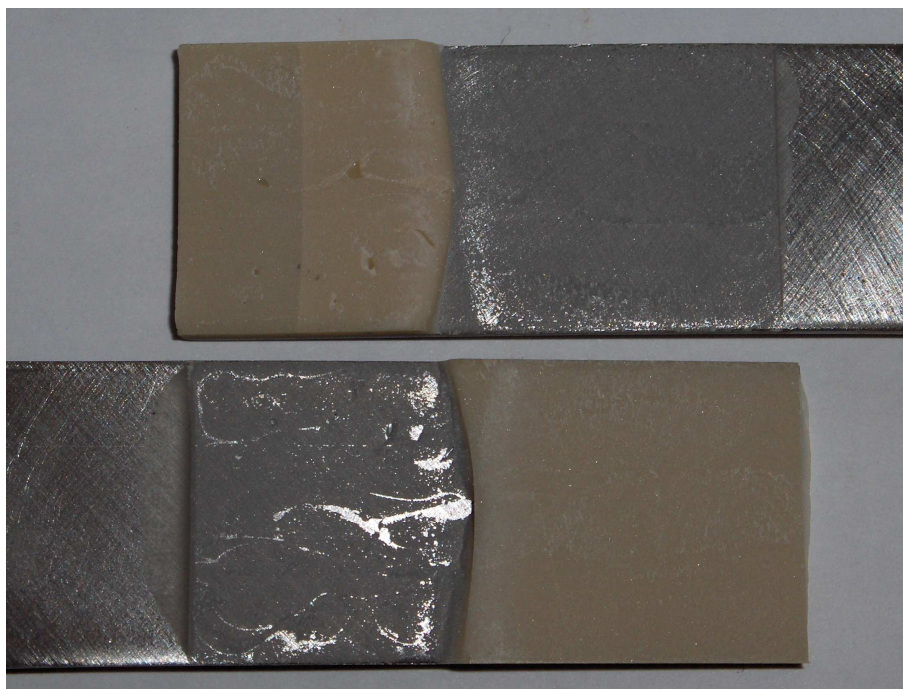


Figura 58 – Rotura coesiva na interface, ensaio n° 8

Na Figura 59 pode observar-se a comparação entre o ensaio n° 10 e 16, em que em ambos os ensaios a rotura foi adesiva. No ensaio n° 10 o tratamento superficial foi o A1 e o adesivo considerado foi o AV138. Para o ensaio n° 16 o tratamento superficial foi o A2 e o adesivo foi o Araldite® 2015.

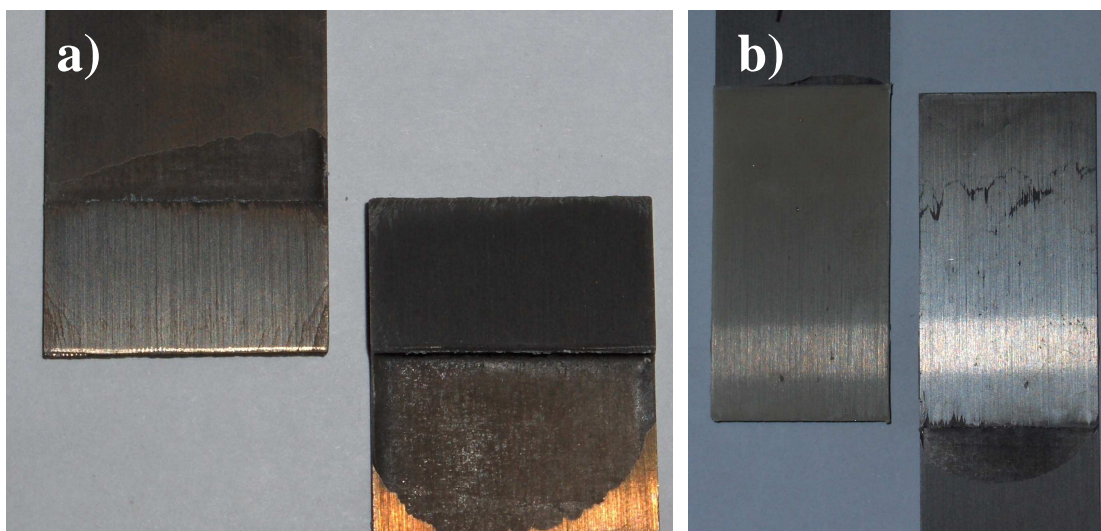


Figura 59 – Rotura adesiva a) ensaio nº 10 e b) ensaio nº 16

Estão apresentados no Apêndice II os gráficos força/deslocamento de todos os ensaios realizados. O PU apresentou sempre uma rotura coesiva, com uma boa adesão do adesivo ao substrato, independentemente do tratamento superficial ou envelhecimento (com excepção do ensaio nº 7). Isto pode ser explicado pelo facto de ter sido usado um primário e ter excelentes propriedades de adesão.

6 Análise estatística

6.1 Análise de variância

A análise de variância (ANOVA) dos resultados experimentais dá a importância relativa de todas as variáveis (ver Tabela 8).

Tabela 8 – Análise de variância (ANOVA)

FONTES	VARIAÇÕES (somadas de quadrados)	GdL	DESVIOS QUADRÁTICOS MÉDIOS (variâncias)	RÁCIO - F	RÁCIO - P	PERCENTAGEM DE CONTRIBUIÇÃO (%)
σ_{ys} (MPa)	35831282,2	1	35831280,0	320,6106	0,0001	3,8
l (mm)	426166569,1	2	213083300,0	1906,6236	0,0001	45,5
t_s (mm)	171951105,5	2	85975550,0	769,2908	0,0001	18,4
t_a (mm)	176921151,3	2	88460580,0	791,5263	0,0001	18,9
G_{lc} (N/m)	51724615,9	2	25862310,0	231,4104	0,0001	5,5
S_T (-)	25921273,1	2	12960640,0	115,9690	0,0001	2,7
A (sem.)	29737429,3	2	14868710,0	133,0420	0,0001	3,2
V_e (mm/min.)	3208753,7	2	1604377,0	14,3556	0,0001	0,3
$\sigma_{ys} * l$	8145888,8	2	4072944,0	36,4438	0,0001	0,8
Erro residual	6035013,5	54	111759,5			0,8
TOTAL	935643082,2					100,0

Os principais factores que influenciam a força de rotura são em termos de percentagem de contribuição o comprimento de sobreposição (cerca de 46%), a espessura do substrato (18%) e a espessura do adesivo (19%). A taxa crítica de libertação de energia tem uma percentagem baixa (cerca de 5%) e os restantes factores apresentam uma percentagem de contribuição pouco significativa (apresentam uma percentagem inferior 5 %). Como seria de esperar, a velocidade do ensaio tem uma contribuição desprezável, apresentando uma contribuição semelhante ao erro residual. Na coluna do Rácio – P (ver Tabela 8) pode ver-se que todos os factores, incluindo a interacção entre a tensão de cedência do substrato (σ_{ys}) e o comprimento de sobreposição (l), são significativos estatisticamente para um nível de significância de 95%. Os efeitos de cada uma das variáveis são apresentados a seguir sob a forma de gráficos e comentados.

O efeito principal da tensão de cedência do substrato é mostrado na Figura 60. Como seria de esperar, a força de rotura aumenta com o aumento da tensão de cedência do substrato. Como a deformação plástica é anulada com o aumento da tensão de cedência do substrato, os adesivos podem desenvolver a sua capacidade plena de resistir à tensão de corte aplicada.

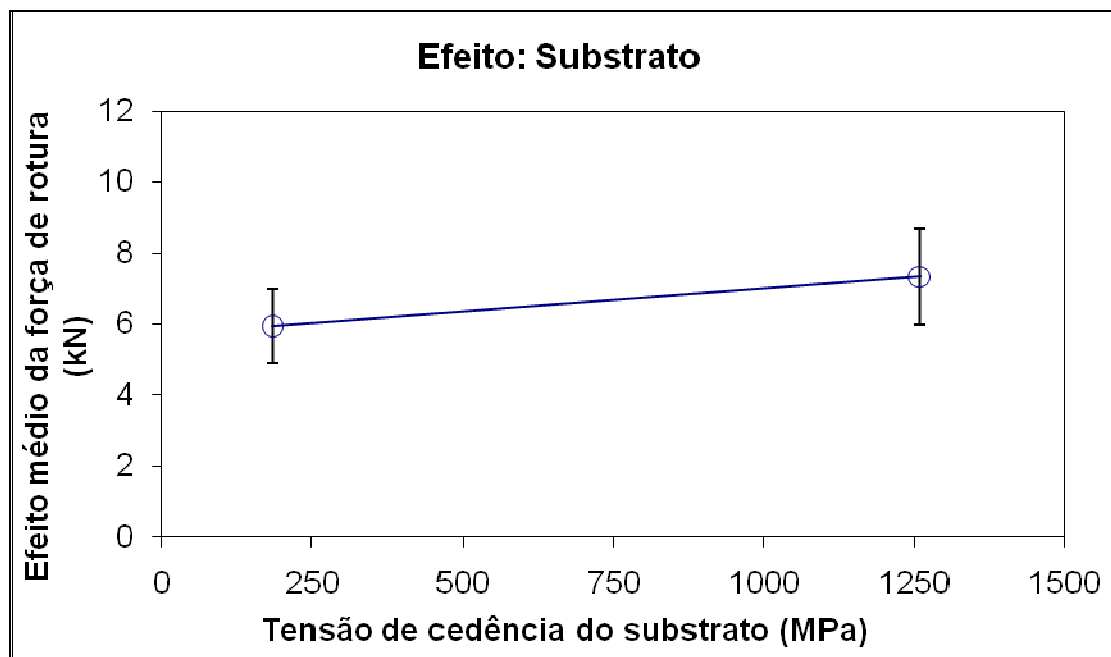


Figura 60 – Gráfico da resposta média com intervalos de confiança de 95% para o efeito da tensão de cedência do substrato

O efeito principal do comprimento de sobreposição é mostrado na Figura 61, onde se pode observar que a força de rotura aumenta linearmente com o aumento da sobreposição. O comprimento de sobreposição é o factor que mais influencia a força de rotura (ver Tabela 8). Isto deve-se ao facto de terem sido usados dois adesivos dúcteis que permitem usar todo o comprimento de sobreposição, mesmo para grandes comprimentos.

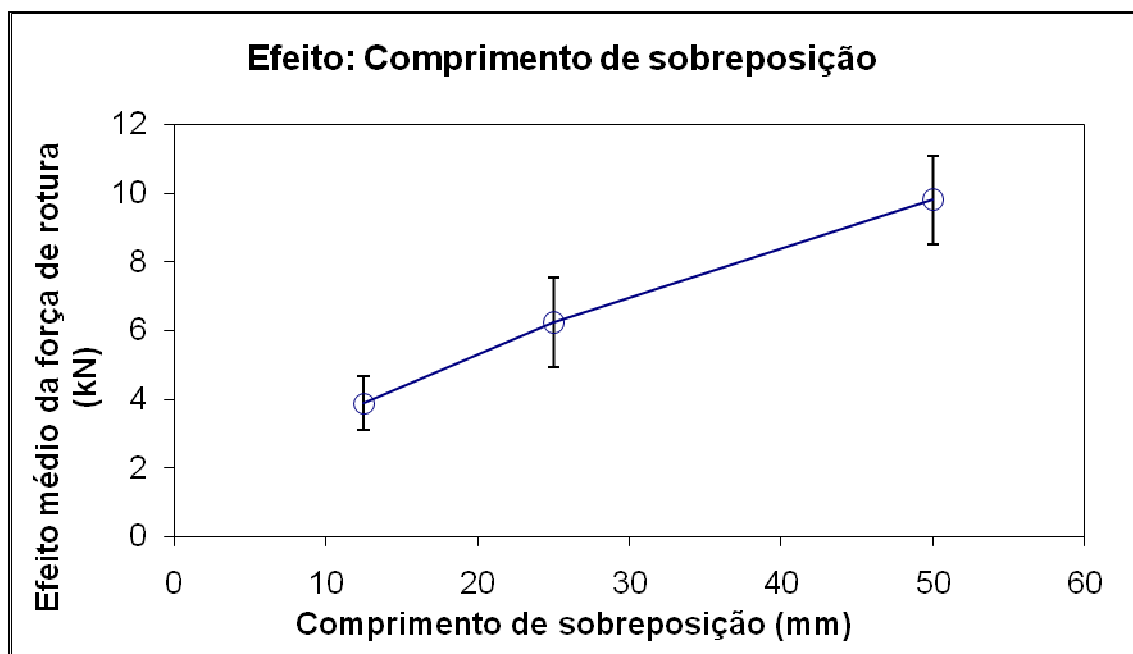


Figura 61 – Gráfico da resposta média com intervalo de confiança de 95% para o efeito do comprimento de sobreposição

Na Figura 62 pode avaliar-se a interacção entre a tensão de cedência do substrato e o comprimento de sobreposição. As variações são praticamente lineares para os dois tipos de substratos, mas as linhas não são paralelas. Pode constatar-se que o efeito do comprimento de sobreposição aumenta com o aumento da tensão de cedência do substrato. Quando o substrato se deforma plasticamente o adesivo não consegue desenvolver a sua capacidade máxima ao corte, não usando toda a sobreposição. No caso de substratos que se mantêm no domínio elástico, o adesivo pode deformar-se plasticamente por todo o comprimento de sobreposição, permitindo assim uma mais elevada força de rotura. Este tipo de efeito também foi detectado por da Silva et al. com ainda mais clareza como mostrado na Figura 63 [3].

