



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES COM CAMADA ADESIVA COMPOSITA

Ana Isabel Moreira Mota



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES COM CAMADA ADESIVA COMPÓSITA

Ana Isabel Moreira Mota

1080791

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor António Gonçalves Magalhães, Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP.

2013

Agradecimentos

Os meus agradecimentos vão para o meu Professor orientador Doutor António Gonçalves Magalhães por todo o apoio dado e disponibilidade prestada nas várias tarefas realizadas ao longo de todo o trabalho desenvolvido em laboratório, disponibilização de materiais, partilha de conhecimentos e prontidão na revisão da presente Dissertação.

À Eng.^a Fátima pelo apoio dado na realização de alguns ensaios no laboratório de Ensaios Mecânicos.

À minha mãe por todo o apoio e dedicação dada ao longo de toda a minha vida pessoal e académica. Sendo o principal pilar da minha vida, é a quem dedico esta dissertação e finalização de curso.

Ao meu amigo Eng.^o Bilumbo André, pelo apoio e conselhos dados, tendo sido um apoio fundamental neste caminho.

Ao meu colega de curso, Miguel Maia, pela ajuda e amizade dadas durante o meu percurso universitário.

A todos reitero o meu apreço e a minha eterna gratidão.

Palavras-chave

Adesivos estruturais, juntas de sobreposição simples, tecido, comportamento mecânico

Resumo

São conhecidos alguns trabalhos recentes que evidenciam a utilidade da investigação do efeito da modificação das propriedades dos adesivos no objetivo de influenciar as condições de iniciação do processo de rotura da zona de sobreposição e, conseqüentemente, do desempenho das juntas adesivas em condições de solicitação.

Este trabalho inicia no ISEP um programa em que se pretende avaliar o efeito da introdução de um tecido em fibra de vidro, com espessura muito reduzida, no comportamento de juntas adesivas de sobreposição simples sujeitas a tração. A resistência mecânica, a ductilidade e a morfologia da superfície de rotura foram estudadas com vista a identificar as potenciais variáveis a controlar para desenvolver futuramente juntas adesivas compósitas que permita um desempenho superior quando comparadas com juntas adesivas idênticas sem qualquer modificação.

Os resultados obtidos indicaram que o acabamento superficial afetou claramente os resultados e que o comportamento mecânico é influenciado pelo comprimento de sobreposição.

Keywords

Structural adhesives, simple lap joints, tissue, mechanical behavior

Abstract

There are known some recent studies which demonstrate the usefulness of investigating the effect of modifying the properties of adhesives in order to influence the conditions for starting the process of rupture on the overlapping area and hence the performance of the adhesive joints.

This work begins at ISEP a program that aims to assess the effect of introducing a glass fiber tissue with greatly reduced thickness on the behavior of single lap adhesive joints when they are subject to tensile. The mechanical strength, ductility and fracture surface morphology were studied in order to identify potential variables to control for developing in future composite adhesive joints that enable higher performance when compared with identical adhesive joints without any modification.

The results show that the finishing surface clearly affected the results and the mechanical behavior is influenced by the overlap length.

Lista de símbolos e abreviaturas

ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

FR – Força de rotura

F, P, V – Força aplicada

L_0 , L, l – Comprimento de sobreposição

c - Comprimento de sobreposição / 2

t – espessura do substrato

b – largura do substrato

t_a – espessura do adesivo

σ_L – Tensão de corte

M – Momento fletor

k - Fator de momento fletor

\bar{P} – Força aplicada por unidade de largura

ε – Deformação

D_b - Rigidez à flexão por unidade de largura dos substratos

ϕ - Ângulo de contacto

G – Módulo de corte

δ_y - Tensão de cedência ao corte

δ_r - Tensão de rotura ao corte

Y_r - Deformação de rotura de corte

J_{IIc} - Energia crítica em modo II

R_m – Carga de rotura

$R_{p0,2}$ – Limite elástico convencional a 0,2%

JSS – Juntas de sobreposição simples

Mín – Mínimo

Máx – Máximo

MEF – Método dos elementos finitos

Índice de figuras

Figura 1 – Tipos de juntas de sobreposição e qualificação da distribuição de tensão .	12
Figura 2 – Resistência de uma junta de sobreposição simples em função do comprimento de sobreposição	14
Figura 3 – Efeito do comprimento de sobreposição na força de rotura, para adesivos dúcteis e frágeis.....	14
Figura 4 – Distribuição das tensões de corte	16
Figura 5 – Curvas força-deslocamento de juntas de sobreposição simples, para diferentes espessuras do adesivo.....	16
Figura 6 – Representação de defeitos possíveis em superfícies com elevada rugosidade.....	18
Figura 7 – Carga vs. número de ciclos até à rotura para diferentes rugosidades	19
Figura 8 – Representação geométrica do fator de momento fletor.....	20
Figura 9 – Diferença da distribuição da tensão ao longo da sobreposição para uma junta sobreposição simples. a) Adesivo frágil, b) Adesivo dúctil.....	21
Figura 10 – Ensaio de tração numa junta de sobreposição simples, analisando o comportamento de um adesivo epóxico e um poliuretano	22
Figura 11 – Esquema da suposição do modelo de Volkersen.....	23
Figura 12 – Distribuição da tensão de corte no adesivo numa junta de sobreposição simples	23
Figura 13 – Esquema da suposição do modelo de Goland e Reissner	24
Figura 14 – Ângulo de contacto entre um líquido e um sólido	27
Figura 15 – Variação do ângulo de contacto.....	27
Figura 16 – Tensão de rotura versus tempo de envelhecimento, para substratos em aço macio e adesivo epóxico.....	28
Figura 17 – Tipos de rotura.....	29
Figura 18 – Representação esquemática dos diferentes modos de rotura em juntas coladas de sobreposição simples	30
Figura 19 – Fibras de carbono colocadas a $\pm 45^\circ$ na zona de sobreposição.....	32
Figura 20 – Superfície de rotura das juntas reforçadas com fibras de carbono	32
Figura 21 – Superfície de rotura das juntas reforçadas com fibras de aramida	32
Figura 22 – Araldite 2015.....	35
Figura 23 – Colocação do reforço na JSS.....	36
Figura 24 – Dimensões da JSS (em mm)	36
Figura 25 – Juntas de sobreposição	37
Figura 26 – Solicitação da junta no ensaio de tração.....	37
Figura 27 – Provette na máquina de ensaios Shimadzu	38

Figura 28 – Gráfico força-deslocamento para 5 ensaios em juntas não reforçadas	40
Figura 29 – Gráfico com curvas força-deslocamento para as juntas reforçadas de 20mm de comprimento de sobreposição e tratamento superficial com granalha de vidro.....	42
Figura 30 – Gráfico com curvas força-deslocamento para as juntas reforçadas de 20mm de comprimento de sobreposição e tratamento superficial com granalha de óxido de alumínio.....	43
Figura 31 – Gráfico com curvas força-deslocamento para as juntas reforçadas de 30mm de comprimento de sobreposição e tratamento superficial com granalha de vidro.....	45
Figura 32 – Gráfico com curvas força-deslocamento para as juntas reforçadas de 40mm de comprimento de sobreposição e tratamento superficial com granalha de vidro.....	46
Figura 33 – Gráfico com curvas força-deslocamento para as juntas reforçadas de 40mm de comprimento de sobreposição e tratamento superficial com óxido de alumínio.....	48
Figura 34 – Tensão máxima vs. comprimento de sobreposição de todas as juntas ensaiadas	50
Figura 35 – Tensão máxima média vs. comprimento de sobreposição médio de todas as juntas ensaiadas	50
Figura 36 – Gráfico comparativo força vs. deslocamento das juntas não reforçadas / juntas reforçadas de 30mm de comprimento de sobreposição e tratamento superficial com granalha de vidro	51
Figura 37 – Gráfico comparativo força vs. deslocamento das juntas não reforçadas / juntas reforçadas de 20mm de comprimento de sobreposição e tratamento superficial com granalha de vidro	52
Figura 38 – Gráfico comparativo força vs. deslocamento das juntas não reforçadas / juntas reforçadas de 40mm de comprimento de sobreposição e tratamento superficial com granalha de vidro	53
Figura 39 – Gráfico comparativo força vs. deslocamento das juntas não reforçadas / juntas reforçadas de 20mm de comprimento de sobreposição e tratamento superficial com óxido de alumínio.....	54
Figura 40 – Gráfico comparativo força vs. deslocamento das juntas não reforçadas / juntas reforçadas de 40mm de comprimento de sobreposição e tratamento superficial com óxido de alumínio.....	55
Figura 41 – Variação deslocamento vs. comprimento de sobreposição	56
Figura 42 – Gráfico comprimento de sobreposição nominal vs deslocamento máximo	57

Figura 43 – Comparação comprimento de sobreposição nominal vs deslocamento máximo entre juntas granalhadas com microesferas de vidro e com óxido de alumínio	57
Figura 44 – Juntas não reforçadas N1_1 e N2_1	58
Figura 45 – Juntas não reforçadas N3_1 e N4_1	59
Figura 46 – Juntas não reforçadas N4_1 e N5_1	59
Figura 47 – Juntas reforçadas C1-1 e C2-1	60
Figura 48 – Juntas reforçadas C3-1 e C5-1	60
Figura 49 – Juntas reforçadas C4-1	60
Figura 50 – Juntas reforçadas C4-1 e C5-1	61
Figura 51 – Juntas reforçadas C1-2 e C2-2	61
Figura 52 – Juntas reforçadas C3-2 e C4-2	61
Figura 53 – Juntas reforçadas C4_2 e C5_2.....	62
Figura 54 - Juntas reforçadas C1-3 e C2-3.....	62
Figura 55 – Juntas reforçadas C3-3 e C4-3	63
Figura 56 – Juntas reforçadas C4-3 e C5-3	63
Figura 57 – Juntas de sobreposição simples reforçadas série Cx-4 – C1_4 a C5_4... 63	
Figura 58 – Juntas de sobreposição simples reforçadas série Cx-5 – C1_5 a C5_5... 64	