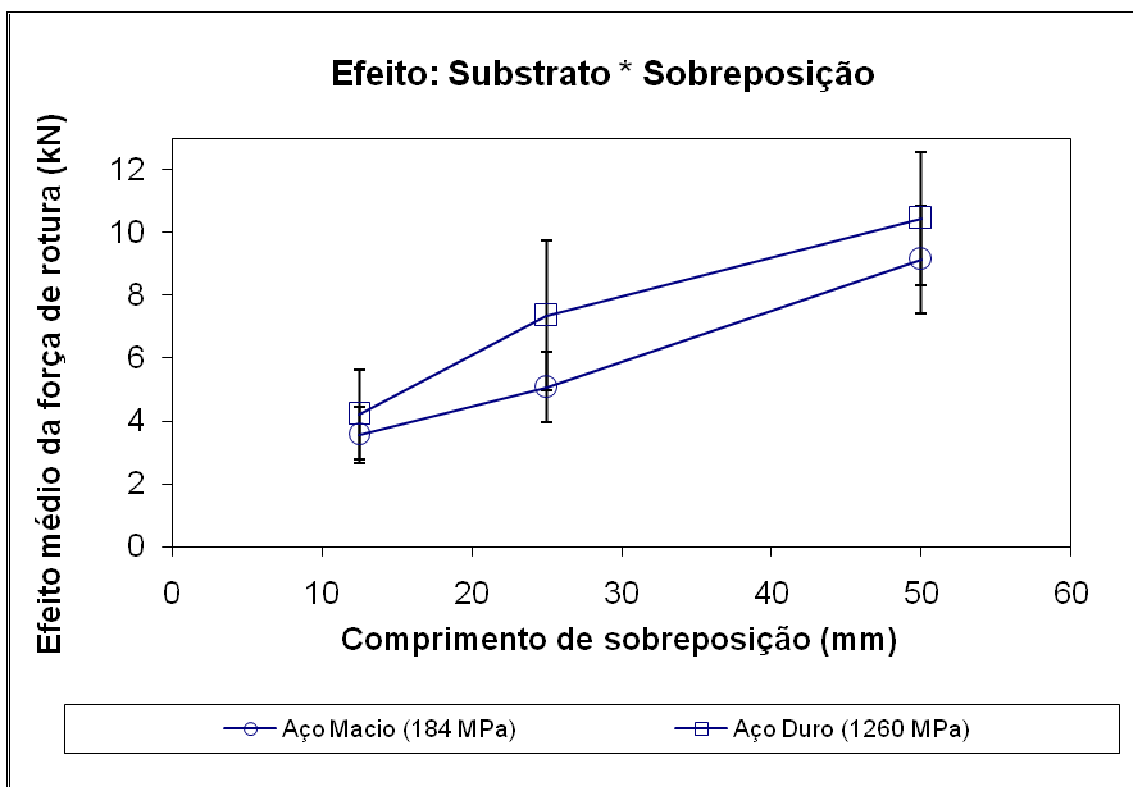


Figura 62 – Gráfico da resposta média com intervalo de confiança de 95% para o efeito da interação da tensão de cedência do substrato * comprimento de sobreposição

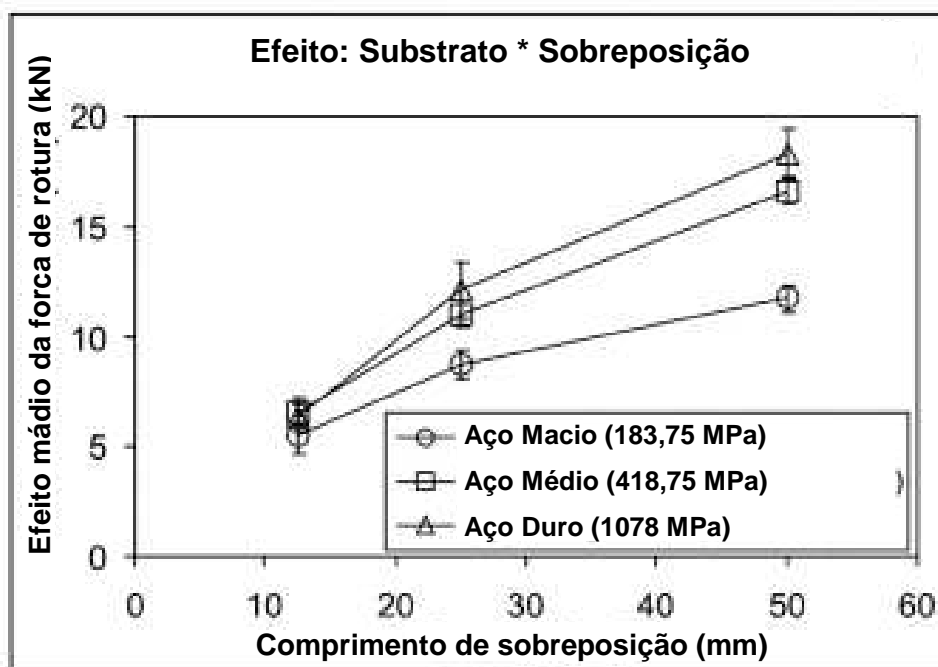


Figura 63 – Gráfico da resposta média com intervalo de confiança de 95% para o efeito da interação da tensão de cedência do substrato * comprimento de sobreposição [3]

O efeito principal da espessura do substrato é apresentado na Figura 64. Verifica-se a força de rotura aumenta linearmente com a espessura do substrato. Com o aumento da espessura do substrato a área resistente do aço aumenta e o substrato, torna-se mais resistente, fazendo com que o adesivo possa desenvolver a sua capacidade máxima ao corte. Este efeito é mais importante para substratos de menor tensão de cedência, pois os substratos de elevada tensão de cedência não se deformam plasticamente para qualquer espessura.

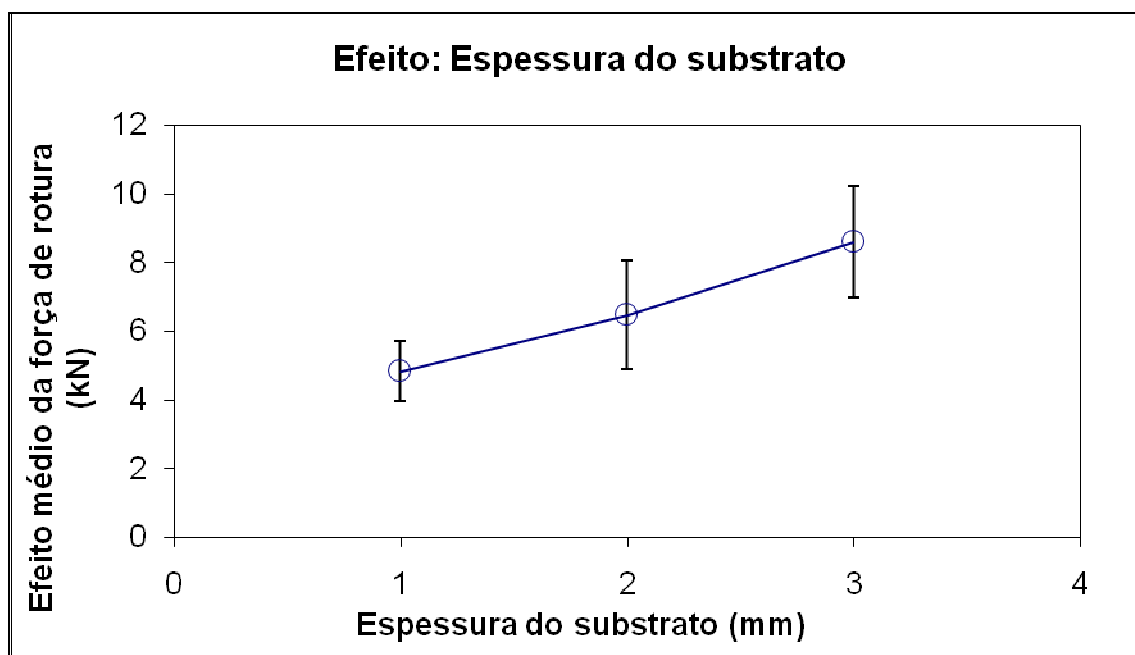


Figura 64 – Gráfico da resposta média com intervalo de confiança de 95% para o efeito da espessura do substrato

A influência da espessura do adesivo, apresentada na Figura 65, indica que a força de rotura diminui com o aumento da espessura do adesivo. Este resultado confirma resultados previamente publicados na literatura [22].

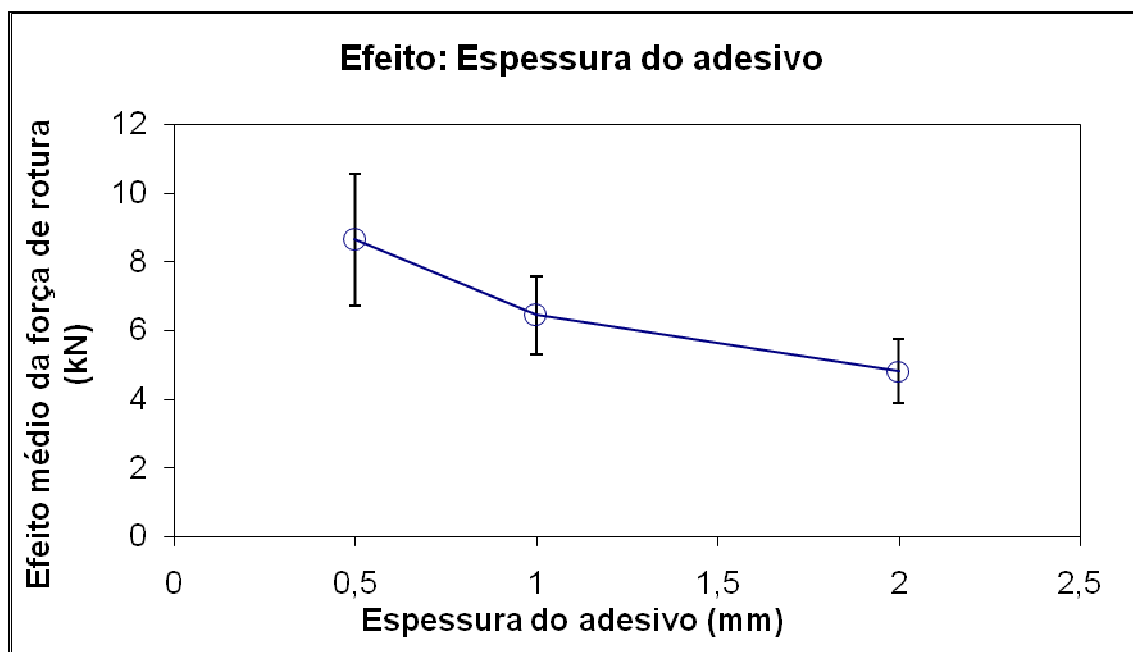


Figura 65 – Gráfico da resposta média com intervalo de confiança de 95% para o efeito da espessura do adesivo

O efeito da taxa crítica de libertação de energia sobre a força de rotura é apresentado na Figura 66. O adesivo mais frágil apresenta uma elevada variância pois nos ensaios realizados verificou-se muitas roturas adesivas para este adesivo. Como seria de esperar, o PU é o adesivo que apresenta uma menor força de rotura comparativamente com os adesivos Araldite[®] AV 138M e 2015. No entanto a redução não é muito notável. Isto pode ser explicado pelo facto de para grandes comprimentos de sobreposição o PU ter uma forma de rotura comparável às dos outros adesivos porque a flexibilidade e ductilidade do adesivo permite-lhe usar todo o comprimento de sobreposição. O adesivo 2015 é aquele que dá a melhor força de rotura. Este adesivo não é aquele que tem maior taxa crítica de libertação de energia mas apresenta a melhor combinação entre resistência mecânica e ductilidade.

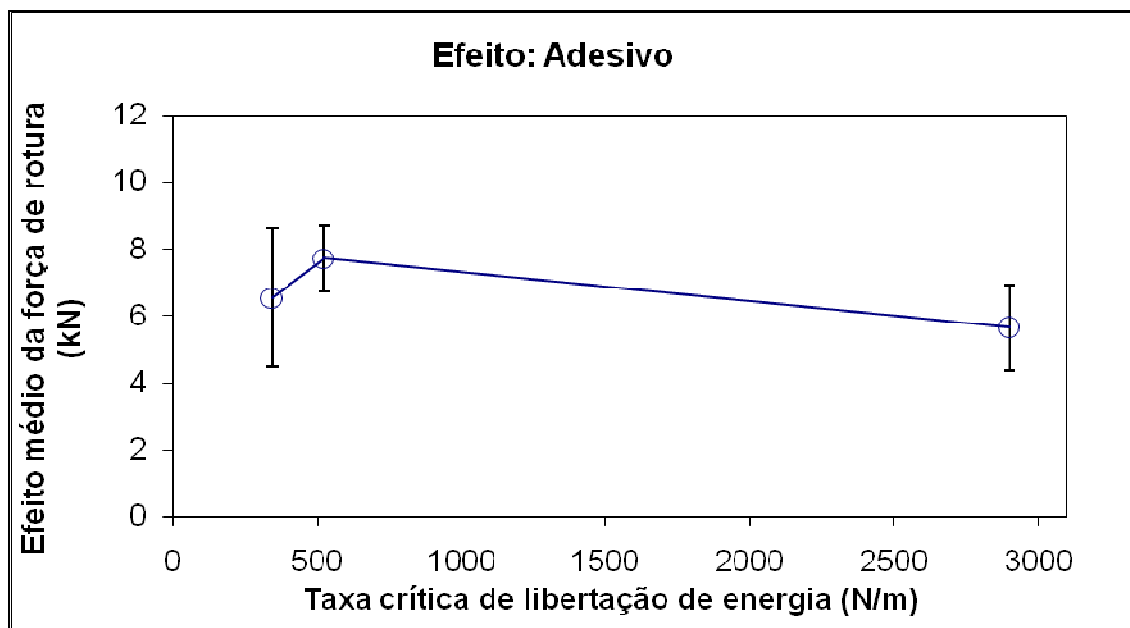


Figura 66 – Gráfico da resposta média com intervalo de confiança de 95% para o efeito da taxa crítica de libertação de energia

A Figura 67 dá o efeito da preparação superficial. Pode verificar-se que o tratamento A2 é aquele que dá a menor força de rotura. Isto advém do facto do tratamento A2 aplicado em substratos com um baixa cedência ter dado uma rotura adesiva, verificando-se uma fraca adesão e conseqüente baixa força de rotura. As preparações superficiais P e A1 permitem uma mais elevada força de rotura, não existindo uma diferença significativa relativamente à força de rotura obtida por eles.

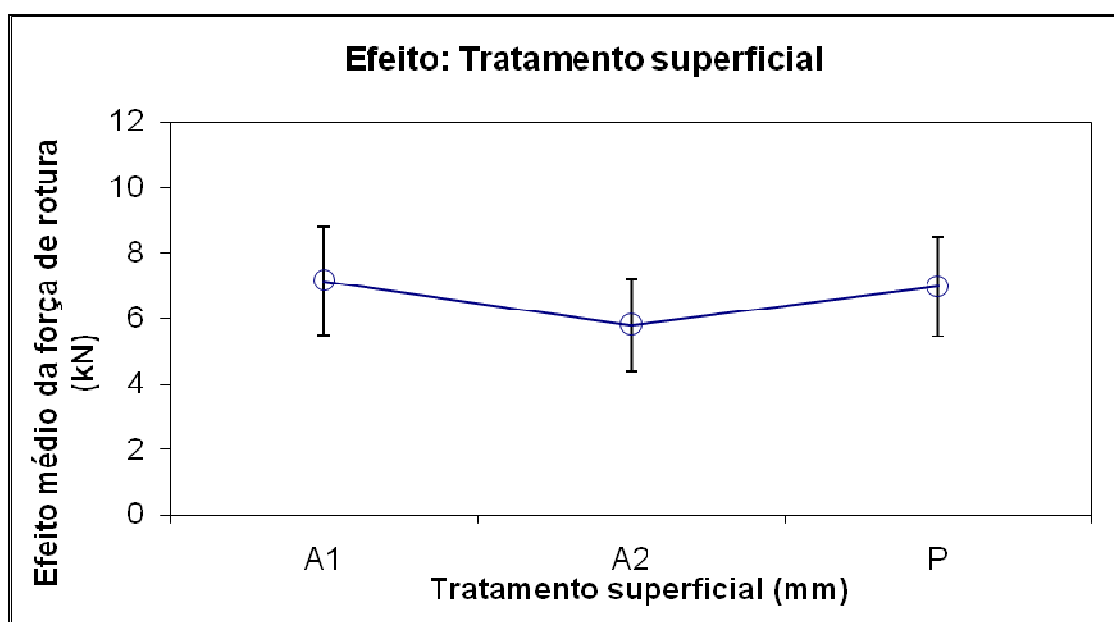


Figura 67 – Gráfico da resposta média com intervalo de confiança de 95% para o tratamento superficial

O efeito do envelhecimento é apresentado na Figura 68. Pode constatar-se que ao passar de 0 semanas para 1 semana de envelhecimento, existe uma melhoria da força de rotura. Isto pode dever-se ao facto de 1 semana a 50 °C a 80% de humidade relativa ter melhorado a cura do adesivo em vez de o degradar, principalmente para o PU em que o tempo de cura é bastante elevado. Mas para um envelhecimento de 4 semanas já se verifica uma queda da força de rotura, mas mesmo assim a força de rotura é superior àquela sem envelhecimento. Para o estudo da durabilidade poder ser mais conclusivo, seria necessário considerar um tempo de envelhecimento mais longo e/ou umas condições ambientais mais extremas, uma vez que os adesivos Araldite® 2015 e AV 138 têm uma resistência razoavelmente boa a temperaturas elevadas (até 90 °C) e o PU têm uma boa resistência mecânica a humidades relativas elevadas.

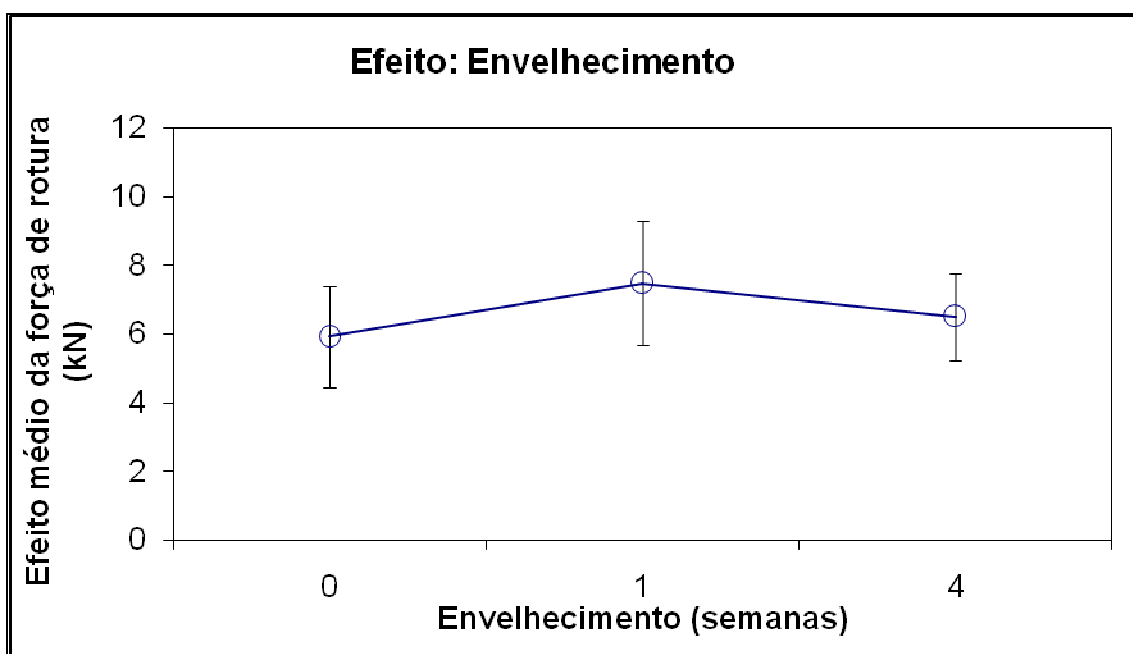


Figura 68 – Gráfico da resposta média com intervalo de confiança de 95% para o envelhecimento

A Figura 69 dá o efeito da velocidade do ensaio. Como seria de esperar, entre a velocidade 1 e 100 mm/min não existe uma diferença significativa da força de rotura, vindo assim comprovar o esperado na secção 2.1.8. Como a temperatura usada é muito superior ou inferior à temperatura de transição vítrea, a velocidade tem muito pouco influência na força de rotura obtida. Para a velocidade de 100 mm/min, obtém-se um ligeiro aumento da força de rotura mas esse aumento é pouco significativo.

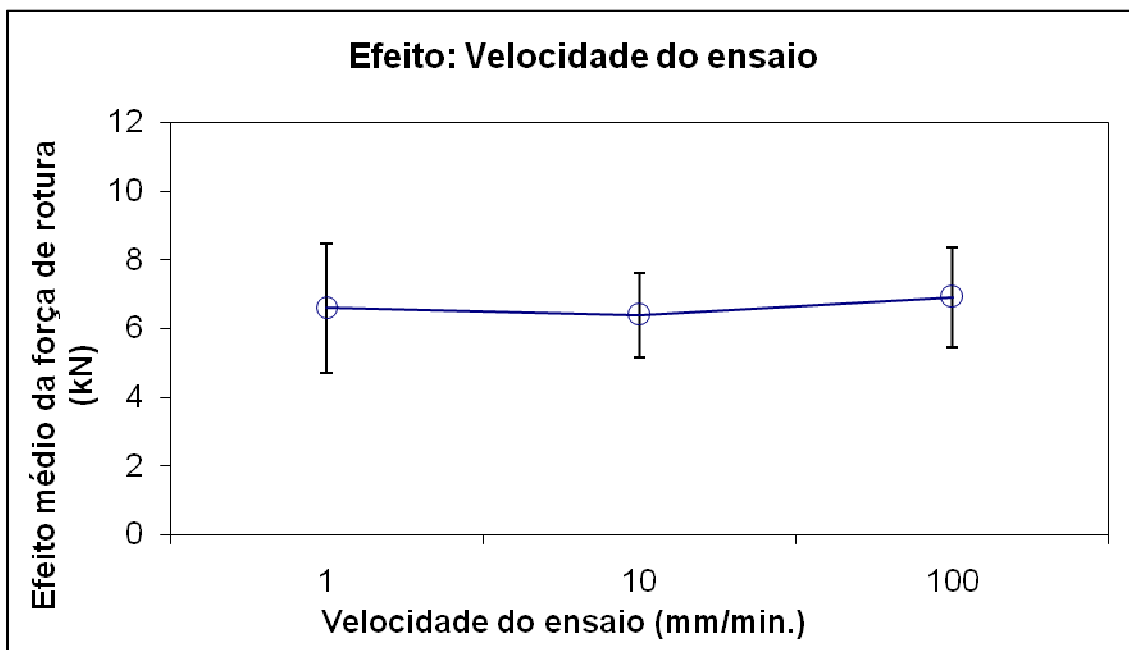


Figura 69 – Gráfico da resposta média com intervalo de confiança de 95% para a velocidade do ensaio

A matriz ortogonal de Taguchi considerada apenas permite estudar uma interação, mas seria interessante verificar outras interações como, por exemplo entre as variáveis com uma maior contribuição.

6.2 Regressão linear

Para se obter uma previsão da força de rotura recorreu-se a uma regressão linear múltipla, que descreve uma relação entre o conjunto de variáveis quantitativas independentes e a variável dependente (força de rotura) também quantitativa, através da expressão [2]:

$$\begin{aligned}
 F_L^{prev.} = & M + (\overline{\sigma_{ysi}} - M) + (\overline{l_i} - M) + (\overline{t_{si}} - M) + \\
 & + (\overline{t_{ai}} - M) + (\overline{G_{lci}} - M) + (\overline{S_T} - M) + (\overline{A_i} - M) + (\overline{V_{ei}} - M)
 \end{aligned}
 \quad (11)$$

Onde $F_L^{prev.}$ é a previsão da força de rotura, M é a média da força de rotura, $\overline{\sigma_{ysi}}$ é a tensão de cedência do substrato no nível i , $\overline{l_i}$ é o comprimento de sobreposição no

nível i , $\overline{t_{si}}$ é a espessura do substrato no nível i , $\overline{t_{ai}}$ é a espessura do adesivo no nível i , $\overline{G_{Ici}}$ é a taxa crítica de libertação de energia no nível i , $\overline{S_{Ti}}$ é o tratamento superficial no nível i , $\overline{A_i}$ é o envelhecimento no nível i e $\overline{V_{ei}}$ é a velocidade do ensaio no nível i .

Os valores $\overline{\sigma_{ysi}}$, $\overline{l_i}$, $\overline{t_{si}}$, $\overline{t_{ai}}$, $\overline{G_{Ici}}$, $\overline{S_{Ti}}$, $\overline{A_i}$ e $\overline{V_{ei}}$ podem ser determinados pela equação linear que melhor aproximar os dados apresentados nas Figura 62 - 70 respectivamente. Para isso usou-se o programa de calculo de regressões o Statview®.

Para a obtenção da regressão linear, fez-se duas análises distintas.

Na primeira regressão linear considerou-se todas as variáveis independentes. No entanto a variável S_T não é quantitativa, sendo necessário tratá-la com variáveis mudas (*dummy variable*). O número de variáveis mudas necessárias é o número de níveis menos 1 [20]. Foram consideradas neste caso duas variáveis mudas M1 e M2 (3 níveis – 1 = 2). A atribuição de cada nível às variáveis mudas foi a seguinte:

P → M1=0, M2=1

A1 → M1=1, M2=0

A2 → M1=1, M2=1

A regressão linear obtida foi:

$$F_L^{prev.1} = 1,535 \times \sigma_{ys} + 166,442 \times l + 2156,871 \times t_s - 2148,964 \times t_a - 0,490 \times G_{Ic} - 636,525 \times M1 - 813,590 \times M2 + 87,095 \times A + 5,884 \times V_e \quad (12)$$

Onde σ_{ys} é a tensão de cedência do substrato em MPa, l é o comprimento de sobreposição em mm, t_s é a espessura do substrato em mm, t_a é a espessura do adesivo em mm, G_{Ic} é a taxa crítica de libertação de energia em N/m, M1 e M2 são as variáveis mudas sem unidades, A é o envelhecimento em semanas e V_e é a velocidade de ensaio em mm/min.

Esta primeira regressão apresenta um coeficiente de determinação (R^2) de 0,977 e o coeficiente de correlação amostral (R) de 0,988, sendo por isso uma boa aproximação.

A segunda regressão linear foi determinada segundo o método de regressão passo a passo (*stepwise regression*), onde são consideradas em cada passo as variáveis com maior contribuição e as variáveis que tenham sido incluídas no modelo ou dele excluídos em passos anteriores são reexaminados. As variáveis são seleccionadas de

forma a maximizar a proporção da variação total explicada pela regressão (ou seja, a maximizar o coeficiente de determinação, R^2) [20]. A regressão foi obtida em 5 passos e obteve-se a seguinte equação:

$$F_L^{prev.2} = 1,446 \times \sigma_{ys} + 162,171 \times l + 2050,100 \times t_s - 2255,735 \times t_a - 0,52390 \times G_{lc} \quad (13)$$

Esta segunda regressão apresenta um coeficiente de determinação (R^2) de 0,973 e o coeficiente de correlação amostral (R) de 0,986, sendo também uma boa aproximação.

6.3 Validação

As equações 12 e 13 foram usadas para prever a força de rotura de juntas adesivas apresentadas em outros trabalhos, de modo a validá-las. A Tabela 9 compara as previsões da força de rotura obtidas pelas equações 12 e 13 com a força de rotura obtida experimentalmente para casos disponíveis na literatura. Para a equação 12 verifica-se que o erro obtido pela comparação da previsão com a experimental é moderado. Neste caso foram consideradas todas as variáveis. Na equação 13 apenas se considerou as variáveis que apresentem a maior contribuição, e pode constatar-se que a previsão da força de rotura comparativamente com a previsão anterior (equação 12) é sempre superior o que em média origina um erro um pouco menor, comparativamente com o erro associado à equação 12. No entanto a segunda regressão linear apresenta um erro muito elevado para o caso 10 e 16 da referência [2]. Estes maus resultados ocorrem quando é usado o tratamento superficial A2 (da referência [2]) num substrato de baixa tensão de cedência (ver Tabela 9).

Pode verificar-se que a previsão da força de rotura obtida estatisticamente dá uma boa estimativa da força de rotura experimental. Sendo a equação 13 mais simples, é aquela que é aconselhada usar.

Tabela 9 – Validação experimental da previsão da força de rotura estatística

Caso	σ_{ys} [MPa]	l [mm]	t_s [mm]	t_a [mm]	G_{Ic} [MPa]	S_T [-]	A [sem.]	V_e [mm/min.]	$F_L^{experim}$ [kn]	$F_L^{prev.1}$ Eq. 12 [kN]	Erro1 [%]	$F_L^{prev.2}$ Eq. 13 [kN]	Erro2 [%]
1	184	12,5	2	0,2	450	P	0	1	6,07	5,22	14,0	5,71	6,0
2	184	25	2	0,2	450	P	0	1	9,02	7,30	19,1	7,73	14,3
3	184	50	2	0,2	450	P	0	1	12,1	11,46	5,3	11,79	2,6
4	419	12,5	2	0,2	450	P	0	1	7,33	5,58	23,9	6,05	17,5
5	419	25	2	0,2	450	P	0	1	10,65	7,66	28,1	8,07	24,2
6	419	50	2	0,2	450	P	0	1	15,46	11,82	23,5	12,13	21,6
7	1078	12,5	2	0,2	450	P	0	1	6,37	6,59	3,5	7,00	9,9
8	1078	25	2	0,2	450	P	0	1	11,1	8,67	21,9	9,03	18,7
9	1078	50	2	0,2	450	P	0	1	16,88	12,83	24,0	13,08	22,5
10	184	25	1	0,2	346	A2	0	1	3,57	4,56	27,6	5,74	60,7
11	184	50	1	0,5	450	P	0	1	6,83	8,66	26,8	9,06	32,7
12	184	12,5	1,5	0,1	346	A2	0	1	3,58	3,77	5,3	4,96	38,6
13	184	25	1,5	0,2	450	P	0	1	8,55	6,22	27,2	6,71	21,5
14	184	50	2	0,2	346	A1	0	1	12,08	11,69	3,2	11,84	2,0
15	184	12,5	2	0,5	450	A2	0	1	3,47	3,94	13,5	5,03	45,0
16	1260	50	1	0,1	450	A2	0	1	6,56	10,53	60,6	11,52	75,6
17	1260	25	1	0,5	346	A1	0	1	4,84	6,38	31,8	6,62	36,7
18	1260	25	1,5	0,1	450	A1	0	1	16,05	8,26	48,5	8,49	47,1
19	1260	12,5	1,5	0,5	346	P	0	1	5,95	5,20	12,6	5,62	5,6
20	1260	50	2	0,1	346	P	0	1	15,37	13,38	13,0	13,62	11,4
21	1260	12,5	2	0,2	450	A1	0	1	11,91	7,05	40,8	7,26	39,0

Casos 1 a 9 ver Ref. [3]

Casos 11 a 22 ver Ref. [2]

7 Conclusão

Juntas de sobreposição simples de aço foram estudadas alterando parâmetros geométricos e materiais. O efeito do tratamento superficial e da durabilidade também foi considerado. Segundo a análise feita e recorrendo à matriz ortogonal de Taguchi e posterior análise de variância, o comprimento de sobreposição, a espessura do substrato e a espessura do adesivo são as variáveis que têm maior contribuição na força de rotura. A tensão de cedência do substrato e a taxa crítica de libertação de energia apresentam uma contribuição reduzida. Como seria de esperar, a velocidade de ensaio apresenta uma contribuição quase nula uma vez que os adesivos em questão estão a ser usados a uma temperatura muito distante da temperatura de transição vítrea. Os resultados foram tratados e uma regressão linear foi determinada de modo a obter uma previsão da força de rotura. As conclusões que podem ser tiradas para as condições aqui estudadas são as seguintes:

1. A resistência ao corte da junta aumenta com a tensão de cedência do substrato;
2. A resistência ao corte da junta aumenta com o comprimento de sobreposição;
3. A resistência ao corte da junta aumenta com a espessura do substrato;
4. A resistência ao corte da junta diminuiu com a espessura do adesivo;
5. A resistência ao corte da junta aumenta com a taxa crítica de libertação de energia, atingindo um pico para 500 N/m e diminuindo depois até 2900 N/m;
6. A resistência ao corte da junta é praticamente insensível ao tratamento superficial;
7. A resistência ao corte da junta é praticamente insensível ao envelhecimento;
8. O efeito da velocidade do ensaio é desprezável;
9. A interacção entre a tensão de cedência do substrato e o comprimento de sobreposição não é significativa;
10. O método Taguchi é uma técnica válida para a previsão da resistência ao corte de juntas adesivas.