Índice de tabelas

Tabela 1 – Propriedades qualitativas dos diferentes adesivos	9
Tabela 2 – Algumas propriedades dos principais adesivos	10
Tabela 3 – Propriedades da liga Al 6082 T651	34
Tabela 4 – Propriedades do adesivo ARALDITE® 2015	35
Tabela 5 – Comprimento de sobreposição juntas não reforçadas (1º Ensaio)	39
Tabela 6 – Dados obtidos e calculados no 1º Ensaio.....	39
Tabela 7 – Comprimento de sobreposição efetivo das juntas reforçadas (série Cx_2) 41	
Tabela 8 – Dados obtidos e calculados da série Cx_2.....	41
Tabela 9 – Comprimento de sobreposição das juntas reforçadas (série Cx_4).....	43
Tabela 10 – Dados obtidos e calculados da série Cx_4.....	43
Tabela 11 – Comprimento de sobreposição das juntas reforçadas (série Cx_1).....	44
Tabela 12 – Dados obtidos e calculados da série Cx_1.....	44
Tabela 13 – Comprimento de sobreposição das juntas reforçadas (série Cx_3).....	45
Tabela 14 – Dados obtidos e calculados da série Cx_3.....	46
Tabela 15 – Comprimento de sobreposição das juntas reforçadas (série Cx_5).....	47
Tabela 16 – Dados obtidos e calculados da série Cx_5.....	47
Tabela 17 – Tensão máxima atingida pelas JSS	49

Índice

Lista de símbolos e abreviaturas	x
Índice de figuras	xi
Índice de tabelas.....	xiv
Índice.....	xv
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento do trabalho.....	1
1.2. Metodologia	3
2. Revisão bibliográfica.....	5
2.1. Juntas adesivas estruturais.....	5
2.1.1. Principais adesivos	6
2.1.1.1. Epóxicos	6
2.1.1.2. Fenólicos	7
2.1.1.3. Poliuretanos	7
2.1.1.4. Acrílicos modificados.....	8
2.1.1.5. Cianoacrilatos	8
2.1.1.6. Anaeróbicos	9
2.1.1.7. Processo de cura	10
2.1.1.7.1. Dispositivos para estabelecimento de pressão.....	11
2.1.1.7.2. Dispositivos para estabelecimento de temperatura	11
2.1.2. Parâmetros geométricos	12
2.1.2.1. Tipos de juntas.....	12
2.1.2.2. Comprimento de sobreposição	13
2.1.2.3. Espessura do adesivo	15
2.1.2.4. Material do substrato.....	17
2.1.2.4.1. Tratamento superficial.....	17
2.1.2.5. Espessura do substrato	20
2.1.3. Influência do tipo de adesivo na distribuição de tensões.....	20
2.1.4. Previsão da resistência de juntas adesivas - Mecânica dos meios contínuos - Análise de Tensões.....	22
2.1.4.1. Método analítico de Volkersen	23
2.1.4.2. Método analítico de Goland e Reissner.....	24
2.1.4.3. Método analítico de Hart-Smith.....	25
2.1.4.4. Método dos elementos finitos.....	25
2.1.5. Procedimento de colagem	26
2.1.5.1. Fabricação das juntas adesivas	26

2.1.5.2. Durabilidade.....	28
2.1.5.3. Tipos de rotura	29
2.1.5.4. Modificação das propriedades do adesivo	30
3. Procedimento experimental	34
3.1. Materiais utilizados	34
3.1.1 Substratos.....	34
3.1.2 Acabamento superficial	34
3.1.3. Adesivo	35
3.1.4. Reforço	36
3.1.5. Junta de sobreposição simples.....	36
3.1.5.1. Processo de fabrico da junta de sobreposição	37
3.1.6. Avaliação do comportamento mecânico	38
4. Resultados.....	39
4.1. Juntas adesivas não reforçadas.....	39
4.2. Juntas adesivas reforçadas	40
4.2.1. Resultados para o comprimento nominal de sobreposição de 20mm (granalha de vidro)	40
4.2.2. Resultados para o comprimento nominal de sobreposição de 20mm (granalha de óxido de alumínio)	42
4.2.3. Resultados para o comprimento nominal de sobreposição de 30mm (granalha de vidro)	44
4.2.4. Resultados para o comprimento nominal de sobreposição de 40mm (granalha de vidro)	45
4.2.5. Resultados para o comprimento nominal de sobreposição de 40mm (granalha de óxido de alumínio)	47
4.3. <i>Síntese dos resultados de comportamento mecânico</i>	48
4.4. Análise da superfície de rotura.....	58
5. Conclusões e considerações futuras	65
6. Bibliografia e outras fontes de informação	67
ANEXO I – Ficha técnica propriedades Araldite 2015	71
ANEXO II - Ficha técnica granalha de vidro	78
ANEXO III - Ficha técnica óxido de alumínio	80

1. Introdução

1.1. Enquadramento do trabalho

As juntas adesivas apresentam inúmeras vantagens em comparação com as ligações mecânicas mais tradicionais. Alguns aspetos como o baixo peso, maior resistência (se bem dimensionada), duração e fiabilidade, possibilidade de unir diferentes materiais, rapidez de fabrico, possibilidade de automatização e distribuição uniforme das tensões são os mais referidos.

Tendo em conta que cada vez mais são utilizados materiais compósitos na indústria automóvel, aeroespacial e marítima para reduzir o peso e os consumos, é necessário estudar com maior profundidade este tipo de materiais.

Nos últimos anos são imensos os trabalhos sobre juntas adesivas que envolvem a ligação entre materiais compósitos.

A facilidade de ligação e a possibilidade de unir substratos sem danificar as fibras é a razão mais relevante apontada para o crescimento do número de publicações nesta área do conhecimento.

Contudo, podemos também referir algumas limitações a ter em conta. A título de exemplo referem-se: na maior parte dos casos impossibilidade de desmontagem, fraca resistência ao arrancamento e eventual necessidade de cura a elevadas temperaturas.

O comportamento de uma ligação adesiva é condicionado por diferentes variáveis como o tipo de adesivo, o tipo de substrato e aspetos dimensionais como o comportamento de sobreposição, a espessura dos substratos e a espessura da camada adesiva. Sendo o adesivo um dos elementos de ligação mais importante, vários autores têm procurado desenvolver metodologias para melhorar o seu comportamento. Entre estas metodologias encontra-se a modificação química ou a modificação física através de inclusões de partículas ou tecidos que possam atuar sobre o mecanismo de rotura e, conseqüentemente sobre o comportamento mecânico global da ligação.

O trabalho desenvolvido enquadra-se no esforço de procurar conhecer que variáveis podem ser relevantes para melhorar a eficácia da introdução de um tecido no interior da camada adesiva.

1.2. Metodologia

A elaboração do presente trabalho seguiu a metodologia que seguidamente se descreve:

- revisão bibliográfica sobre juntas adesivas;
- execução dos provetes;
- realização dos ensaios de tração;
- análise dos resultados de resistência;
- análise dos resultados de ductilidade;
- análise das superfícies de rotura;
- identificação das principais variáveis;
- conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Juntas adesivas estruturais

Ao longo das últimas décadas, do século XX até ao presente século XXI, podemos verificar que existe uma progressiva utilização de ligações com adesivos. Os adesivos aparecem como substitutos dos sistemas de fixação mecânica convencionais, com inúmeras vantagens em relação a estes. Entre as vantagens dos adesivos estruturais estão:

- reduzida concentração de tensões;
- transferência de carga suave em largas áreas de colagem;
- aumento da rigidez das estruturas;
- maior resistência à fadiga;
- excelente relação resistência - peso;
- custo reduzido devido a processos de fabricação mais baratos;
- aerodinâmica otimizada devido à liberdade de conceção e design;
- possibilidade de fixação de materiais de natureza diferente;
- resistência à corrosão no caso de juntas de substratos incompatíveis.

Relativamente às desvantagens ou limitações encontramos, por exemplo:

- baixa resistência a forças de arrancamento e clivagem;
- necessidade de projetar a junta para garantir que o adesivo trabalhe ao corte;
- necessidade de uma cuidada preparação superficial;
- difícil controlo de qualidade e segurança nas juntas adesivas;
- reduzida resistência à temperatura e humidade.

A suscetibilidade da maior parte dos adesivos à degradação por um ou mais fatores ambientais é uma das principais limitações da aplicação dos adesivos com ligação estrutural. A temperatura, a humidade e a radiação solar são alguns parâmetros com influência na durabilidade das juntas adesivas.

Uma análise de geometria da junta mais adequada, escolha criteriosa do adesivo utilizado e alguns cuidados no procedimento de colagem são alguns aspetos a considerar paralelamente às questões ambientais citadas.

2.1.1. Principais adesivos

A designação de adesivo estrutural é reservada para ligações permanentes em que a resistência mecânica é superior a 7MPa. Dependendo da resistência da ligação necessária são usados diferentes tipos de adesivos. Em alguns casos a resistência da ligação pode ser superior à resistência dos substratos que se estão a ligar.

Os adesivos podem ser classificados de acordo com a seguinte divisão: epóxicos, fenólicos, poliuretanos, acrílicos modificados, cianocrilatos e anaeróbicos.

2.1.1.1. Epóxicos

Os epóxicos são a família de adesivos mais versáteis porque aderem a uma vasta gama de materiais. Por outro lado, são facilmente alterados para atingir diferentes propriedades.

Os epóxicos são comercializados em formulações bicomponente de cura à temperatura ambiente ou a altas temperaturas, bem como adesivos monocomponente que necessitam de ser armazenados a baixa temperatura. Podem ser usados para a maioria dos substratos, possuem boa resistência mecânica, curam com uma baixa libertação de voláteis e apresentam baixa contração.

Todavia, as resinas epoxídicas são relativamente frágeis, mas têm a vantagem de poderem ser misturadas com uma vasta gama de endurecedores, que podem fornecer propriedades diferentes como, por exemplo, variação da resistência, da durabilidade ou da rigidez.

Os epóxicos híbridos são resinas de epóxido misturadas com outros tipos de polímeros de modo a melhorar propriedades específicas. Entre os epóxicos híbridos destacam-se os epóxicos modificados com borracha, os epóxicos-fenólicos, os epóxicos-nylons, os epóxicos-polisulfidos e os epóxicos-vinílicos.

2.1.1.2. Fenólicos

As resinas fenólicas são produzidas através de um processo de condensação. A principal utilização destas resinas é na colagem de madeira. Porém, também são usadas em calços de travão, discos abrasivos e lixas. São usadas para estes fins devido à sua resistência ao calor e estabilidade dimensional e, também o facto de o seu custo ser relativamente acessível.