Bibliografia

- [1] **da Silva, Lucas F. M.; Magalhães, António G.; Moura, Marcelo F. S. F.**, “Juntas Adesivas Estruturais”, Publindústria, Porto, 2007
- [2] **da Silva, Lucas F. M.; Critchlow, G. W.; Figueiredo, M. A. V.**, “ Parametric Study of Adhesively Bonded Single Lap Joints by the Taguchi Method”, Journal of Adhesion Science Technology, in press, 2008
- [3] **da Silva, Lucas F. M.; Ramos, J. E.; Figueiredo, M. V.; Strohaecher, T. R.**, “Influence of the Adhesive, the Adherend and the Overlap on the Single Lap Shear Strength”, Journal of Adhesion and Interface, Vol.7, No.4, 2006
- [4] **Couvrat, P.**, “Le Collage Strutural Moderne: théorie et pratique”, Tec&Doc - Lavoisier, Paris, 1992
- [5] **Monteiro, D. F.**, “Análise do Comportamento à Fractura de Juntas de Aço Efectuadas com Adesivos Estruturais”, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1995
- [6] **Gonçalves, J. P. M.**, “Contribuição para a Análise Numérica e Experimental do Comportamento de Juntas de Sobreposição Simples”, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2000
- [7] **Petrie, Edward M.**, “Handbook of Adhesives and Sealants”, McGraw Hill, New York, 2007
- [8] **Lees, W. A.**, “Adhesives in Engineering Design”, The Design Council, London, 1984
- [9] **Burchardt, Bernd**, “Elastic Bonding”, Landsberg: Verlag Modern Industrie, 1998
- [10] **Adams, R. D.**, “Adhesive Bonding: science, technology and applications”, Boca Raton: CRC, 2005
- [11] **Teixeira, L. M. B. S.**, “Caracterização do comportamento mecânico de juntas de sobreposição simples coladas com Adesivos Estruturais”, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2000
- [12] **Kinloch, A. J.**, “Adhesion and Adhesives: science and technology”, Chapman and Hall, London, 1990

[13] **da Silva, Lucas F. M.; Rodrigues, T. N. S. S.; Figueiredo, M. A. V.; de Moura, M. F. S. F.; Chousal, J. A. G.**, “Effect of Adhesive Type and Thickness on the Lap Shear Strength”, *The Journal of Adhesion*, 82:1091-1115, 2006

[14] **Montgomery, Douglas C.**, “Design and Analysis of experiments”, John Wiley & Sons Inc, New York, 2001

[15] **Figueiredo, Miguel A. V.; Fernandes, António A.**, “O Método de Taguchi no Planeamento e Análise de Operações de Soldadura”, *Ingenium – Revista ordem dos Engenheiros*, 11:79-85, 1996

[16] **Melo e Castro, Paula M.**, “Taguchi’s Method: Quality Control with a Non-Conventional use of Design Of Experiments (DOE)”, Instituto Português de Administração de Marketing (IPAM) – Lisboa

[17] **Ross, Philip J.**, “Taguchi Techniques for Quality Engineering – loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design”, McGraw-Hill, New York, 1996

[18] **da Silva, Lucas F. M.; Lopes, Maria João C. Q.**, “Joint strength optimization by the mixed adhesive technique”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, submitted (2008)

[19] **Tomczyk, A. J.**, “MTS Adhesives Project 2: Report No. 5: Test Methods for Adhesive Fracture Properties”, AEA Technology, Harwell, 1997

[20] **Guimarães, Rui C.; Cabral, José A. S.**, “Estatística”, McGraw-Hill, Lisboa, 1997

[21] **Adams, R. D.; Comyn, J.; Wake, W. C.**, “Structural adhesive joints in engineering”, 2nd ed, Chapman & Hall, London, 1997

[22] **Giannis, Stefanos**, “The Mechanical and Physical Behaviour of Aircraft Fuel Tank Sealants”, PhD Thesis, University of Bristol, 2005

Apêndice I – Gráficos obtidos no ensaio DCB

São apresentados a seguir para cada adesivo as curvas força vs deslocamento no ensaio DCB.

- Araldite® AV 138M com endurecedor HV 998

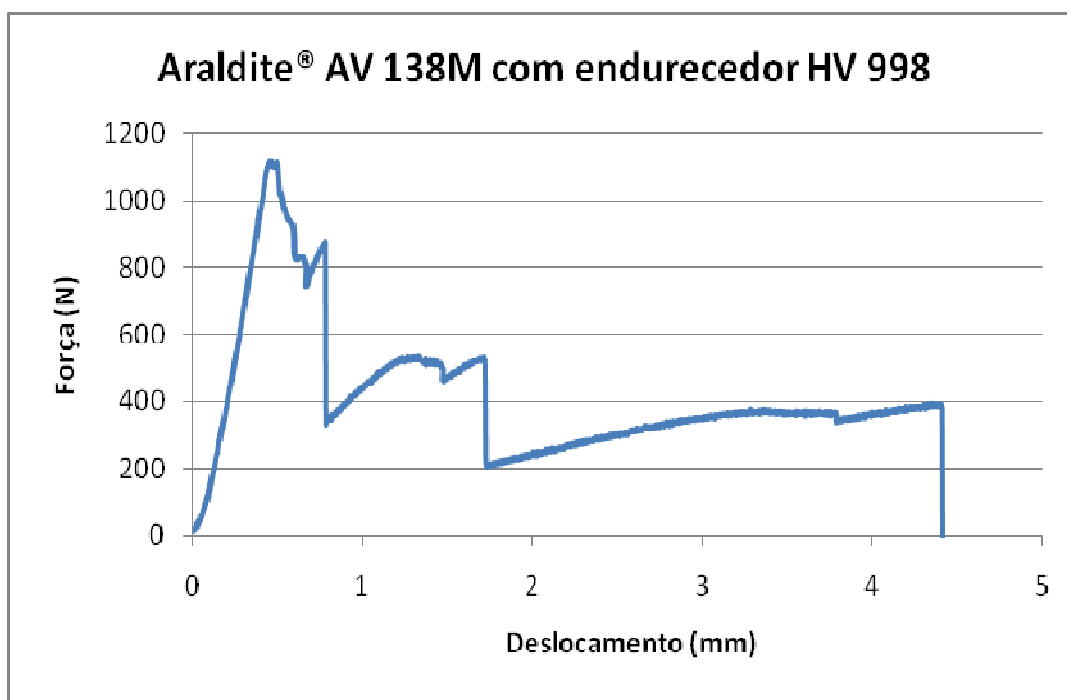


Figura 70 – Gráfico força/deslocamento da Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV 138M é um adesivo frágil que a fenda se propaga muito rapidamente (ver Figura 70), daí o gráfico apresentar poucos patamares de súbita descida da força (propagação da fenda).

- Araldite® 2015

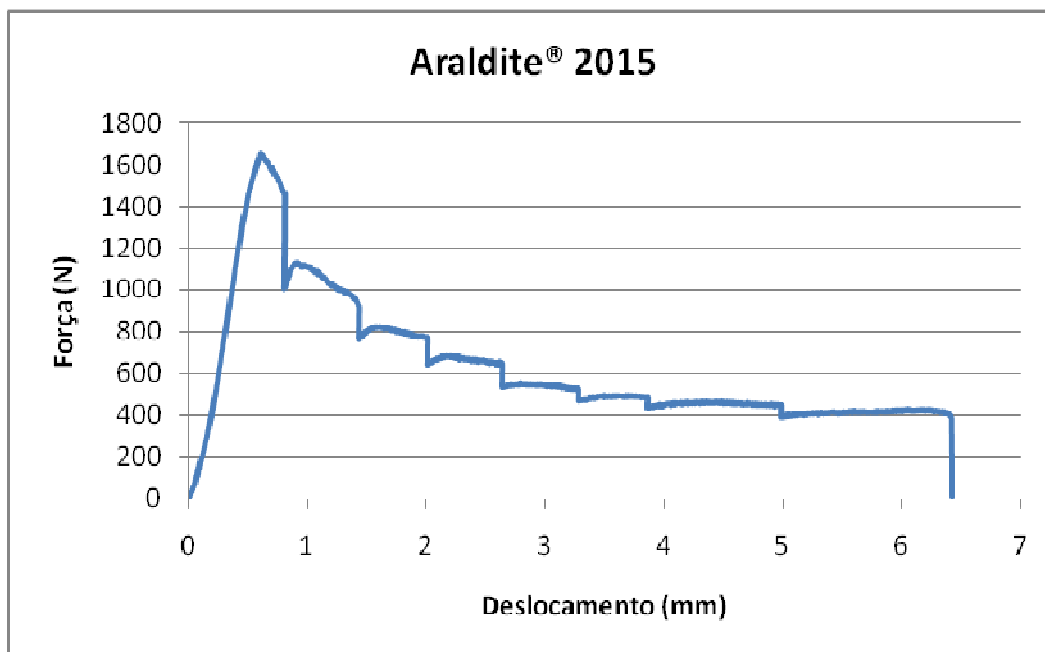


Figura 71 – Gráfico força/deslocamento da Araldite® 2015

A Figura 71 ilustra o gráfico força/deslocamento de um adesivo intermédio. A propagação da fenda é mais lenta, daí o gráfico apresentar vários patamares de descida da força sendo esta descida pequena comparativamente com o adesivo frágil. A força máxima deste adesivo, quando se inicia a propagação da fenda, é maior neste adesivo comparativamente com o adesivo frágil.

- Sikaflex-255 FX

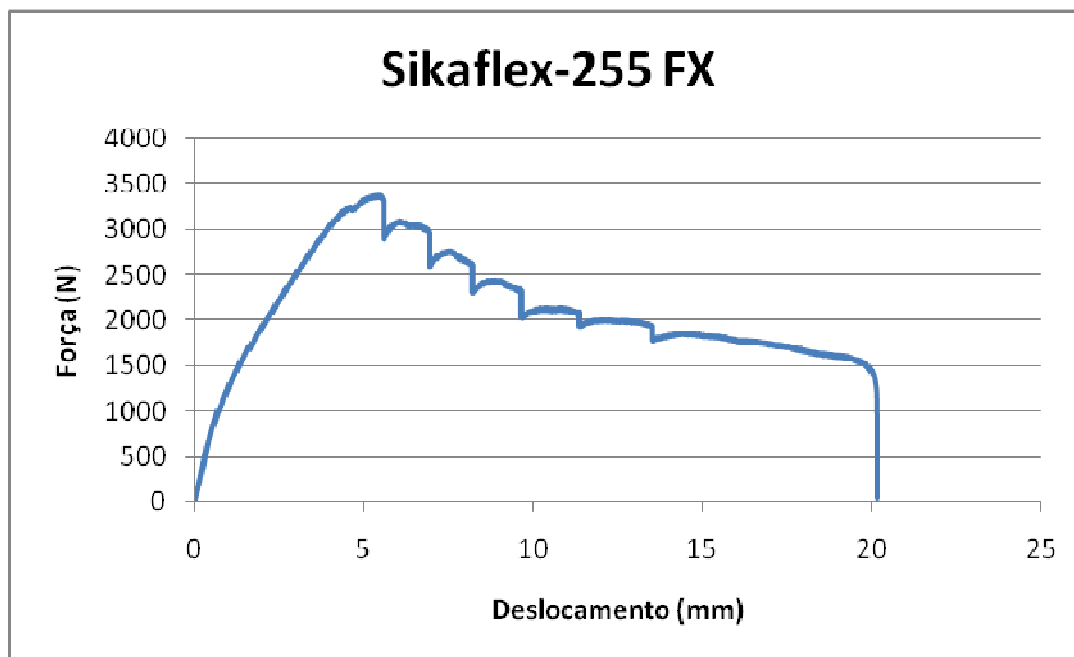


Figura 72 – Gráfico força/deslocamento do Sikaflex-255 FX

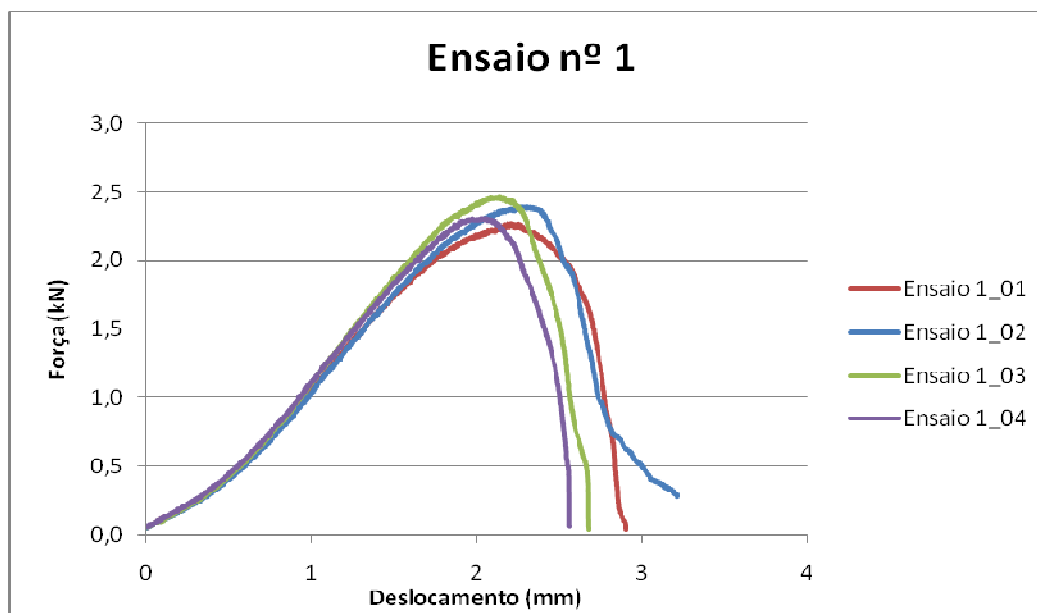
O adesivo Sikaflex-255 FX é um adesivo dúctil, apresenta um elevado deslocamento e a força máxima é a mais elevada, comparativamente com os adesivos frágil e intermédio (ver Figura 72). A propagação da fenda é muito mais lenta, devido a se tratar de um adesivo com uma grande elasticidade.

Apêndice II – Gráficos obtidos no ensaio de tracção das juntas de sobreposição simples

Os gráficos seguidamente apresentados são referentes a cada um dos ensaios experimentais e respectiva rotura.

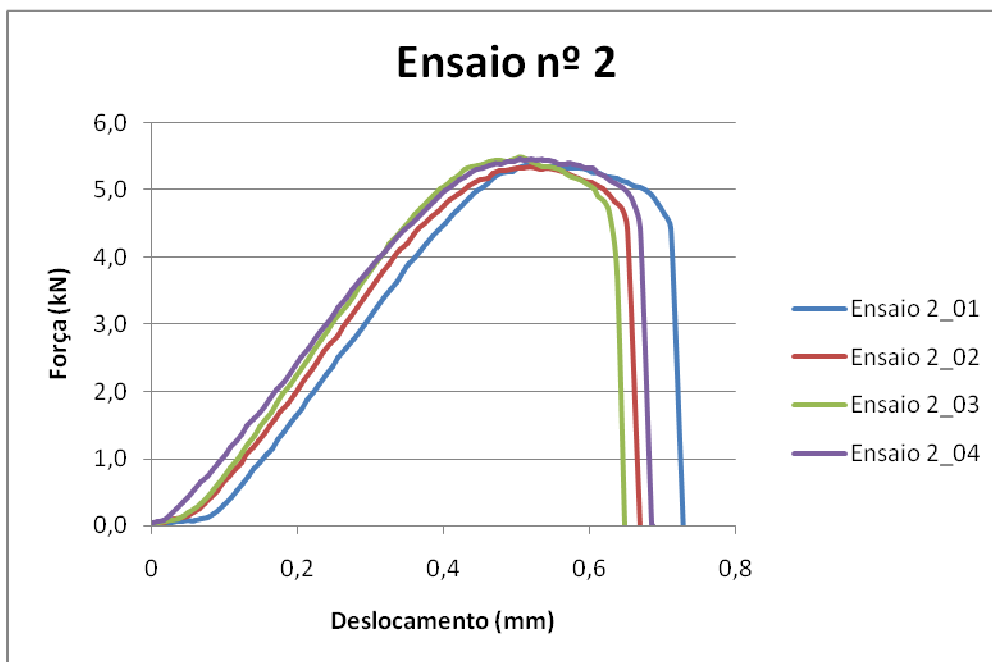
- Ensaio nº 1

Ensaio nº.	σ_{ys} [MPa]	l [mm]	t_s [mm]	t_a [mm]	G_{Ic} [N/m]	S_T [-]	A [sem.]	V_e [mm/min.]
1	184	12,5	1	0,5	2902	P	0	1



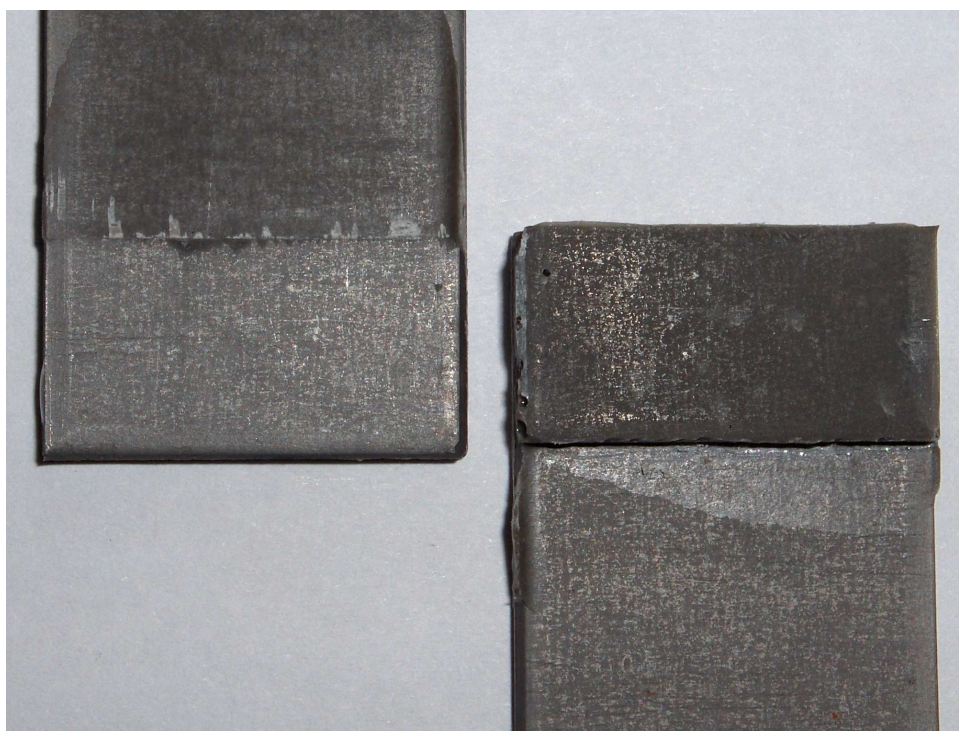
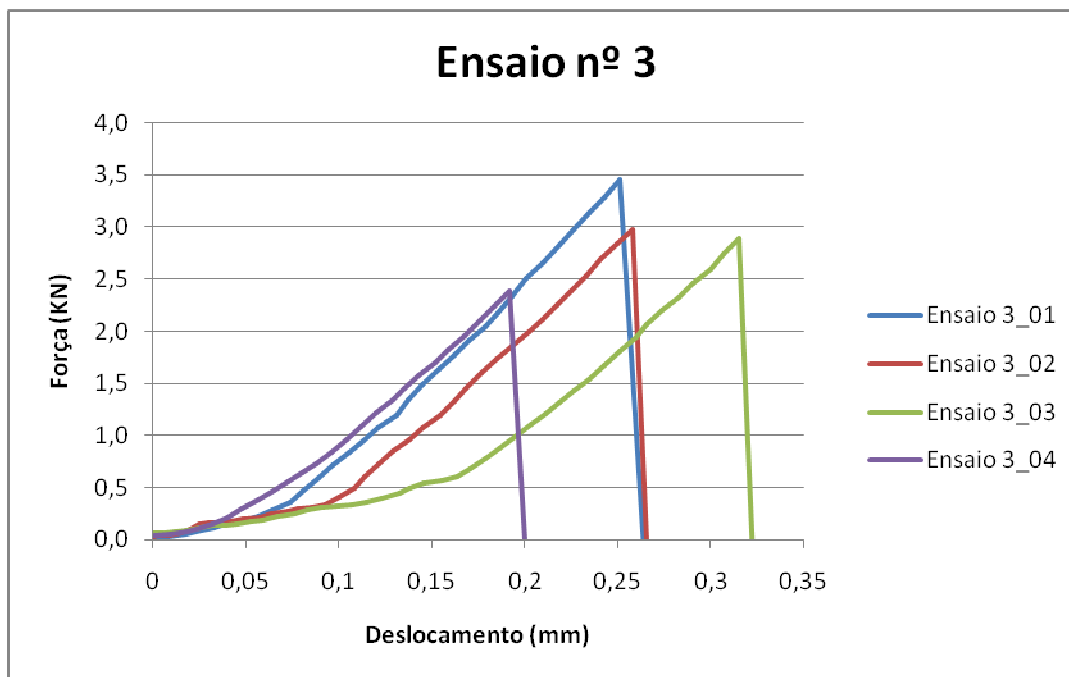
- Ensaio nº 2

Ensaio nº.	σ_{ys} [MPa]	l [mm]	t_s [mm]	t_a [mm]	G_{Ic} [N/m]	S_T [-]	A [sem.]	V_e [mm/min.]
1	184	12,5	2	1	526	A1	1	10



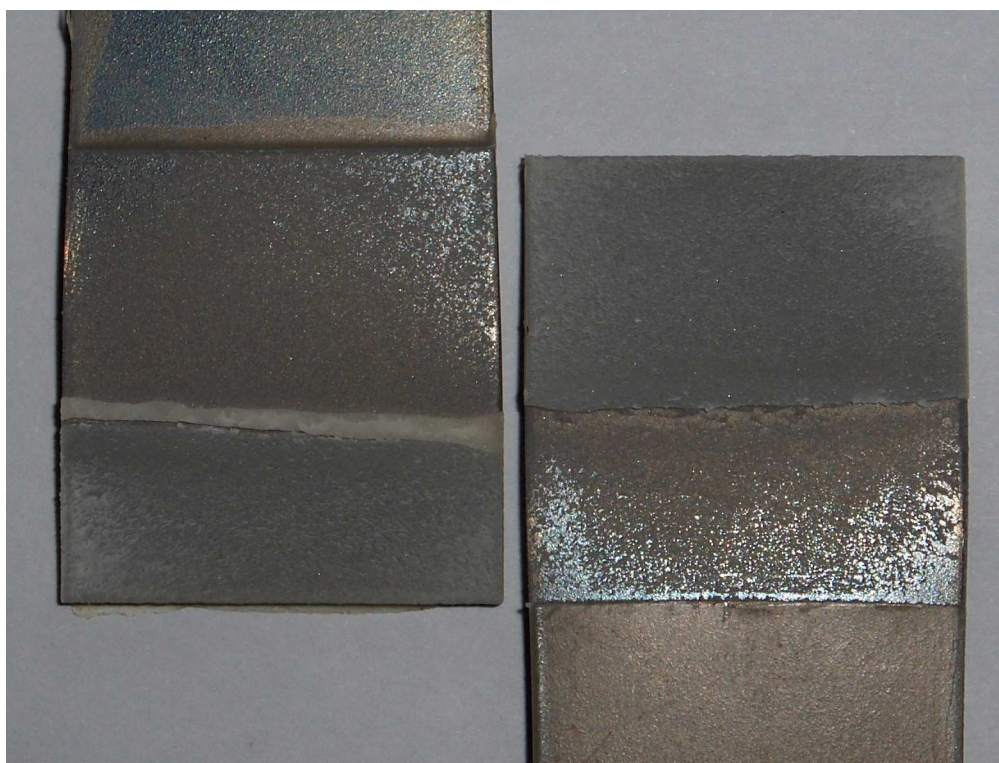
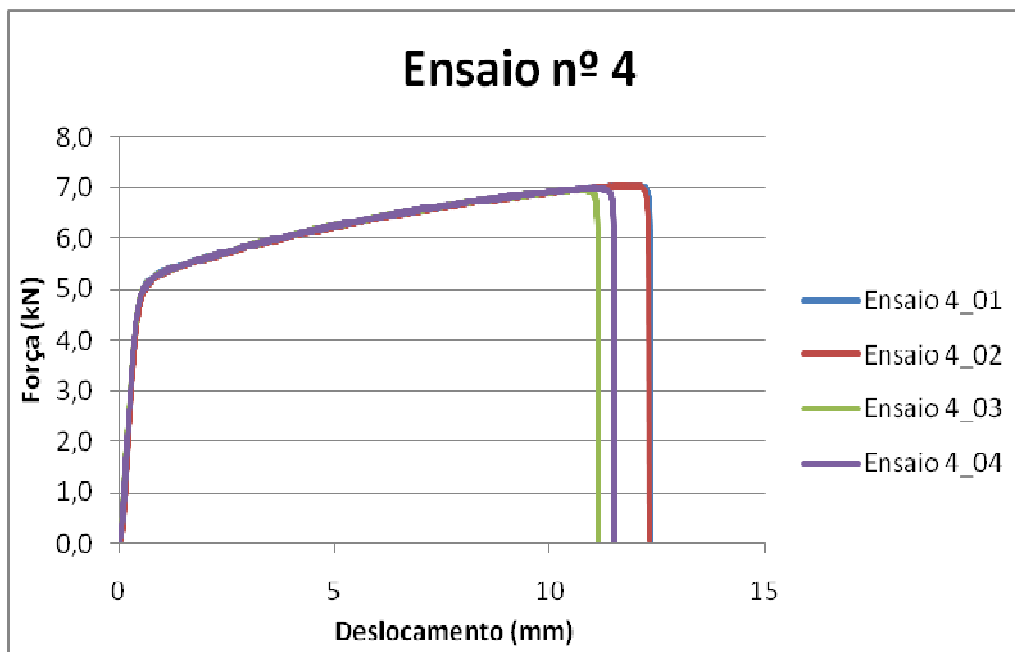
- Ensaio nº 3

Ensaio nº.	σ_{ys} [MPa]	l [mm]	t_s [mm]	t_a [mm]	G_{Ic} [N/m]	S_T [-]	A [sem.]	V_e [mm/min.]
1	184	12,5	3	2	346	A2	4	100



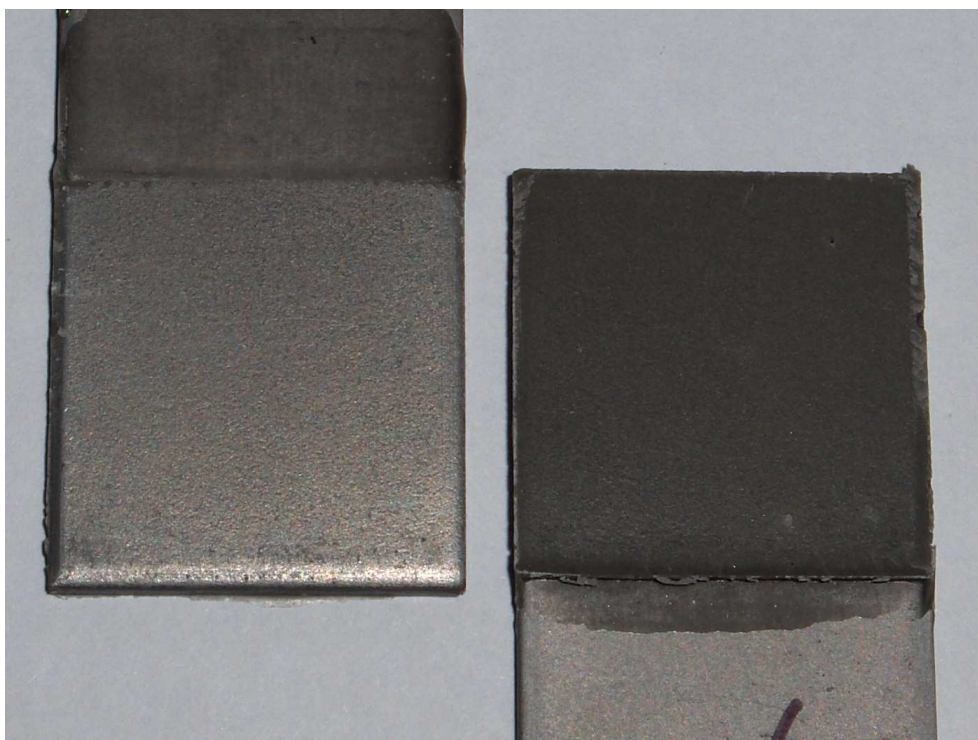
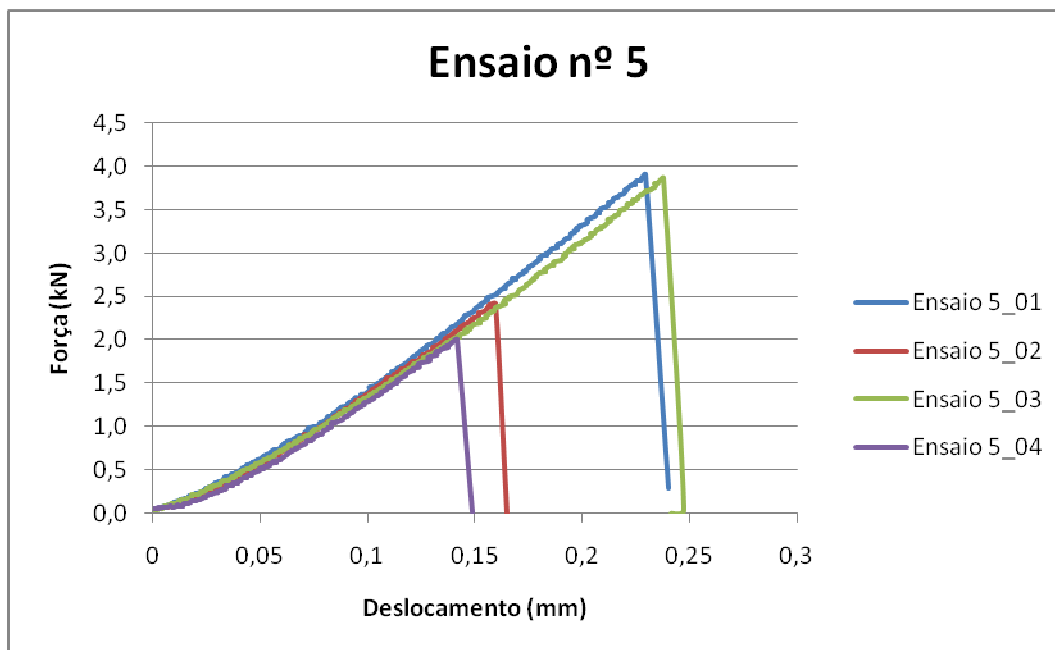
- Ensaio nº 4

Ensaio nº.	σ_{ys} [MPa]	l [mm]	t_s [mm]	t_a [mm]	G_{Ic} [N/m]	S_T [-]	A [sem.]	V_e [mm/min.]
4	184	25	1	0,5	526	A1	4	100