Estes adesivos normalmente são aplicados numa solução de álcool, acetona ou água. A cura é feita sob pressão e a uma temperatura de, aproximadamente, 140°C ao longo de alguns minutos. No caso deste adesivo a junta criada tem uma resistência superior à própria madeira.

2.1.1.3. Poliuretanos

Os poliuretanos podem ser totalmente sólidos ou dissolvidos num solvente de uma ou duas partes. Os poliuretanos curam mediante reação dos grupos isocianato com a humidade do ar, que migra para o interior do adesivo. A humidade relativa do ar é, portanto, o factor determinante da velocidade de cura para estes adesivos.

Os poliuretanos são flexíveis e a sua maior resistência é ao corte e ao arrancamento. Apresentam baixa resistência à tração, mas um ótimo desempenho a baixas temperaturas, sendo unicamente superado pelos adesivos de silicone. O seu desempenho a altas temperaturas já não é tão bom sendo a temperatura máxima suportada de, aproximadamente, 150°C. Os adesivos de poliuretano possuem excelente tenacidade e ductilidade, capacidade de enchimento e resistência química.

Devido à sua flexibilidade são usados para unir filmes, folhas metálicas e elastómeros. Os uretanos são muito usados na indústria automóvel.

2.1.1.4. Acrílicos modificados

Os adesivos acrílicos modificados são utilizados com sistemas ativadores de cura, que se processa à temperatura ambiente. Consoante o adesivo e o ativador, podem ser pré-misturados antes da aplicação nas superfícies dos substratos ou aplicados separadamente em cada uma das superfícies a ligar. Os adesivos acrílicos modificados possuem geralmente boa resistência mecânica, boa resistência ao impacto, uma ampla gama de temperatura de trabalho (-55 a 120 °C) e podem ser usados em quase todos os substratos.

2.1.1.5. Cianoacrilatos

Os cianoacrilatos são vulgarmente conhecidos como super-cola. Estes adesivos ficaram famosos após o início da sua comercialização no início dos anos 70. Os adesivos cianoacrilatos são monocomponente e curam através de reação aniônica quando entram em contacto com superfícies levemente alcalinas. A humidade existente no ar ambiente e nas superfícies de adesão neutraliza o estabilizador e inicia a cura numa questão de segundos.

Um nível de humidade demasiado elevado acelera a cura, mas prejudica a resistência final da ligação. Valores de humidade relativa de 40 a 60 % são os mais apropriados para a cura, se bem que o recurso a ativadores possa acelerar a cura ou torná-la independente da humidade ambiente. Os cianoacrilatos têm boa resistência mecânica, boa resistência ao envelhecimento e podem ser aplicados a uma grande variedade de substratos.

Os cianoacrilatos de metilo devido a serem mais fortes e mais resistentes ao impacto são usados para unir materiais rígidos, mas quando se trata de unir borrachas ou superfícies plásticas, é preferível a utilização de cianoacrilatos de etilo. Normalmente os cianoacrilatos têm baixa resistência ao calor, à humidade, ao arrancamento e ao impacto.

2.1.1.6. Anaeróbicos

Os adesivos anaeróbicos são, também, adesivos monocomponente que curam rapidamente à temperatura ambiente quando privados do contacto com o oxigénio. As superfícies metálicas funcionam como catalisadores, estimulando o processo de cura. No caso das superfícies em contacto serem constituídas por materiais inativos, é necessária a adição prévia de um ativador ao adesivo em pelo menos uma das superfícies para obter uma cura rápida e completa. A sua cura apenas é possível quando o espaço entre substratos seja maior que 0,8mm. O tempo de cura pode ir de alguns minutos até horas, caso não sejam usados primários ou calor.

Os anaeróbicos são bastante versáteis devido a poderem ligar a uma grande variedade de materiais tais como metais comuns, vidro, cerâmicas e plásticos termoendurecíveis. O seu uso é adequado para aplicações estruturais e em maquinaria. Os adesivos anaeróbicos têm boa resistência ao corte, gama ampla de temperaturas de funcionamento (entre -55 e 230°C) e boa resistência química.

Na Tabela 1 podemos ver uma classificação qualitativa, segundo Esteves [1], das propriedades dos diversos adesivos.

Tabela 1 – Propriedades qualitativas dos diferentes adesivos [1]

Material	Propriedades			
	Flexibilidade (Resiliência)	Resistência Mecânica	Resistência Térmica	Resistência a agentes Químicos
Resinas Termoendurecíveis	Má	Boa	Boa	Boa
Resinas Termoplásticas	Média	Medíocre	Medíocre	Boa
Elastómeros	Muito Boa	Má	Variável	Medíocre

Na tabela 2, podemos observar a resistência ao corte e ao arrancamento dos principais tipos de adesivos e, verificamos que o adesivo epóxico, é dos que apresenta melhor desempenho nestas condições de solicitação. A máxima temperatura de trabalho é, também apresentada.

Tabela 2 – Algumas propriedades dos principais adesivos [2]

Tipo de Adesivo	Resistência ao Corte		Resistência ao arrancamento		Temperatura de Trabalho	
	MPa		N/mm		°C	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Borracha	0,35	3,5	1,8	7	-20	150
PVA (Cola branca)	1,4	6,9	0,88	1,8		
Cianoacrilato	6,9	13,8	0,88	3,5		80
Anaeróbico	6,9	13,8	0,88	1,8		200
Poliuretano	6,9	17,2	1,8	8,8	-200	150
Acrílico	13,8	24,1	1,8	8,8	-40	90
Poliamida	13,8	27,6	0,18	0,88		350
Epóxico	10,3	27,6	0,35	1,8		200
Borracha modificada com epóxico	20,7	41,4	4,4	14		180

2.1.1.7. Processo de cura

O processo de cura é muito importante e, após colocação do adesivo nos substratos, devem ser unidos rapidamente para evitar possível contaminação da área de colagem. Assim que se dá a união, inicia-se o processo de polimerização, e forma-se uma estrutura reticulada em que as cadeias moleculares se ligam entre si segundo uma rede tridimensional.

Em alguns adesivos o processo acontece de forma espontânea, mas em outros é necessário um ciclo de cura que poderá levar horas.

O processo de cura, normalmente, é feito a partir da aplicação de pressão e temperatura. A temperatura de cura deve ser respeitada conforme indicações do fabricante pois, se a temperatura for superior, pode danificar termicamente o adesivo e, se for inferior, pode não haver a polimerização e as propriedades mecânicas serem inferiores às esperadas.

Durante o ciclo de cura a pressão deve manter-se constante e distribuída uniformemente pela área colada [3].

2.1.1.7.1. Dispositivos para estabelecimento de pressão

Os dispositivos usados para ajudar a fixação devem ter a capacidade de manter a pressão constante sobre a união. Devem permitir compensar a redução de espessura do adesivo ou expansão dos substratos.

A utilização de parafusos ou grampos é inadequada. Em alternativa devem ser usadas molas, prensas hidráulicas ou pneumáticas.

Quando as juntas são soldadas localmente, por pontos, não é preciso qualquer dispositivo de pressão [3].

2.1.1.7.2. Dispositivos para estabelecimento de temperatura

A maior parte das ligações adesivas têm um processo de cura à temperatura ambiente não sendo necessário qualquer equipamento de controlo de temperatura. Mas, tendo em conta a temperatura máxima a que o adesivo pode estar sujeito durante a cura, observa-se maior resistência mecânica das ligações comparativamente à cura à temperatura ambiente.

Para uma cura a temperaturas superiores utilizam-se estufas com sistemas de circulação de ar de forma a certificar que a distribuição da temperatura é uniforme. Recentemente foram também desenvolvidos dispositivos para processamento de uma cura diferencial ao adesivo. A sua utilidade é obter um adesivo em que as suas propriedades podem ser adaptadas ao longo da ligação.

2.1.2. Parâmetros geométricos

2.1.2.1. Tipos de juntas

A geometria das juntas é um fator importante pois tem bastante influência na resistência da ligação devido à distribuição de tensões que proporciona.

Na figura 1, podemos ver as diferentes tipologias de geometria de juntas habitualmente consideradas. Assim, temos:

- juntas de sobreposição simples;
- juntas de sobreposição dupla;
- juntas de chanfro exterior;
- juntas de chanfro interior;
- juntas em degrau;
- juntas de topo com cobre-junta simples;
- juntas de topo com cobre-junta dupla;
- juntas topo a topo;
- juntas do tipo tubular.

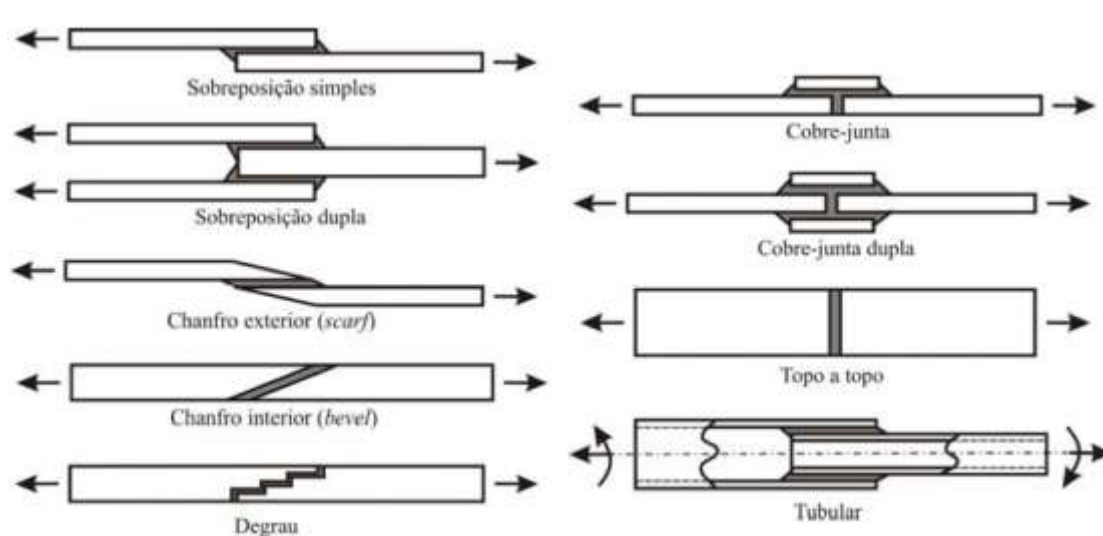


Figura 1 – Tipos de juntas de sobreposição e qualificação da distribuição de tensão [4]

A junta de sobreposição simples é um dos tipos mais utilizados na indústria. Adams [5] fez uma classificação para diferentes juntas ensaiadas à tração e, esta junta apresentou uma boa relação entre a facilidade para suportar as cargas aplicadas e o seu custo. Em relação à facilidade para suportar cargas aplicadas, esta junta obtém

uma classificação de 10 numa escala de 1 a 15 (a capacidade de carga é proporcional ao valor da escala).