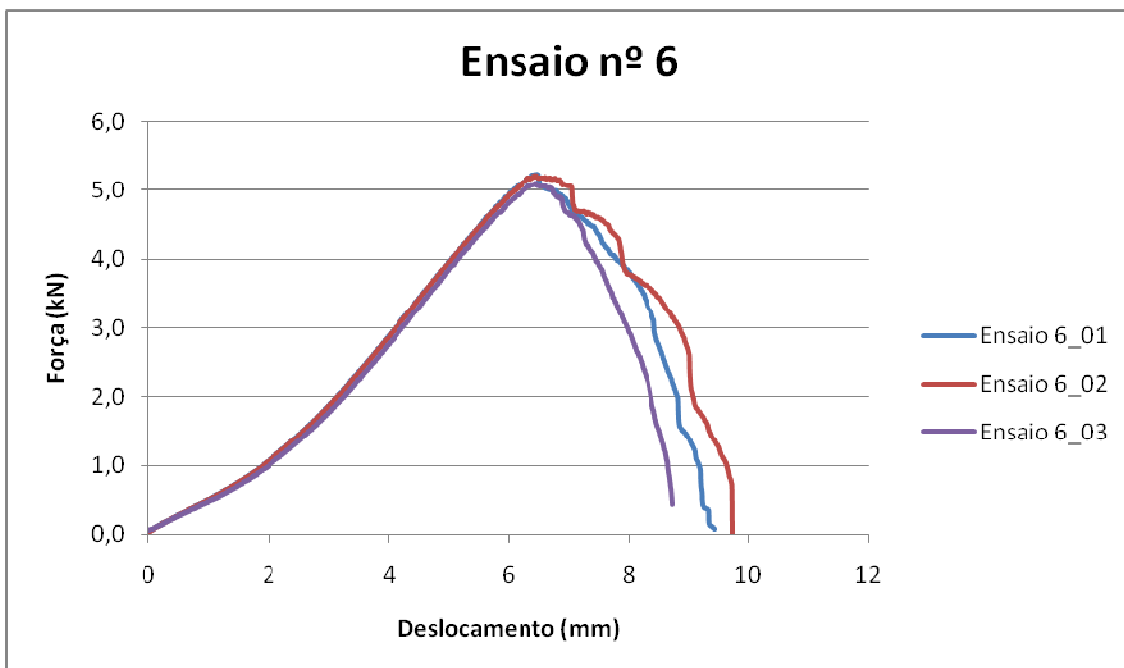
- Ensaio nº 5

Ensaio nº.	σ_{ys} [MPa]	l [mm]	t_s [mm]	t_a [mm]	G_{Ic} [N/m]	S_T [-]	A [sem.]	V_e [mm/min.]
5	184	25	2	1	346	A2	0	1



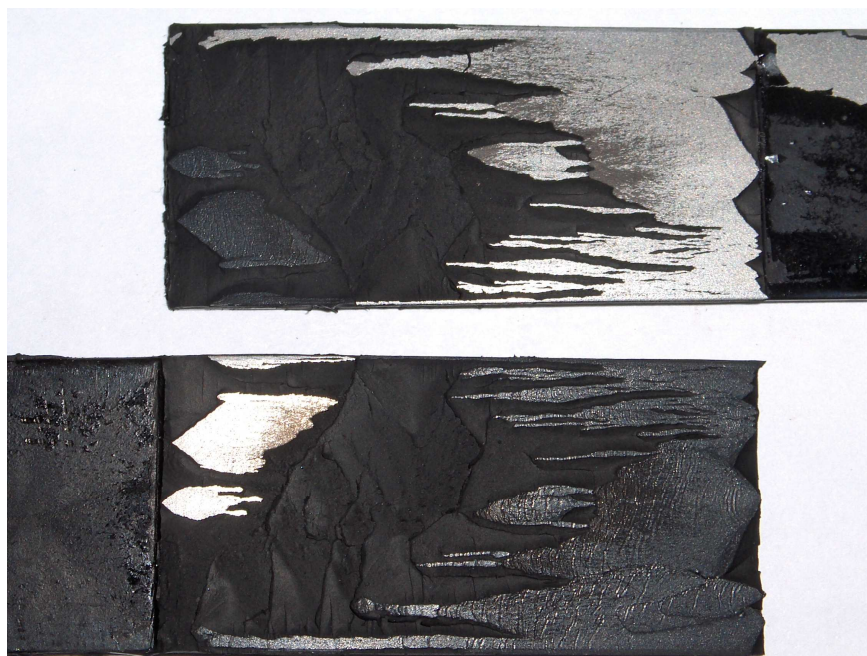
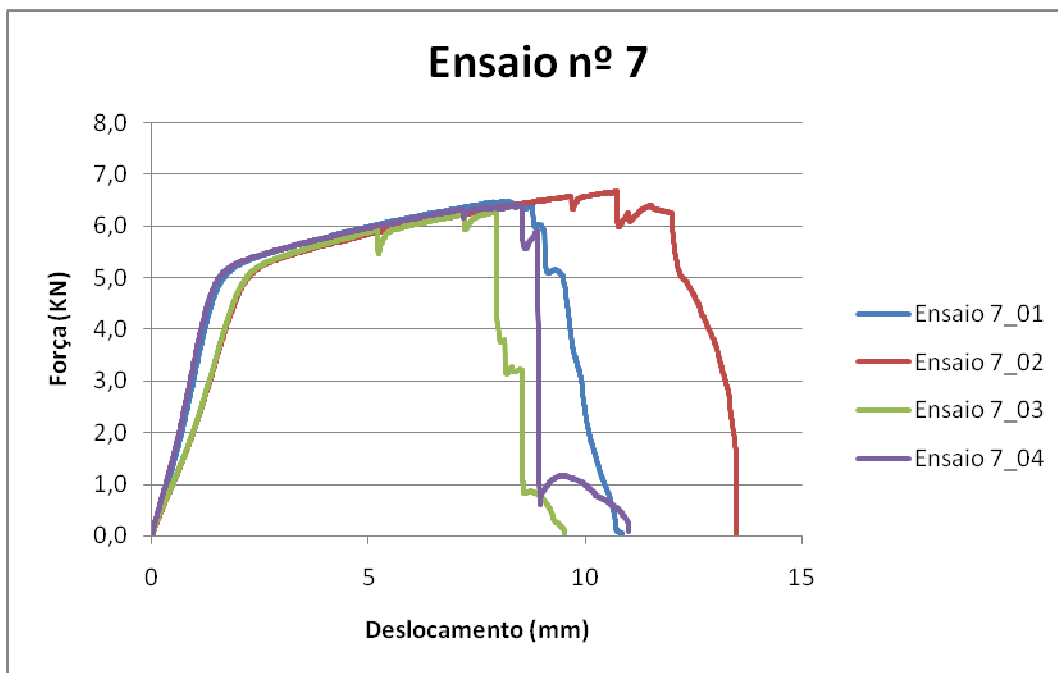
- Ensaio nº 6

Ensaio nº.	σ_{ys} [MPa]	l [mm]	t_s [mm]	t_a [mm]	G_{Ic} [N/m]	S_T [-]	A [sem.]	V_e [mm/min.]
6	184	25	3	2	2902	P	1	10



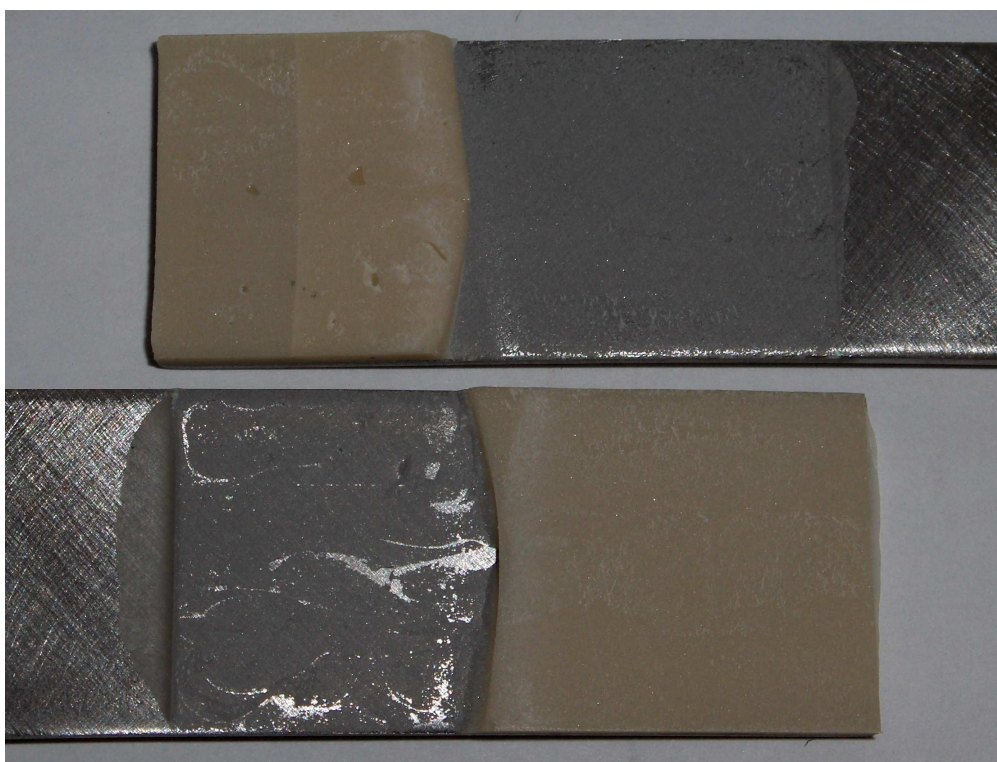
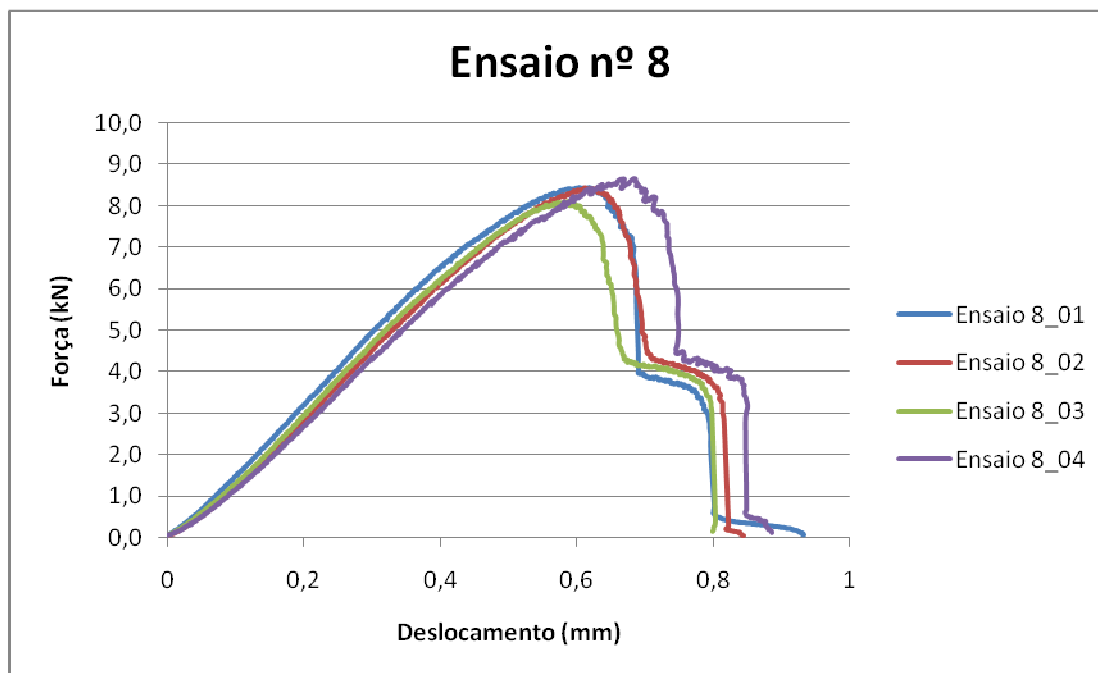
- Ensaio nº 7

Ensaio nº.	σ_{ys} [MPa]	l [mm]	t_s [mm]	t_a [mm]	G_{Ic} [N/m]	S_T [-]	A [sem.]	V_e [mm/min.]
7	184	50	1	1	2902	A2	1	100



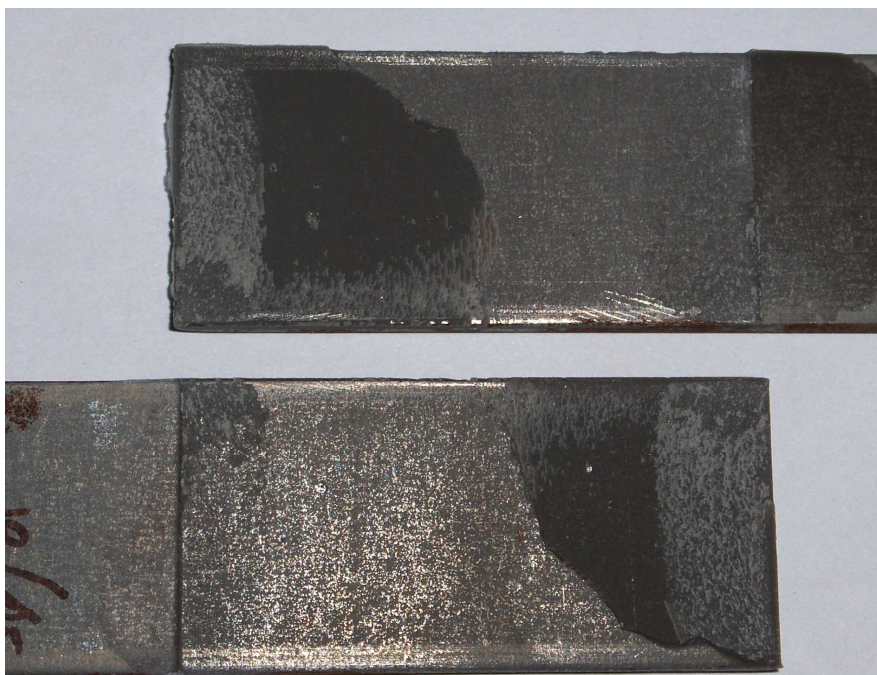
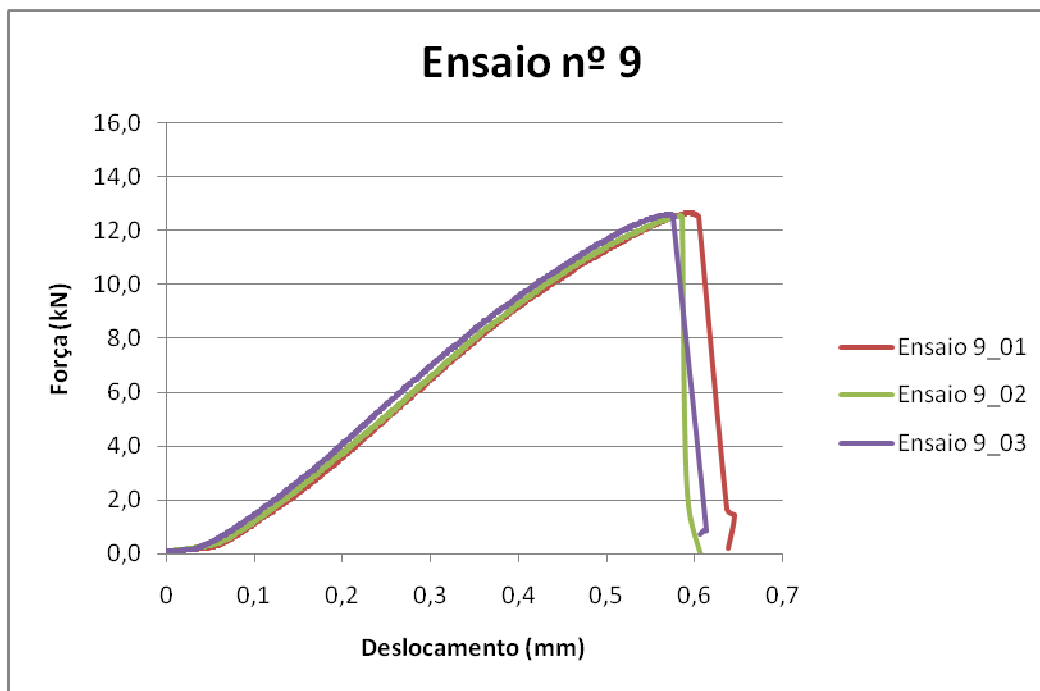
- Ensaio nº 8

Ensaio nº.	σ_{ys} [MPa]	l [mm]	t_s [mm]	t_a [mm]	G_{Ic} [N/m]	S_T [-]	A [sem.]	V_e [mm/min.]
8	184	50	2	2	526	P	4	1