Quanto ao custo de fabrico, e devido à sua fácil preparação, apresentam um valor muito inferior quando comparadas com outras.

Estas juntas apresentam um razoável comportamento mecânico, incluindo-se nesta análise a resistência à fadiga.

2.1.2.2. Comprimento de sobreposição

Nas juntas de sobreposição simples, as extremidades da zona de sobreposição são as zonas que apresentam uma maior concentração de tensões. A tensão média é mais baixa do que a tensão nas extremidades da zona de sobreposição 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 [6].

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_0) e a espessura do substrato (t). Mas a partir de determinados valores de L_0/t , o ganho de resistência é marginal e o peso do conjunto aumenta desnecessariamente. Para os adesivos frágeis e substratos de aço de alta resistência verifica-se que a partir de um determinado comprimento de sobreposição, o aumento deste não se repercute na resistência da junta (conforme figura 2) [3], 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 no domínio plástico e o aumento do comprimento de sobreposição não se repercute na resistência da junta.

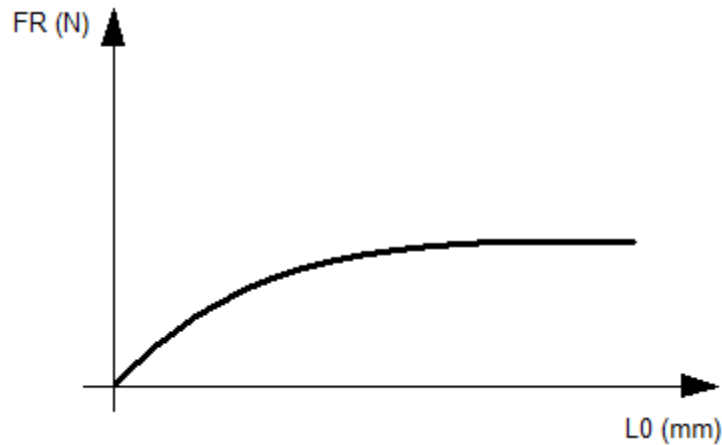


Figura 2 - Resistência de uma junta de sobreposição simples em função do comprimento de sobreposição

Na Figura 3 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.

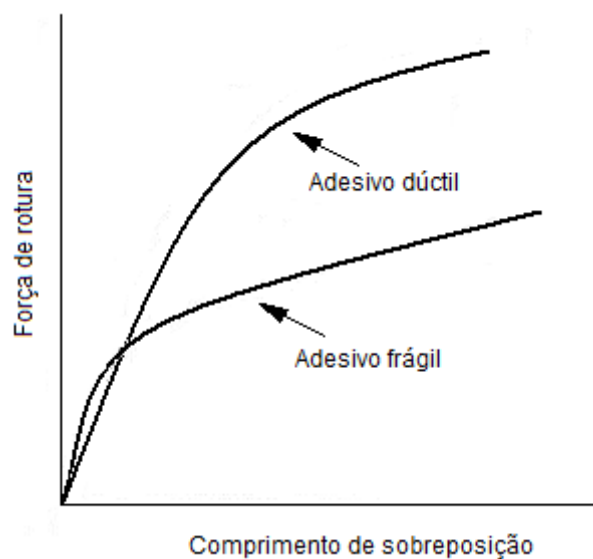


Figura 3 - Efeito do comprimento de sobreposição na força de rotura, para adesivos dúcteis e frágeis

Pereira et. al [7], em estudos realizados com juntas de alumínio, verificaram que o aumento do comprimento de sobreposição aumentou também a rigidez conjunta, reduzindo a deformação plástica e os picos de tensão e, aumentaram a carga de rotura. Concluíram que menos flexibilidade resulta numa força conjunta superior.

2.1.2.3. Espessura do adesivo

A espessura da camada de adesivo é um fator relevante quando se trata de adesivos estruturais. Deve-se garantir uma espessura ótima para o adesivo, de forma a obter o melhor desempenho da junta. As espessuras recomendadas estão 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 [3].

A diminuição da resistência da junta com o aumento da espessura pode ser explicada essencialmente devido a três fatores:

- para elevadas espessuras de adesivo corre-se o risco de introduzir defeitos na junta, tais como bolhas de ar ou micro fendas;
- nas extremidades da junta o momento fletor aumenta (depende da espessura do adesivo e do substrato), traduzindo-se numa diminuição da resistência da junta [8];
- a plastificação no caso dos adesivos dúcteis ocorre para cargas superiores em juntas de elevada espessura, mas propaga-se mais rapidamente até à rotura. Este facto origina uma menor resistência da junta.

A Figura 4 mostra que a plastificação generalizada ocorre mais facilmente numa junta com maior espessura de adesivo [3]. A plastificação localizada surge para valores de deslocamento aplicados inferiores nas juntas de menor espessura, ocorrendo o contrário para a deformação plástica generalizada. Esta constatação explica a razão da diminuição da resistência das juntas com o aumento da espessura do adesivo. Adams e Peppiatt (1974) propuseram três justificações possíveis para explicar a diminuição da resistência com o aumento da espessura do adesivo: maiores concentrações de tensões, maior probabilidade da presença de defeitos internos (porosidades, vazios e microfissuras devido às tensões residuais induzidas pelo processo de cura) e de maiores dimensões, e taxa de deformação inferior [9].

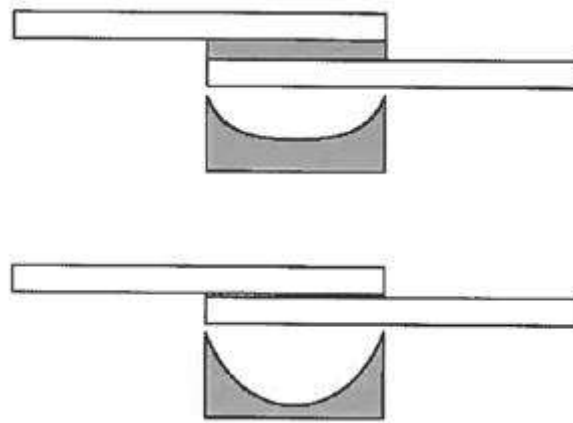


Figura 4 – Distribuição das tensões de corte [3]

Pode ver-se na Figura 5 a diminuição da resistência das juntas com o aumento da espessura de adesivo epóxico de alta resistência.

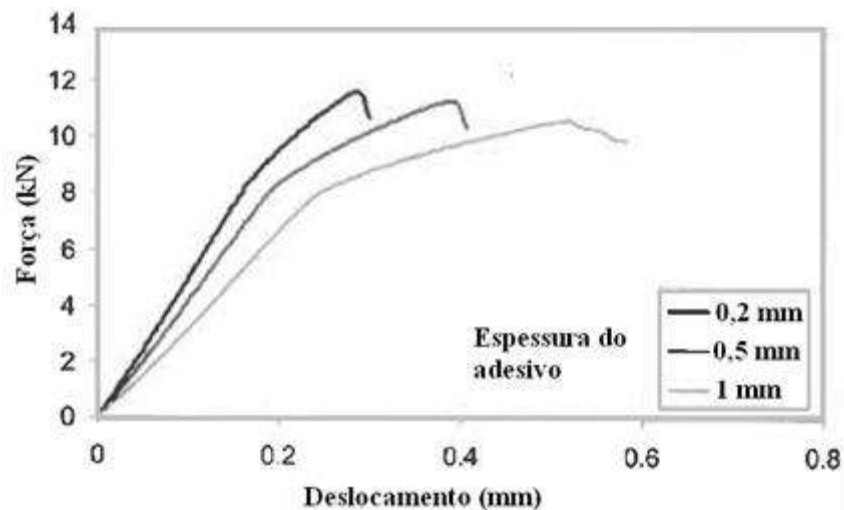


Figura 5 - Curvas força-deslocamento de juntas de sobreposição simples, para diferentes espessuras do adesivo [3, 10]

São vários os trabalhos bibliográficos que mostram a influência da espessura da camada adesiva. Por exemplo, Silva et al [11, 12], através de resultados experimentais demonstraram que a força total era substancialmente influenciada pela espessura do adesivo e, investigaram as juntas de sobreposição simples com substrato de aço de alta resistência ligados por vários tipos de adesivos de epóxico. Verificaram que a capacidade de suporte de carga das juntas de sobreposição aumentou à medida que a espessura do adesivo foi diminuída.

No estudo de Wei Xu e Yueguang Wei [13] sobre a influência da espessura do adesivo concluíram que as variações dos parâmetros de coesão e a resistência global com diferentes espessuras são afetadas por alguns fatores relacionados com a capacidade

de endurecimento e resistência à deformação dos adesivos. Os resultados mostram que ambos os parâmetros de coesão e a resistência global de ligação adesiva de estruturas metálicas são muito dependentes da espessura do adesivo. Além disso, como foram realizados testes com juntas de diferentes espessuras, a variação da força global correspondente a um adesivo de fraco endurecimento é mais notável quando comparada com um adesivo de forte endurecimento, especialmente para os adesivos frágeis num intervalo de espessura relativamente pequeno.

Arenas et al [14] num estudo para avaliar qual a espessura ótima de um adesivo verificaram que este parâmetro influencia a resistência da junta. Fizeram a análise para espessuras entre 0,4 e 0,8 mm. Verificaram que o valor médio da resistência ao corte aumenta à medida que a espessura do adesivo é reduzida.

2.1.2.4. Material do substrato

A influência do material do substrato é um aspeto que contribui para o sucesso da junta colada. Para os aços macios cuja resistência mecânica é baixa, a resistência da junta é independente do adesivo e para os aços de alta resistência mecânica a resistência da junta aumenta à medida que se usam adesivos mais resistentes e mais dúcteis.

Silva et. al [15] num estudo sobre a influência do material do substrato na resistência ao corte de JSS, verificaram que a força de corte depende, principalmente, do comprimento de sobreposição e da resistência do material do substrato. A resistência ao corte das JSS aumenta à medida que a resistência do material do substrato também é aumentada.

2.1.2.4.1. Tratamento superficial

Os tratamentos superficiais destinam-se a formar superfícies resistentes e de fácil molhagem. A resistência de uma junta adesiva aumenta significativamente quando

partículas soltas tais como produtos de corrosão, pinturas pouco aderentes e outros contaminantes são removidos da superfície.

Também a rugosidade é um parâmetro a ter em conta 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 6 permite observar o fenómeno de não penetração do adesivo nas cavidades do substrato, segundo Couvrat [16].

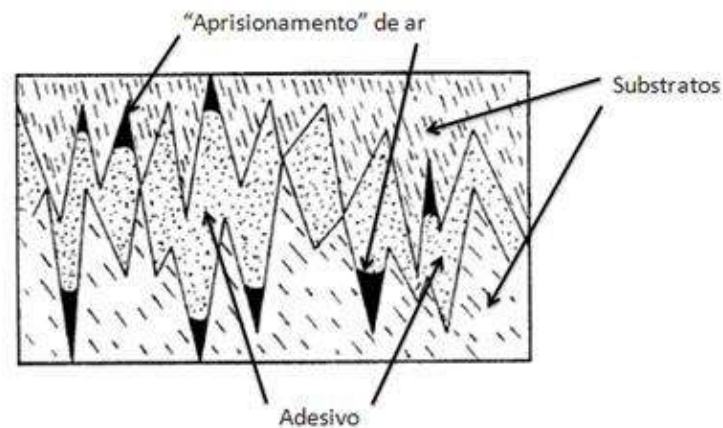


Figura 6 – Representação de defeitos possíveis em superfícies com elevada rugosidade [16]

De acordo com Razak, Othman e Sheng [17], o tipo de lixa usada influencia obviamente o acabamento superficial e a rugosidade. Segundo estes autores, quanto maior for a rugosidade maior será a resistência da junta.

Na figura 7 podemos observar um gráfico de Hans Nordberg [18], que compara diferentes rugosidades e mostra que a resistência à fadiga não varia mais do que 15% no intervalo de rugosidades observadas (0,1 μm e 0,5 μm).

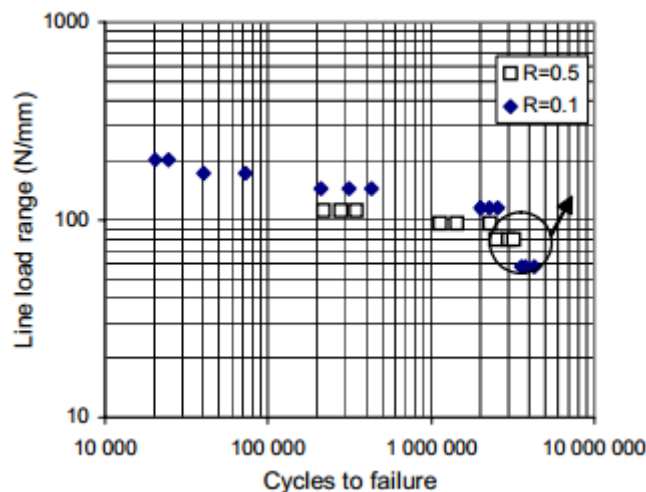


Figura 7 – Carga vs. número de ciclos até à rotura para diferentes rugosidades [18]

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 exista uma elevada concentração de tensões.

Para preparação das superfícies metálicas podemos utilizar fundamentalmente métodos mecânicos ou métodos químicos. Os tratamentos mecânicos mais usados são a granalhagem e a lixagem. Relativamente à granalhagem a pressão deve ser adaptada à dureza do substrato, porque é necessário ter em conta as deformações geradas pelas tensões de compressão, especialmente em chapas finas.

O tratamento químico a adotar depende do material do substrato. Quando aplicado aos aços substitui 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 [19].

Segundo Pereira, Ferreira, Antunes e Bártole [7], a rugosidade da superfície influencia a força da ligação adesiva. Borsellino et al (2009) [20] avaliaram a rugosidade induzida em ambas as chapas de alumínio não tratadas e tratadas mecanicamente com duas superfícies abrasivas. Os autores concluíram que a resistência aumenta com rugosidade superior a um valor limite (pelo menos na gama de rugosidades analisadas).

2.1.2.5. Espessura do substrato

Outro dos parâmetros geométricos é a variação da espessura dos substratos, uma vez que a sua má seleção pode diminuir a resistência da junta. Para as juntas de sobreposição simples, devido à sua geometria, verifica-se a ocorrência de um momento fletor quando tracionadas. O momento fletor depende da espessura do adesivo e do substrato de acordo com Petrie [21] (ver Figura 8). Quando a espessura aumenta, o momento fletor também aumenta, traduzindo-se numa diminuição da resistência da junta para espessuras elevadas. Porém, para os substratos em aço macio é benéfico aumentar a espessura para aumentar a rigidez e tornar o substrato menos suscetível à deformação plástica.



Figura 8 - Representação geométrica do fator de momento fletor [21]

Pereira et. al [7] no seu estudo em juntas de alumínio concluíram que o aumento da espessura do substrato de 1 para 1,5 mm provocou o aumento da força de corte, o que significa que o aumento da rigidez aumenta a sua resistência. No entanto o aumento do comprimento de sobreposição diminui a resistência ao corte.

2.1.3. Influência do tipo de adesivo na distribuição de tensões

O recurso a juntas adesivas para ligar materiais compósitos é largamente usado na indústria pois, os materiais compósitos, proporcionam estruturas mais leves. Contudo o uso destas juntas permanece um desafio porque a performance das juntas é bastante influenciada pelas características dos laminados de compósito. Na direção das fibras, compósitos unidirecionais podem ser bastante resistentes e rígidos, contudo na direção transversa as propriedades são bastante inferiores. As juntas adesivas estão sujeitas a tensões de arrancamento.

Por essa razão, as juntas adesivas entre materiais compósitos podem sofrer roturas na direção transversa antes de ocorrer rotura no adesivo.

Como foi referido anteriormente, a geometria das juntas influencia na distribuição das tensões aplicadas. Quanto mais uniforme for a distribuição de tensões, mais tempo levará até à rotura.

A tensão de corte pode ser influenciada pelo tipo de adesivo (frágil ou dúctil) tal como se pode ver na figura 9. Aí se observa 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 de forma linear com o comprimento de sobreposição no caso dos adesivos dúcteis.

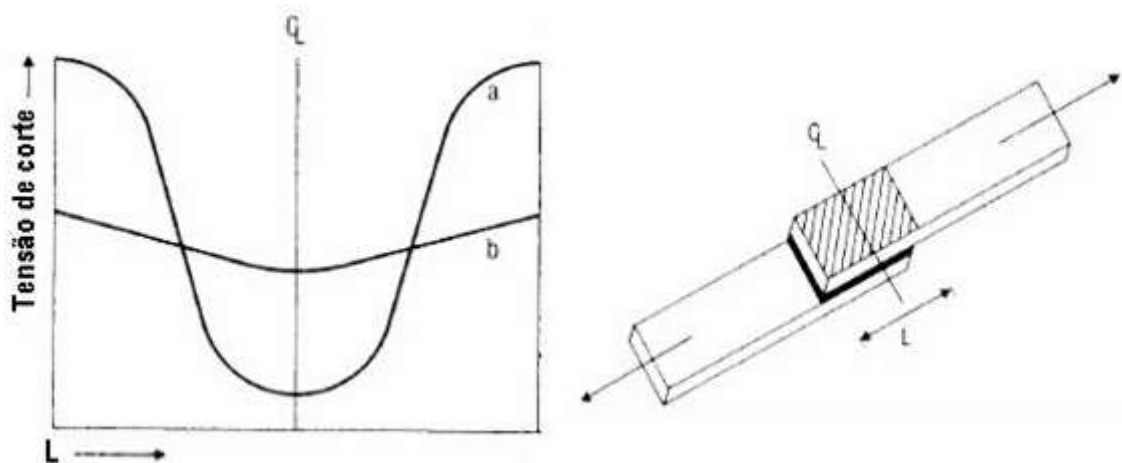


Figura 9 – Diferença da distribuição da tensão ao longo da sobreposição para uma junta sobreposição simples. a) Adesivo frágil, b) Adesivo dúctil [22]

Na Figura 10 vêm representadas as curvas força-deslocamento de ensaios de tração de JSS para um adesivo epóxico e um adesivo de poliuretano, realizado por Burchardt [23].

Pode-se verificar que as juntas coladas com o adesivo epóxico suportam forças mais elevadas, mas uma reduzida deformação. A junta colada com o adesivo de poliuretano suporta forças moderadas e elevadas deformações. Neste ensaio foi considerada

espessura de adesivo ótima para o adesivo epóxico e para o poliuretano, sendo o adesivo dúctil aquele que apresenta uma maior espessura.