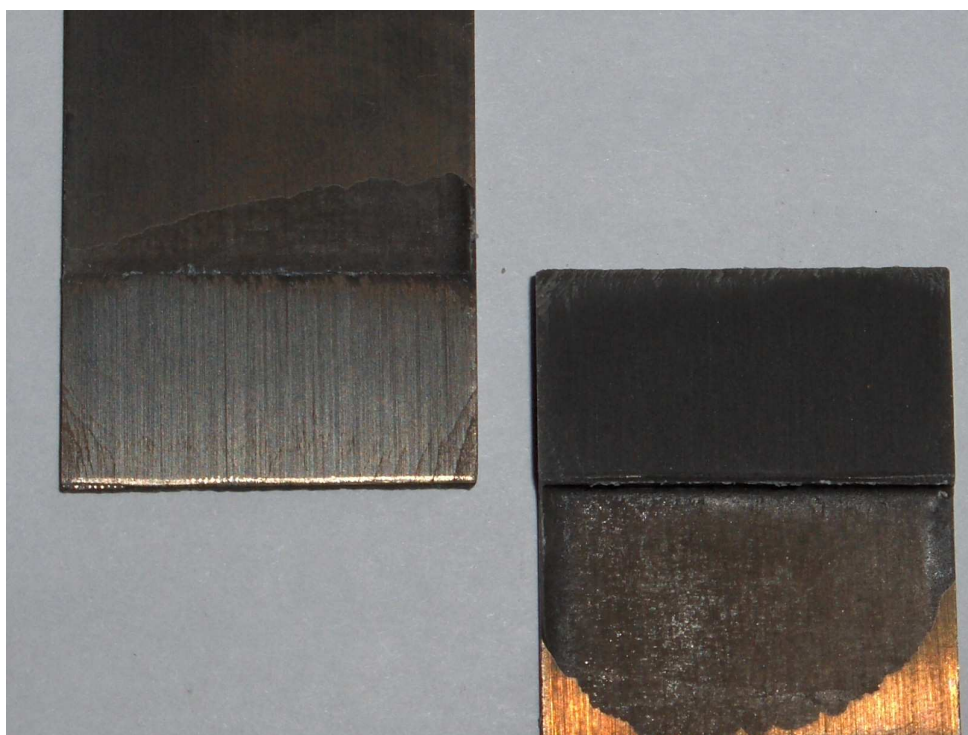
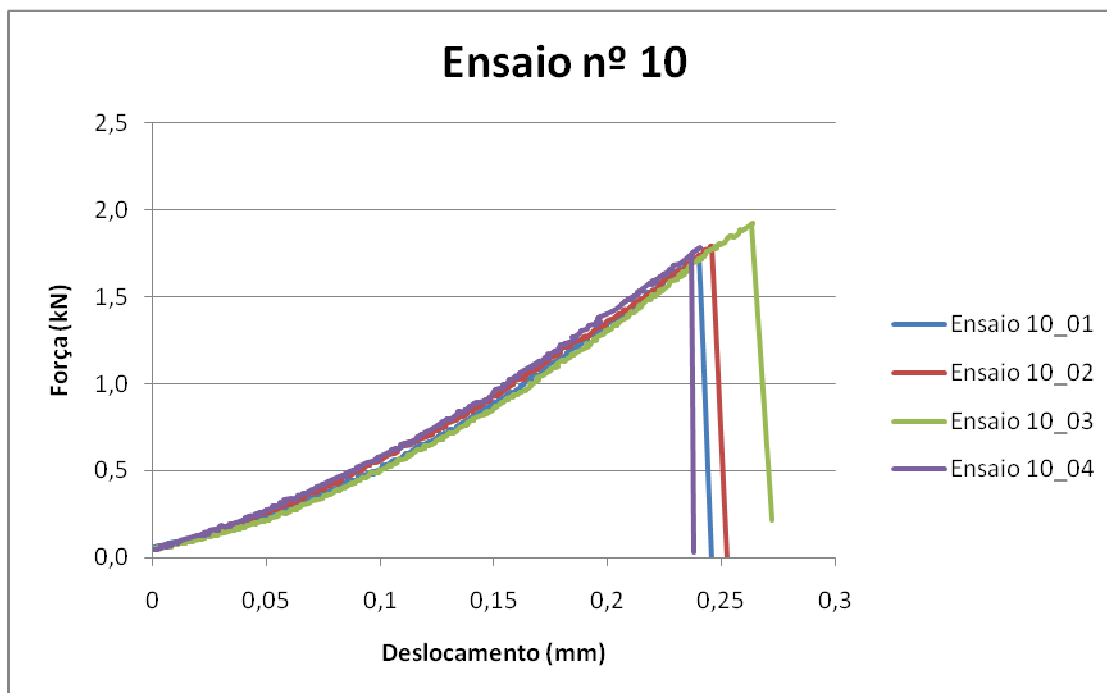
- Ensaio nº 9

Ensaio nº.	σ_{ys} [MPa]	l [mm]	t_s [mm]	t_a [mm]	G_{Ic} [N/m]	S_T [-]	A [sem.]	V_e [mm/min.]
9	184	50	3	0,5	346	A1	0	10



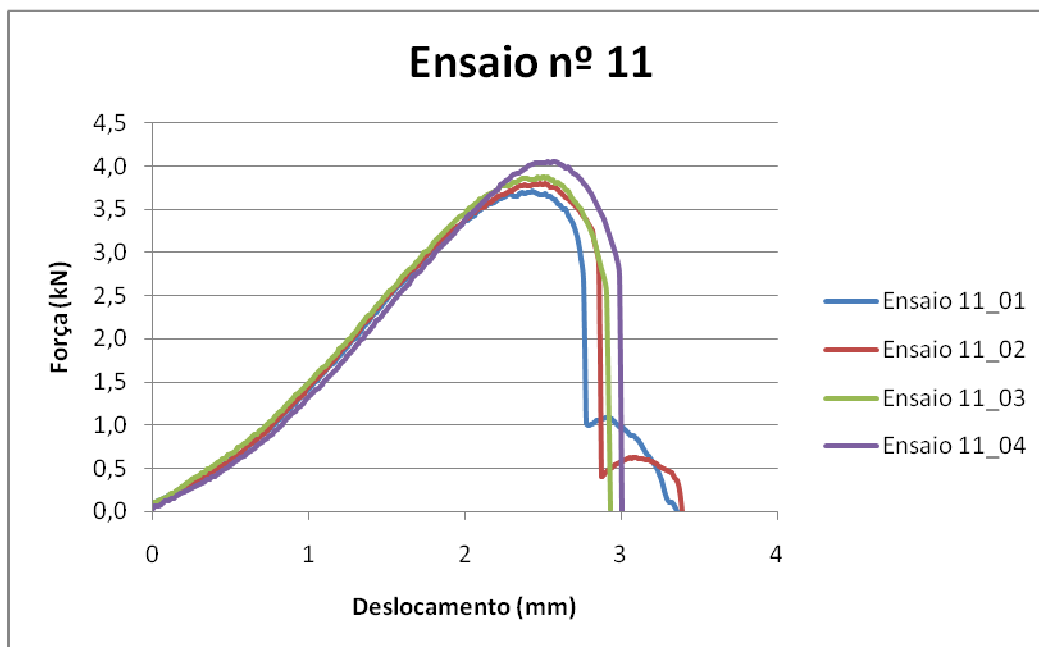
- Ensaio nº 10

Ensaio nº.	σ_{ys} [MPa]	l [mm]	t_s [mm]	t_a [mm]	G_{Ic} [N/m]	S_T [-]	A [sem.]	V_e [mm/min.]
10	1260	12,5	1	2	346	A1	1	1



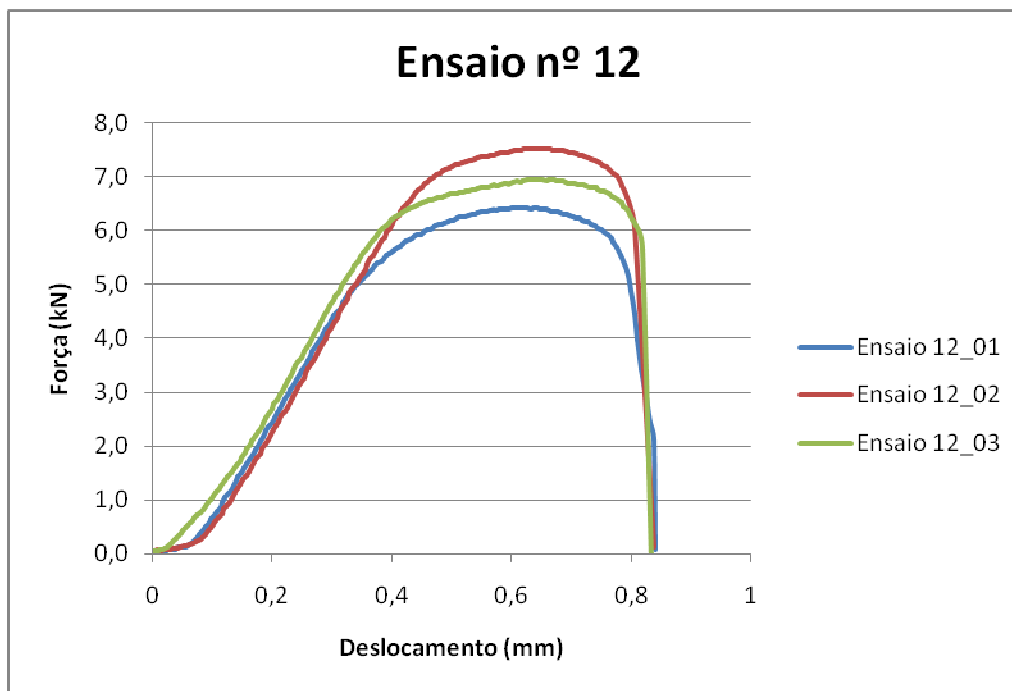
- Ensaio nº 11

Ensaio nº.	σ_{ys} [MPa]	l [mm]	t_s [mm]	t_a [mm]	G_{Ic} [N/m]	S_T [-]	A [sem.]	V_e [mm/min.]
11	1260	12,5	2	0,5	2902	A2	4	10



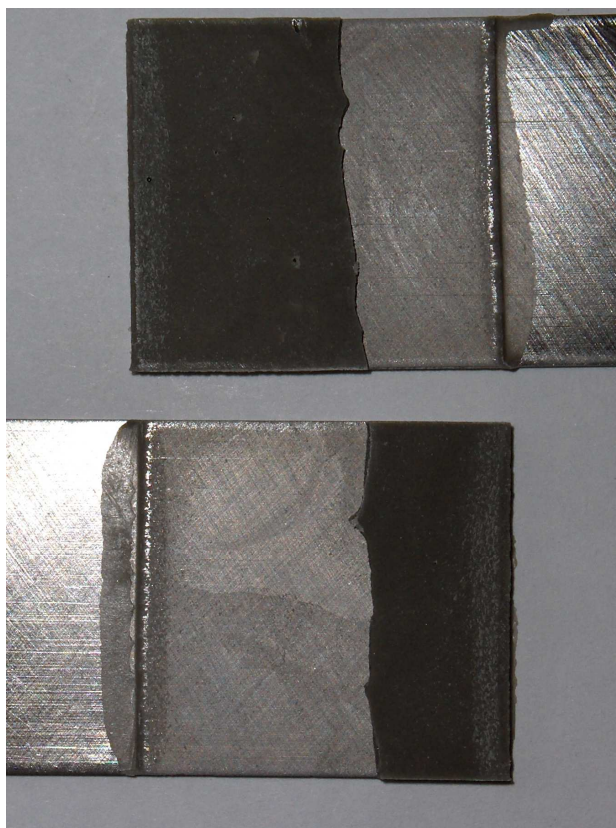
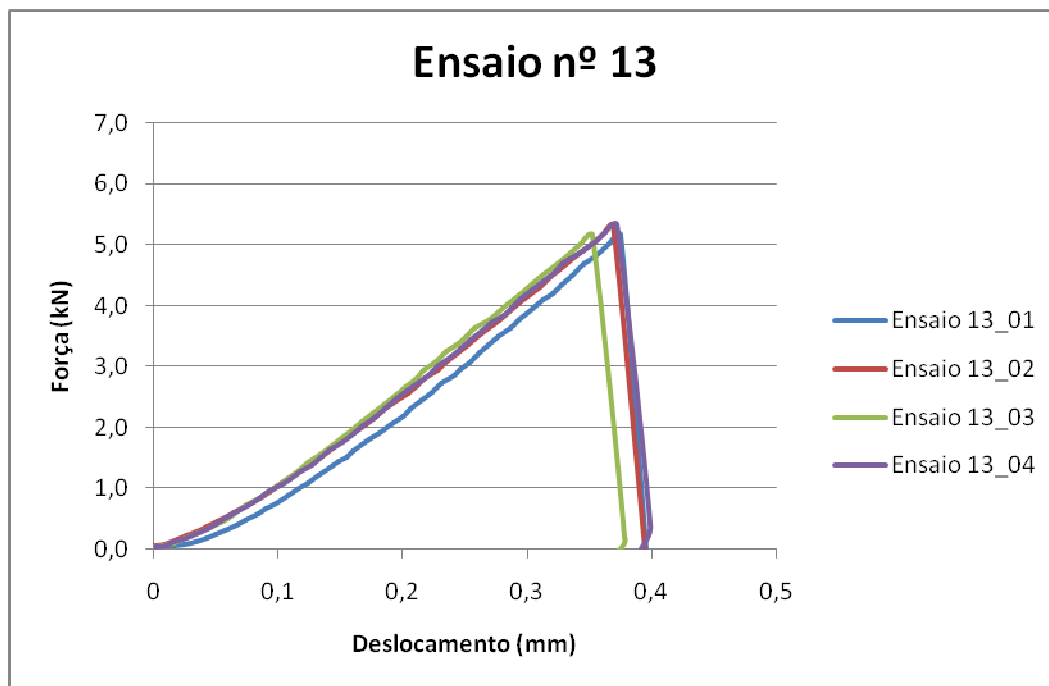
- Ensaio nº 12

Ensaio nº.	σ_{ys} [MPa]	l [mm]	t_s [mm]	t_a [mm]	G_{Ic} [N/m]	S_T [-]	A [sem.]	V_e [mm/min.]
12	1260	12,5	3	1	526	P	0	100