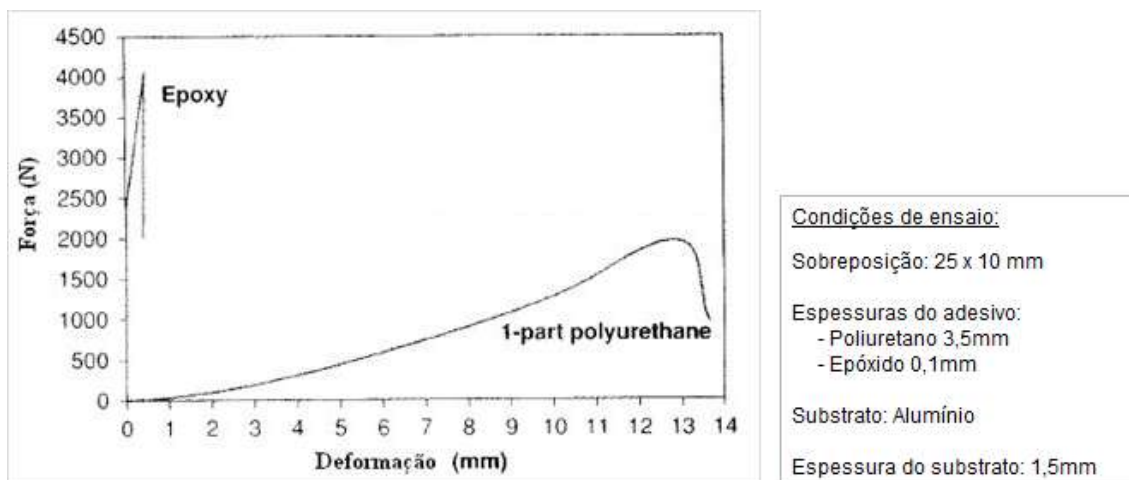


Figura 10 - Ensaio de tração numa junta de sobreposição simples, analisando o comportamento de um adesivo epóxico e um poliuretano [23]

2.1.4. Previsão da resistência de juntas adesivas - Mecânica dos meios contínuos - Análise de Tensões

Na mecânica dos meios contínuos, os valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação, previstos por métodos analíticos ou por uma análise de elementos finitos, são geralmente usados como critério de rotura e comparados com os valores suportados pelo material. Na análise de juntas adesivas de sobreposição simples podemos referir genericamente:

- métodos analíticos - Volkersen, Goland e Reissner e Hart-Smith;
- métodos numéricos - método de elementos finitos.

2.1.4.1. Método analítico de Volkersen

O modo mais simples de analisar as tensões numa junta de sobreposição simples baseia-se na suposição de que os substratos são rígidos e que o adesivo se deforma apenas em corte. Definindo a força aplicada por P , o comprimento de sobreposição por l , e a largura do substrato por b , teremos uma tensão uniforme ao longo do adesivo obtido pela expressão:

$$\sigma = \frac{P}{b l} \quad [\text{Eq. 1}]$$

A análise de Volkersen introduziu o conceito de corte diferencial, assumindo que o adesivo se deforma apenas por corte, mas o substrato pode deformar-se pela tensão gerada pela carga P (figura 11), por ser considerado elástico e não rígido. A diferença de tensão no substrato entre os pontos A e B (sendo a tensão máxima em A e nula em B) e a continuidade entre o substrato e o adesivo, resultam numa tensão de corte não uniforme ao longo da zona de sobreposição. A tensão de corte deixa de ser considerada uniforme ao longo do adesivo e passa a ser máxima nos extremos do adesivo e mínima no meio conforme ilustra a figura 12 [24, 25].

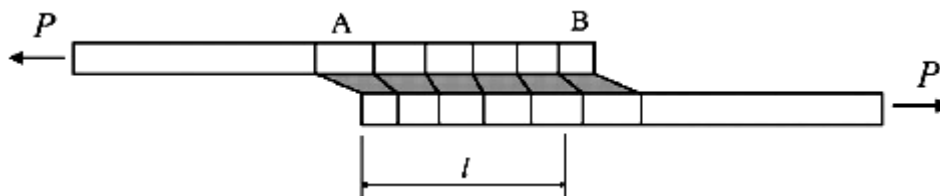


Figura 11 - Esquema da suposição do modelo de Volkersen [24]

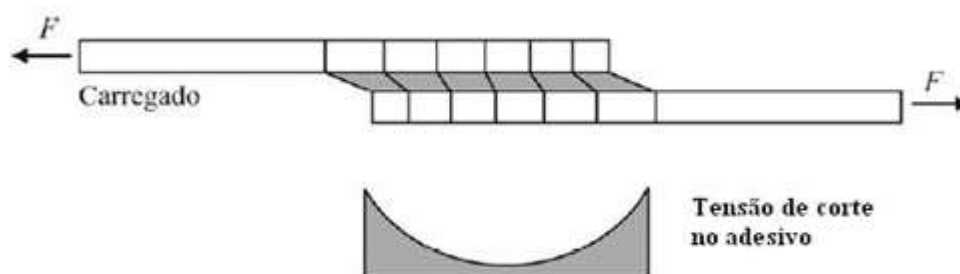


Figura 12 – Distribuição da tensão de corte no adesivo numa junta de sobreposição simples [3]

2.1.4.2. Método analítico de Goland e Reissner

Goland e Reissner [26] foram os primeiros a considerar os efeitos da rotação da junta. Conforme ilustra a figura 13, as duas forças (V e P) não são colineares o que provoca um momento fletor, M . Os substratos sofrem uma flexão e a direção da linha de carregamento altera-se devido à rotação da junta. Os deslocamentos deixam de ser proporcionais à força aplicada o que quer dizer que não há linearidade geométrica [3].

Na sua análise, Goland e Reissner incluíram um fator de momento fletor, k , que relaciona o momento no substrato no fim da sobreposição, M , com a força aplicada de acordo com a seguinte equação:

$$M = k \bar{P} \frac{t}{2} \quad [\text{Eq. 2}]$$

Onde, t é a espessura do substrato e \bar{P} a força aplicada por unidade de largura.

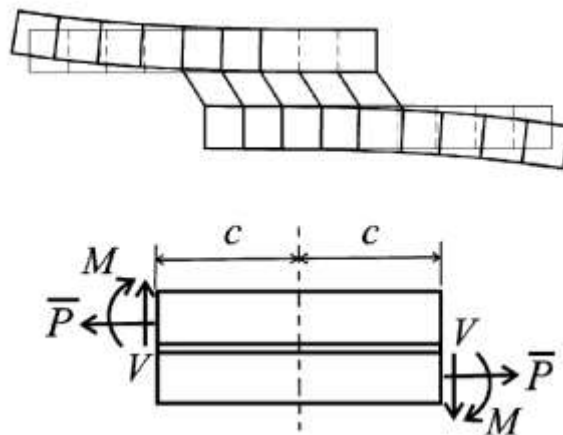


Figura 13 – Esquema da suposição do modelo de Goland e Reissner [24]

A análise destes autores originou resultados muito semelhantes aos de Volkersen em termos de tensão de corte. Esta é dada por:

$$\sigma_{\text{máx}} = 2 k \sigma_{\text{méd}} \sqrt{\Delta} \quad [\text{Eq. 3}]$$

2.1.4.3. Método analítico de Hart-Smith

A análise de Hart-Smith [27] assemelha-se à de Goland e Reissner, levando em consideração o efeito das grandes deflexões. Porém, considerou as deformações individuais dos dois substratos no comprimento de sobreposição, não negligenciando assim a espessura do adesivo. O modelo de Hart-Smith apresenta o fator de momento da seguinte forma:

$$k = \left(1 + \frac{t_a}{t}\right) \frac{1}{1 + \varepsilon_c + \frac{1}{6}(\varepsilon_c)^2} \quad [\text{Eq. 4}]$$

$$\varepsilon^2 = \frac{\bar{P}}{D} \quad [\text{Eq. 5}]$$

A tensão de corte, segundo o modelo de Hart-Smith, será dada por:

$$\sigma_{\text{máx}} = M \left(\frac{E}{2 d D_b b}\right)^{1/2} \quad [\text{Eq. 6}]$$

2.1.4.4. Método dos elementos finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) baseia-se na utilização de diferentes métodos numéricos que aproximam a solução de problemas de valor de fronteira descritos tanto por equações diferenciais ordinárias como por equações diferenciais parciais através da subdivisão da geometria do problema em elementos menores, chamados elementos finitos, nos quais a aproximação da solução exata pode ser obtida por interpolação de uma solução aproximada.

Atualmente o MEF encontra aplicação em praticamente todas as áreas de engenharia como ferramenta para análise de tensões e deformações. Na transferência de calor, mecânica dos fluidos e reologia, eletromagnetismo, etc. Algumas recebem designações específicas quando recorrem aos métodos numéricos, como é o caso da mecânica dos fluidos computacionais e do eletromagnetismo computacional.

No MEF, a solução das equações diferenciais que geraram o problema físico pode ser resolvida por funções de aproximação que satisfazem condições descritas por equações integrais no domínio do problema. Essas funções de aproximação podem ser funções polinomiais com grau razoável de ajuste em elementos discretizados a partir da geometria do problema satisfazendo as equações integrais em cada elemento discreto ou elemento finito.

2.1.5. Procedimento de colagem

2.1.5.1. Fabricação das juntas adesivas

Para a fabricação de juntas adesivas que cumpram os requisitos exigidos quando solicitadas, é necessário ter em conta alguns aspetos práticos.

O armazenamento dos adesivos deve ser considerado pois, existem adesivos que são sensíveis a diferenças de temperatura. Há que ter o cuidado de os armazenar em locais frescos e com reduzida humidade para que não se degradem.

Na aplicação, o adesivo deve permitir um escoamento uniforme em toda a extensão da sobreposição. Por outro lado, o operador deve procurar fazer a aplicação numa única direção para evitar o aparecimento de defeitos.

O local de trabalho deve ser limpo e ausente de poeiras para não contaminar a superfície dos substratos que devem ser limpos e desengordurados recorrendo, conforme os casos, a solventes adequados de rápida volatilização.

A molhagem de uma superfície sólida por um líquido é crucial para uma boa adesão e merece uma cuidadosa atenção. A molhagem pode ser definida como a capacidade de um líquido se espalhar numa superfície sólida.

A molhabilidade é avaliada pelo ângulo de contacto do líquido com a superfície sólida, conforme ilustra a figura 14.

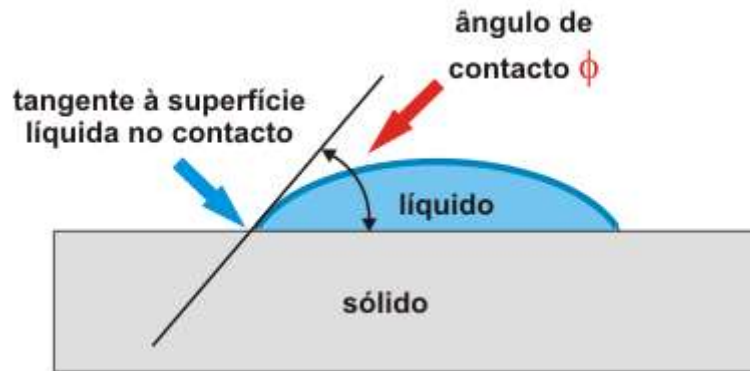


Figura 14 – Ângulo de contacto entre um líquido e um sólido [28]

Alhanati [28] na figura 15 mostra que, quanto menor o ângulo de contacto maior a molhabilidade, isto é, mais o líquido molha a superfície sólida em contacto.