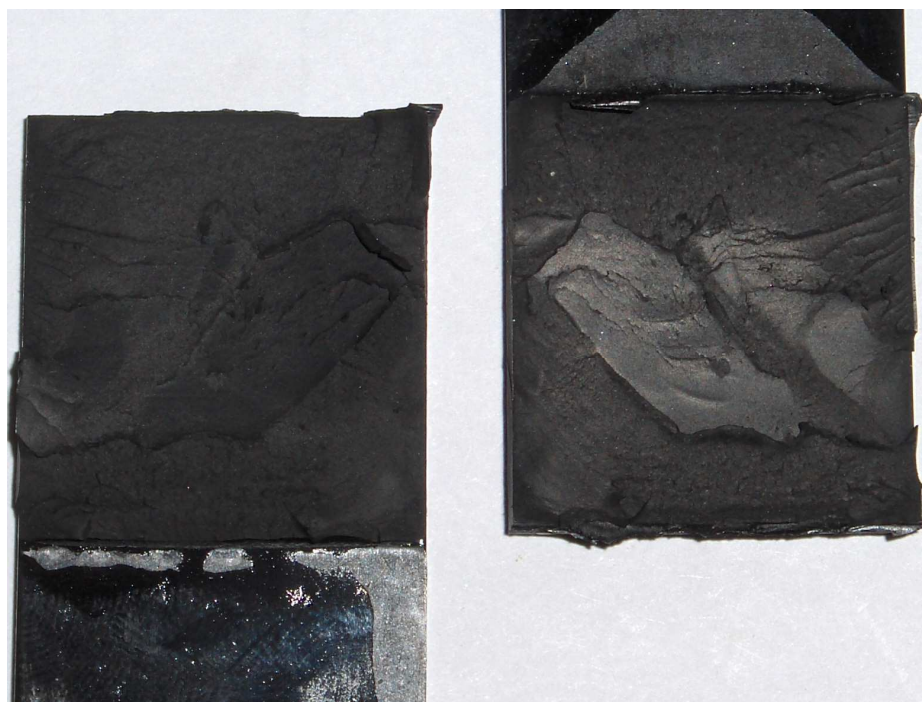
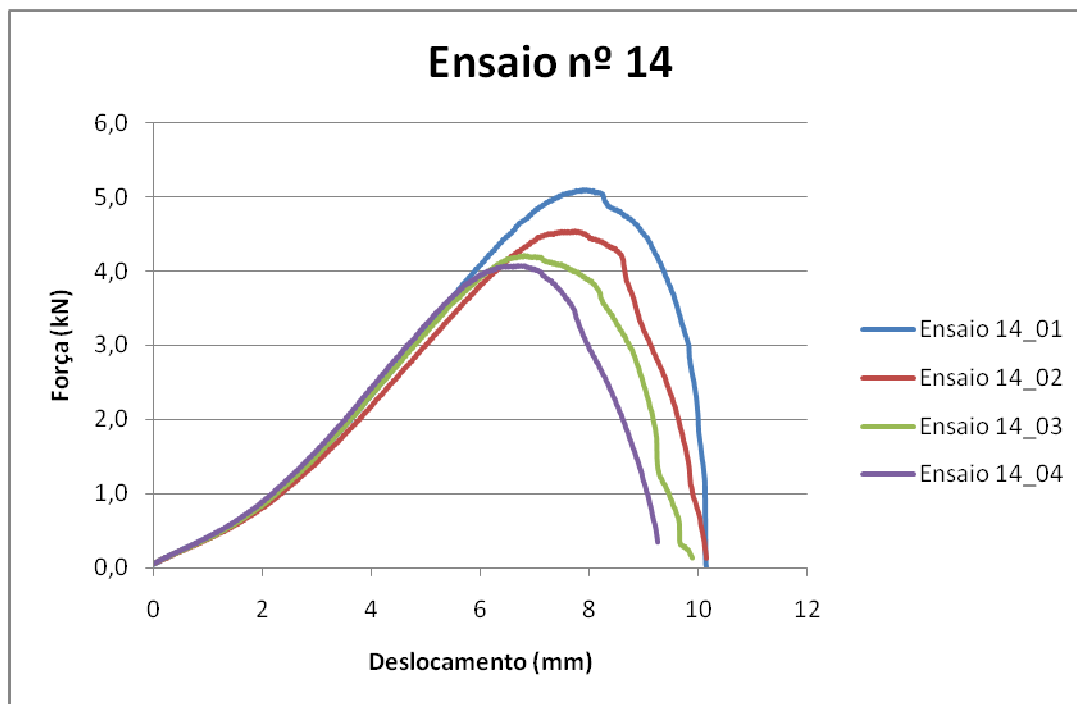
- Ensaio nº 13

Ensaio nº.	σ_{ys} [MPa]	l [mm]	t_s [mm]	t_a [mm]	G_{Ic} [N/m]	S_T [-]	A [sem.]	V_e [mm/min.]
13	1260	25	1	1	346	P	4	10



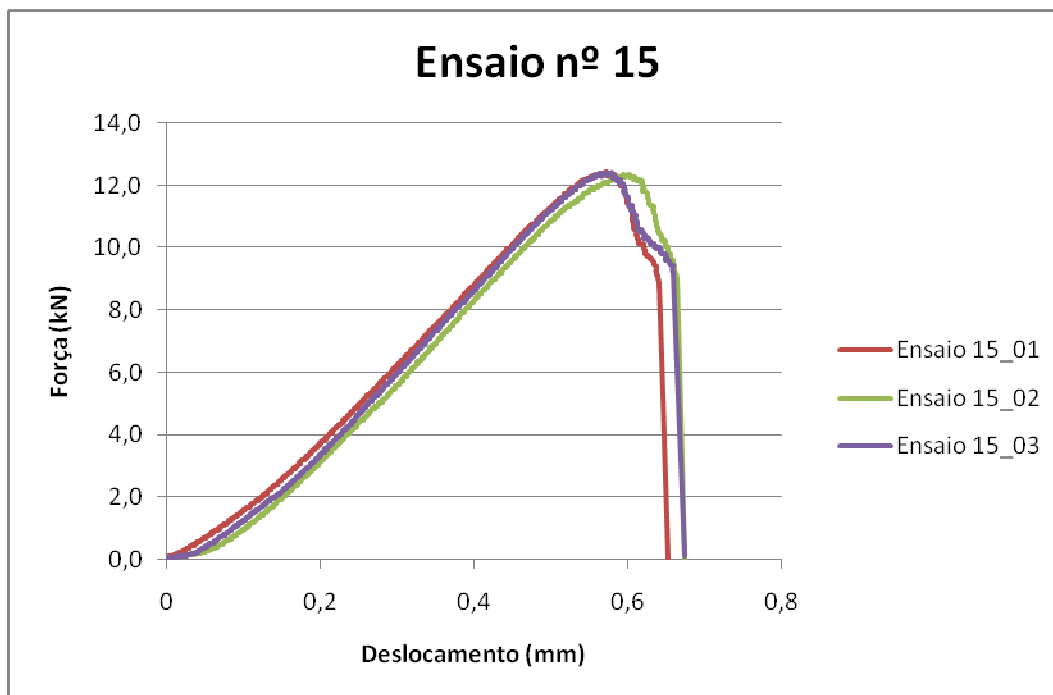
- Ensaio nº 14

Ensaio nº.	σ_{ys} [MPa]	l [mm]	t_s [mm]	t_a [mm]	G_{Ic} [N/m]	S_T [-]	A [sem.]	V_e [mm/min.]
14	1260	25	2	2	2902	A1	0	100



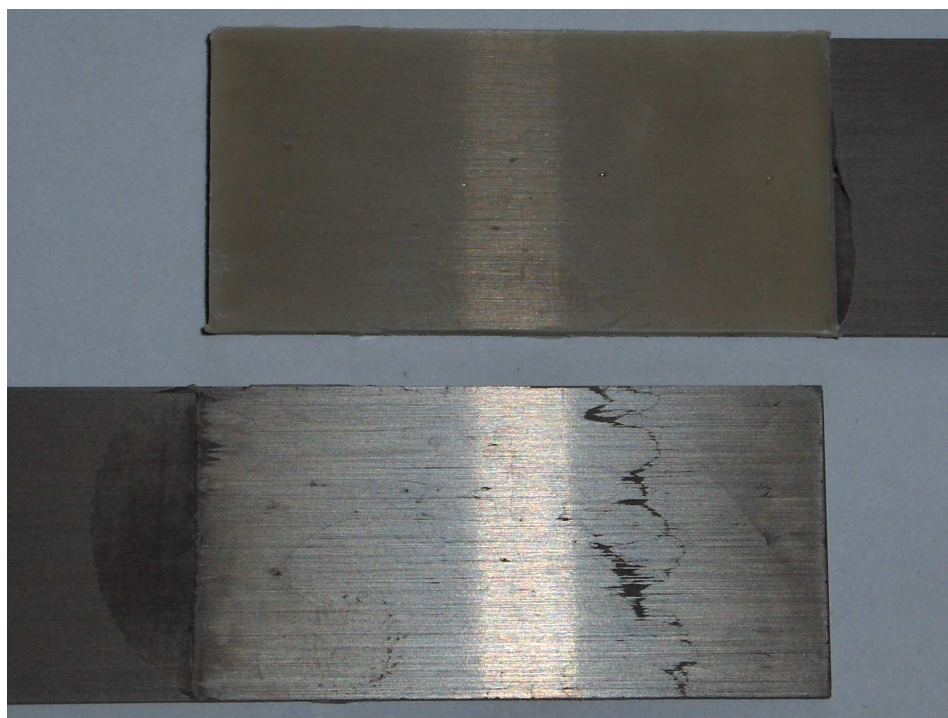
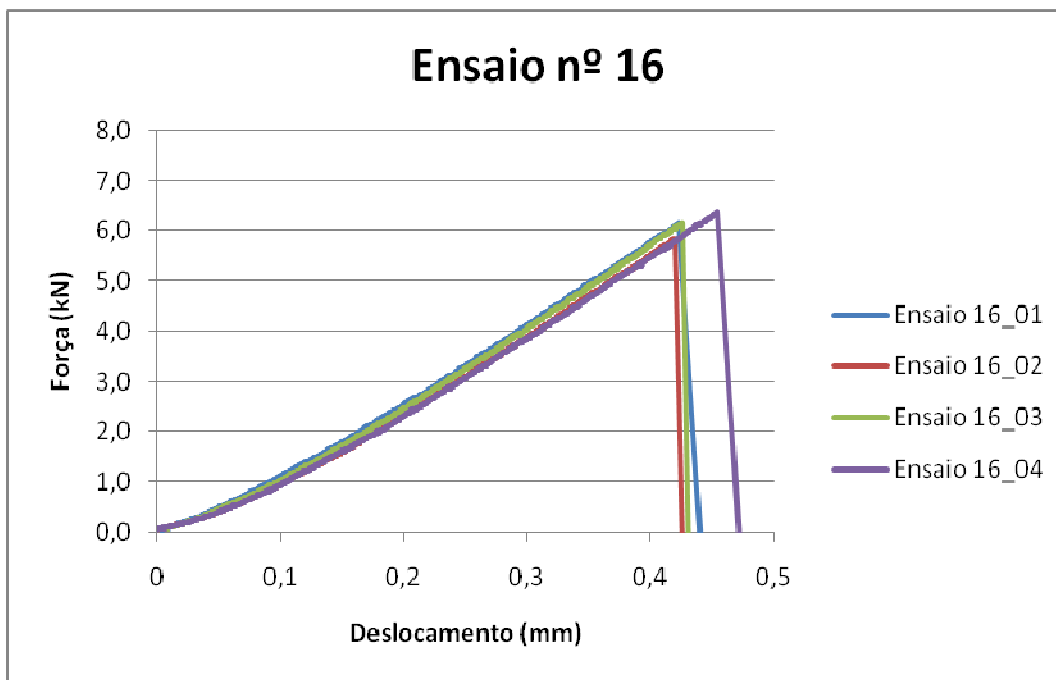
- Ensaio nº 15

Ensaio nº.	σ_{ys} [MPa]	l [mm]	t_s [mm]	t_a [mm]	G_{Ic} [N/m]	S_T [-]	A [sem.]	V_e [mm/min.]
15	1260	25	3	0,5	526	A2	1	1



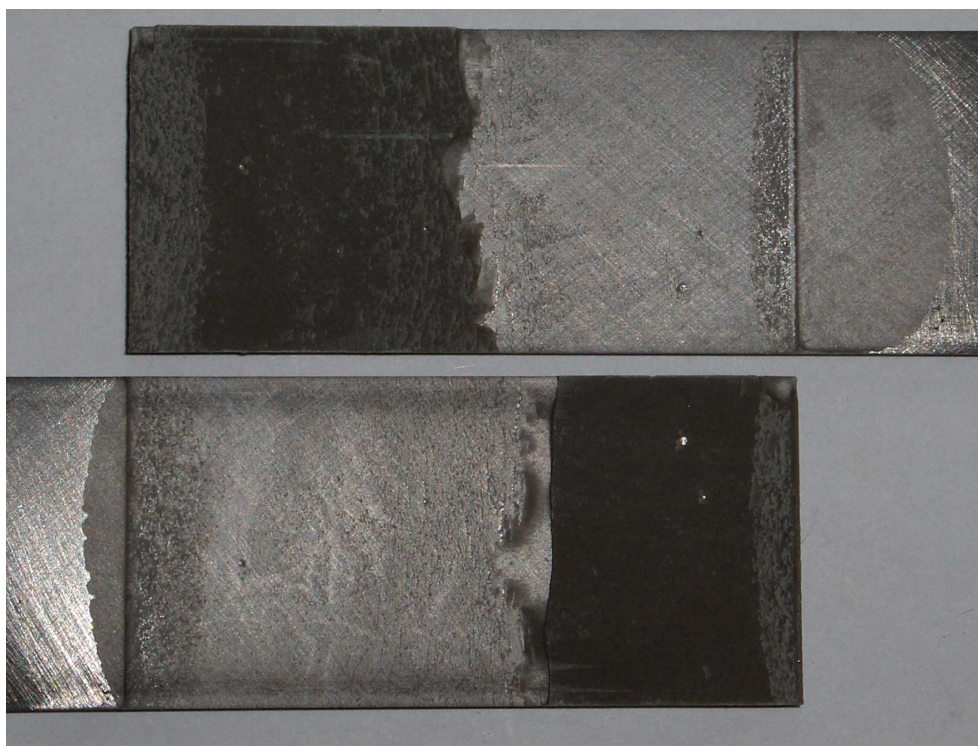
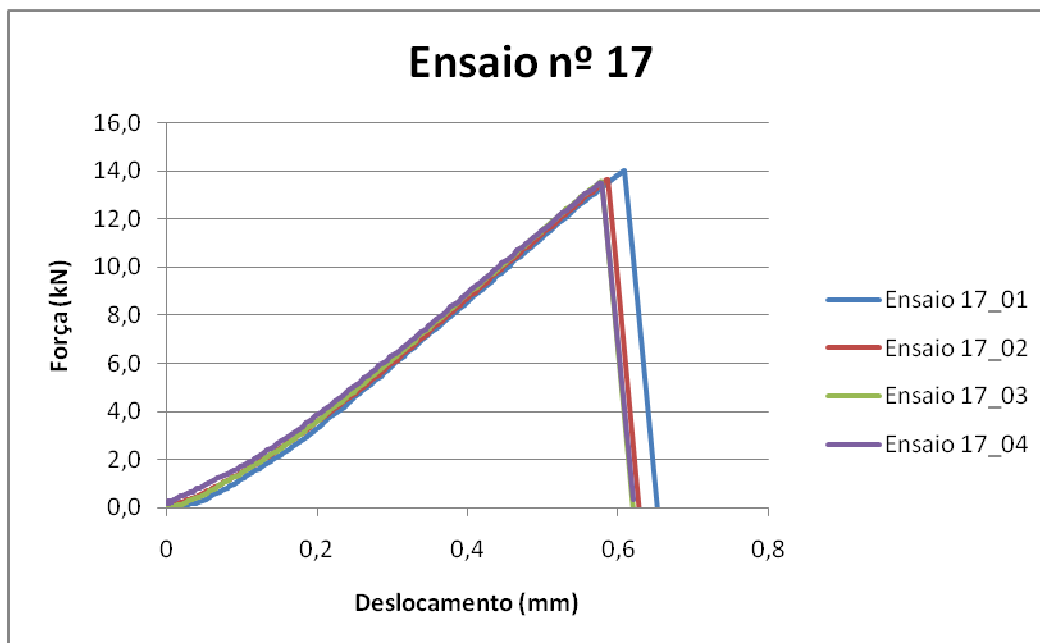
- Ensaio nº 16

Ensaio nº.	σ_{ys} [MPa]	l [mm]	t_s [mm]	t_a [mm]	G_{Ic} [N/m]	S_T [-]	A [sem.]	V_e [mm/min.]
16	1260	50	1	2	526	A2	0	10



- Ensaio nº 17

Ensaio nº.	σ_{ys} [MPa]	l [mm]	t_s [mm]	t_a [mm]	G_{Ic} [N/m]	S_T [-]	A [sem.]	V_e [mm/min.]
17	1260	50	2	0,5	346	P	1	100



- Ensaio nº 18

Ensaio nº.	σ_{ys} [MPa]	l [mm]	t_s [mm]	t_a [mm]	G_{Ic} [N/m]	S_T [-]	A [sem.]	V_e [mm/min.]
18	1260	50	3	1	2902	A1	4	1