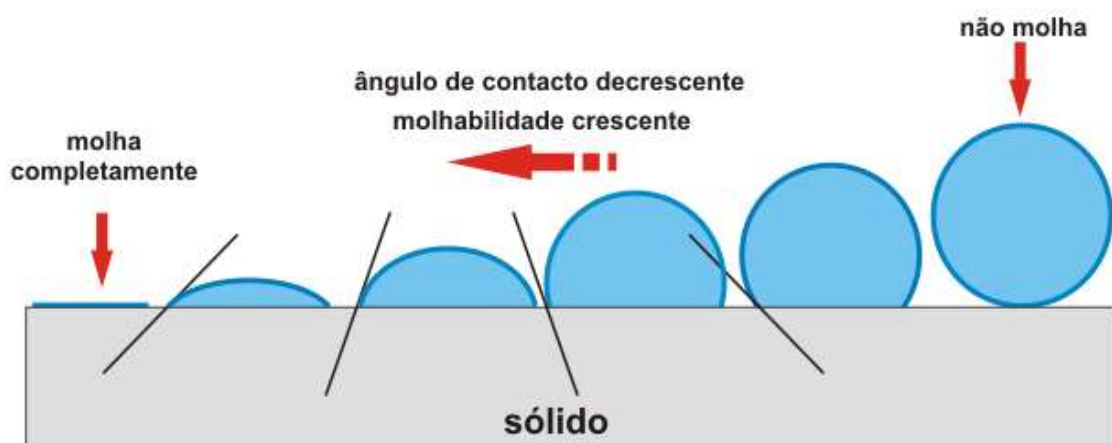


Figura 15 – Variação do ângulo de contacto [28]

Quando o líquido molha completamente a superfície sólida ele espalha-se numa fina camada de espessura praticamente monomolecular. Quando o líquido não molha a superfície sólida ele divide-se em porções praticamente esféricas.

Quando o ângulo é superior a zero o líquido não se espalha, mas quando é igual a zero o líquido molha o sólido completamente e espalha-se espontânea e livremente sobre a superfície a uma velocidade que depende da viscosidade do líquido e da rugosidade da superfície.

2.1.5.2. 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 [3].

De acordo com Teixeira [29], 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.

Na Figura 16, apresentada por Kinloch [30] pode-se observar a tensão de rotura de juntas de aço macio e coladas com um epóxico, sujeita a um envelhecimento a diferentes temperaturas. Verifica-se uma 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).

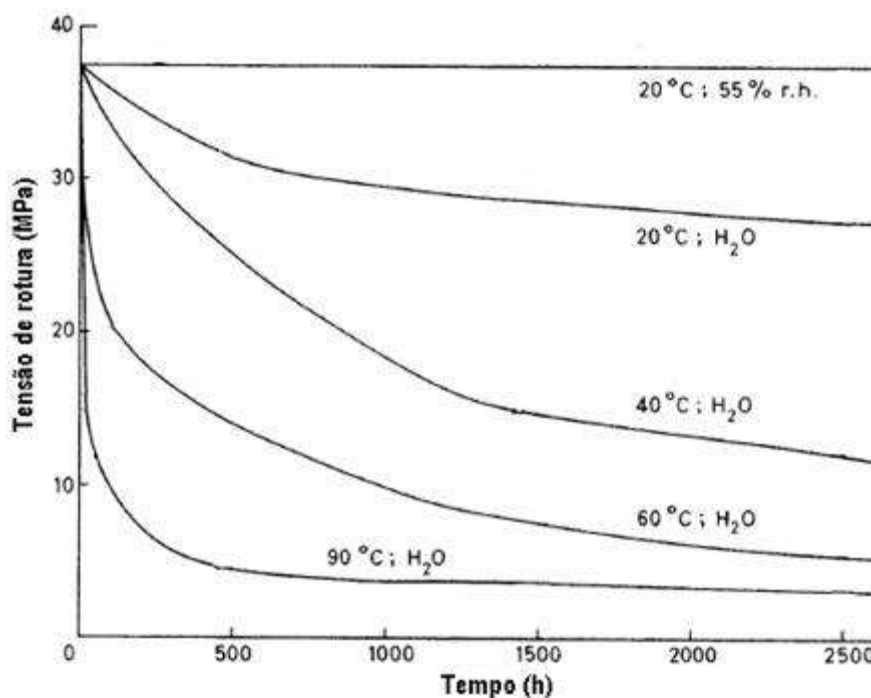


Figura 16 – Tensão de rotura versus tempo de envelhecimento, para substratos em aço macio e adesivo epóxico [30]

2.1.5.3. Tipos de rotura

A finalidade de uma ligação adesiva é a transmissão de carga entre os dois componentes ligados, mantendo a sua integridade estrutural sob solicitações estáticas e/ou dinâmicas e condições ambientais adversas (humidade e temperatura). Torna-se assim fundamental a correta avaliação da distribuição do perfil de tensões e, conseqüentemente, dos modos de rotura induzidos nas juntas coladas.

De acordo com Banea et. al [31], geralmente, podem-se distinguir três modos de rotura diferentes em juntas coladas (ver figura 17): rotura coesiva no interior do adesivo, rotura adesiva na interface entre os substratos e o adesivo e rotura de um dos substratos. A rotura coesiva ocorre quando, quer os substratos quer a ligação entre o adesivo e o substrato são mais fortes do que a resistência interna do próprio adesivo. Por vezes a rotura ocorre por uma combinação dos referidos modos, designando-se nesse caso por rotura mista.



Figura 17 – Tipos de rotura [31]

Na figura 18 pode-se observar a diferença entre os processos de rotura adesiva e coesiva segundo Silva et. al [3]. O objetivo de um tratamento superficial adequado é a obtenção de uma rotura coesiva.

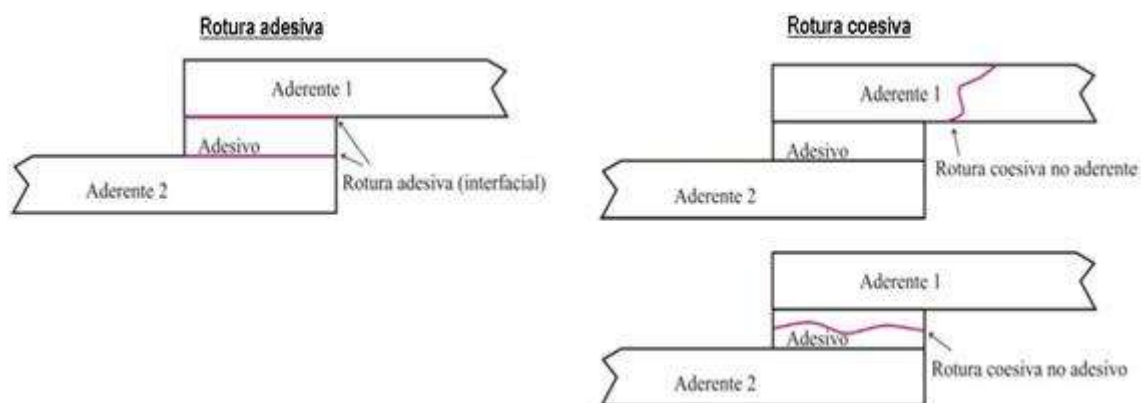


Figura 18 – Representação esquemática dos diferentes modos de rotura em juntas coladas de sobreposição simples [3]

2.1.5.4. Modificação das propriedades do adesivo

Vários trabalhos recentes vão no sentido de procurar introduzir uma nova abordagem: modificar as características do adesivo.

A modificação do adesivo pode ser realizada de várias formas: introdução de partículas na camada adesiva, como por exemplo partículas de cortiça, realização de cura diferencial recorrendo a técnicas de aquecimento localizado, ou introdução de reforços como, por exemplo, tecidos de vários tipos.

O objetivo desta modificação é a tentativa de desenvolver juntas com um comportamento mais adequado às diferentes situações práticas.

O conceito de modificação tem por base o estudo da influência que a presença do elemento que vai ser introduzido tem na distribuição de tensões na camada adesiva.

São vários os autores que fizeram estudos neste âmbito conforme alguns exemplos citados de seguida.

Por exemplo, Nara G. Berry e José Roberto M. d'Almeida aplicaram uma camada de teflon na zona de junção e concluíram que o aumento do tamanho de defeito reduz a rigidez da junta e, portanto, reduz o momento fletor atuante. Assim, a máxima tensão normal a que a junta está submetida é reduzida pela introdução de defeitos. Os autores concluíram também que a introdução de defeitos centrais com geometria circular atua no sentido de reduzir a rigidez da camada de adesivo, favorecendo assim

a deformação das juntas de sobreposição simples. Embora a introdução de defeitos reduza a carga de rutura da junta, os valores máximos das tensões atuantes nesta junta são reduzidos [32].

Karachalios et. al [33] estudaram a força máxima verificada em juntas de sobreposição com a inserção de defeitos artificiais. Usaram um aço de alta resistência, AISI 01, e duas geometrias de defeitos, circulares e retangulares. O adesivo era um epóxico. Os testes foram feitos com comprimentos de sobreposição de 25mm e 40mm. O “defeito” foi um filme de teflon de 0,1mm de espessura. Concluíram que a geometria do defeito não influencia os resultados mas sim o seu tamanho.

Moura et. al [34] fizeram a simulação do comportamento mecânico de juntas coladas compósitas contendo tiras de teflon como defeito na zona de sobreposição. O aderente foi um carbono epóxico e o adesivo Araldite 420 A/B. Verificaram que as tensões máximas, nas extremidades da sobreposição, apresentam um decréscimo linear com o tamanho do defeito. A redução observada na carga máxima é ditada somente pela área de sobreposição, o que diminui com o aumento do tamanho do defeito.

Silva et. al [15] estudaram o efeito da inserção de partículas de cortiça misturadas com um adesivo epóxico Araldite 2020. Efetuaram testes em JSS com diversas concentrações de cortiça (% de cortiça no peso da mistura adesiva). Para uma concentração de 2% de cortiça obtiveram resultados piores do que as JSS sem esta adição e, neste caso consideraram que a cortiça não provocou qualquer melhoria. No caso de uma menor concentração, 1% de cortiça, a junta apresentou uma resistência superior, explicada por uma maior ductilidade do adesivo.

Um estudo sobre o efeito da introdução de um tecido foi realizado por Khalilia et. al [35]. Os autores inseriram fibras junto do adesivo demonstrando que a orientação das fibras do tecido não altera a tensão à rotura. Khalilia et. al verificaram, também, que o uso de fibras de aramida obteve melhores resultados do que os de fibras de carbono. O tipo de fibras e, possivelmente, as suas propriedades mecânicas e de ligação ao adesivo têm forte influência sobre o resultado final. Contudo não obtiveram melhoria de resultados comparativamente às juntas não reforçadas. Como conclusão verificaram que a escolha do tipo de adesivo influencia os resultados dos ensaios das juntas. Na figura 19 temos a fotografia da colocação das fibras de carbono na junta e, nas figuras 20 e 21 observamos a superfície de rotura das juntas para os reforços de fibras de carbono e de aramida respetivamente. Como informação, as roturas obtidas foram sempre coesivas.



Figura 19 - Fibras de carbono colocadas a $\pm 45^\circ$ na zona de sobreposição [35]



Figura 20 – Superfície de rotura das juntas reforçadas com fibras de carbono [35]



Figura 21 – Superfície de rotura das juntas reforçadas com fibras de aramida [35]

Os autores Solmaz e Turgut [36], inseriram dois reforços diferentes de fibra de carbono “Neoxil CE92 N8” e observaram que o tipo de reforço interfere nos resultados na medida em, que, para a mesma deformação, o segundo tecido obteve melhor resistência à rotura.

Em estudos posteriores às suas primeiras publicações sobre o tema da utilização de tecidos, Khalilia, Shokuhfara, Hoseinia, Bidkhorja, Khalilib e Mittal [37] fizeram ensaios em juntas de substrato compósito com diferentes reforços (tecido de fibra de vidro;

tecido de fibra de vidro cortado e pó de vidro). Verificaram que, ao colocar o reforço na zona de sobreposição, conseguiram melhorar muito a tensão suportada pelas juntas quando comparadas com a junta não reforçada.

3. Procedimento experimental

3.1. Materiais utilizados

3.1.1 Substratos

Utilizaram-se substratos de chapas de alumínio Al 6082 T651 com geometria retangular. As dimensões de cada substrato foram de 170mm de comprimento, 25mm de largura e 3 mm de espessura.

Na tabela 3 estão indicadas as propriedades da liga usada.

Tabela 3 – Propriedades da liga Al 6082 T651 [38]

Liga 6082	
Estado (Têmpera)	T6/T651
Resistência máxima Rm (N/mm ²)	340
Limite elástico Rp0,2 (N/mm ²)	310
Limite de Fadiga (N/ mm ²)	210
Dureza Brinel HB	95
Dureza Vickers HV	100
Módulo elástico (N/mm ²)	70.000
Peso específico (g/cm ³)	2,71
Intervalo de fusão (°C)	575-650
Coeficiente de dilatação linear (1/10 K)	23,1
Calor específico (J/KgK)	894
Resistividade elétrica (20 - μΩ cm)	39,0
Condutividade elétrica (% IACS)	44,0

3.1.2 Acabamento superficial

Nas primeiras séries realizadas, os substratos foram granalhados a seco, com jacto de granalha de vidro. Posteriormente, outras séries foram granalhadas com óxido de alumínio ref.^a F308BFA-NKF060.

O óxido de alumínio tem um poder de limpeza superior à granalha de vidro. O óxido apresenta uma dureza de 9 na escala de Mohs enquanto que a granalha de vidro tem

apenas 5 a 7 [39]. Este facto resultou numa clara influência sobre a qualidade das ligações obtidas, conforme se verá adiante na análise da superfície de rotura.

Após estas operações prévias, os substratos foram limpos com papel embebido em acetona. Foram feitas várias passagens para garantir que, de facto, a superfície se encontrava limpa.

3.1.3. Adesivo

O adesivo utilizado foi a Araldite 2015 disponibilizada em kits bicomponente conforme ilustra a figura 22. As propriedades, de acordo com indicação do fabricante, são representadas na tabela 4 [40].

A aplicação foi realizada com recurso a uma pistola e um doseador que permite a mistura da resina e do endurecedor em proporções idênticas.



Figura 22 – Araldite 2015 [41]

Tabela 4 - Propriedades do adesivo ARALDITE® 2015

ARALDITE® 2015	
Propriedade	Valor
Módulo de corte, G [GPa]	487 ± 77
Tensão de cedência ao corte, δ_v [MPa]	17.9 ± 1.8
Tensão de rotura de corte, δ_r [MPa]	17.9 ± 1.8
Deformação de rotura de corte, γ_r [%]	44
Energia crítica, J_{IIC} [N/mm]	4.70
Densidade a 25°C [g/cm ³]	1.4
Alongamento [%]	4.4

3.1.4. Reforço

O reforço utilizado foi um véu de superfície em fibra de vidro. Este material tem uma gramagem de 163 g/m².

O reforço foi cortado com o comprimento pretendido, igual ao comprimento da zona de sobreposição da junta e, com largura um pouco superior à do provete, cerca de 30mm.

O reforço foi colocado na junta conforme esquema da figura 23.

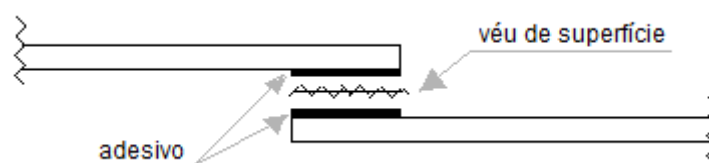


Figura 23 – Colocação do reforço na JSS

3.1.5. Junta de sobreposição simples

Foram fabricadas 30 juntas de sobreposição simples com a geometria representada na figura 24.

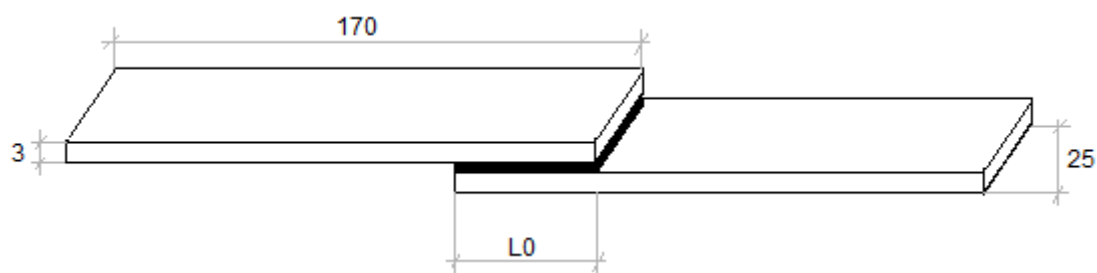


Figura 24 – Dimensões da JSS (em mm)

Para o comprimento da zona de sobreposição adotaram-se dimensões nominais de 20, 30 e 40mm.

3.1.5.1. Processo de fabrico da junta de sobreposição

Após os passos referidos, de preparação dos substratos (acabamento superficial), foi aplicada a 1ª camada de adesivo e, colocado o 1º reforço. Aplicou-se novamente uma nova camada de adesivo e, colocado o 2º reforço. Finalmente aplicou-se a 3ª e última camada de adesivo. Seguimos estes passos para garantir que o reforço ficasse bem impregnado com o adesivo e centrado na camada adesiva.

Os substratos foram fixos com molas até à cura do adesivo e, simultaneamente, prendeu-se o excedente do reforço com molas para que não tivesse deslocação (ver figura 25).



Figura 25 – Juntas de sobreposição

Após o processo de cura, que decorreu durante 24 horas, foi retirado o excesso de adesivo e reforço com utilização de uma lixa e uma mó apropriada.

Em seguida foram colados calços nas extremidades das juntas para que durante os ensaios de tração se garanta a simetria no aperto (ver figura 26).

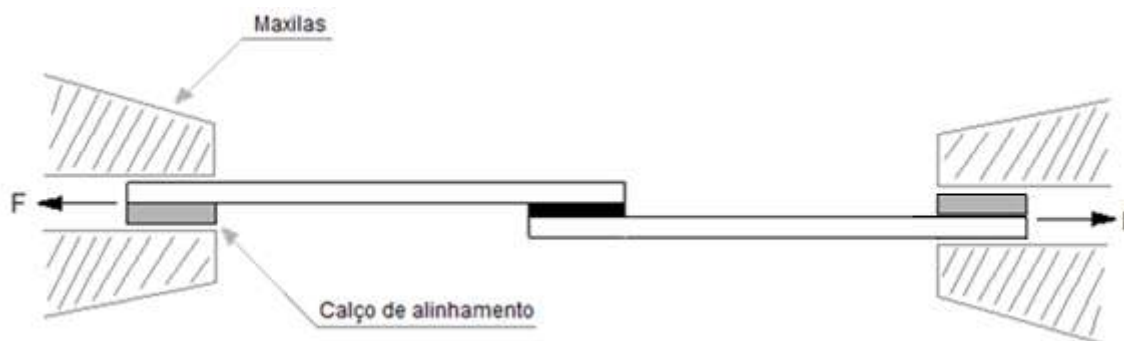


Figura 26 – Solicitação da junta no ensaio de tração

Recorrendo a um paquímetro digital todas as juntas foram medidas para obtenção das dimensões reais do comprimento de sobreposição e espessura do adesivo. A espessura média do adesivo com reforço, obtida nas várias juntas, foi de 0,54mm.

3.1.6. Avaliação do comportamento mecânico

As juntas foram sujeitas a ensaio de tração até à rotura. Para o efeito utilizou-se uma máquina universal de ensaios Shimadzu (figura 27) com capacidade máxima de 100kN.



Figura 27 – Provete na máquina de ensaios Shimadzu

Em todos os ensaios a velocidade de deslocamento do travessão usada foi de 1 mm/min.

4. Resultados

4.1. Juntas adesivas não reforçadas

Para o estabelecimento de comparação entre juntas sem reforço e com reforço, foram realizados primeiramente ensaios sobre juntas idênticas mas sem qualquer reforço na zona de sobreposição. Estas juntas foram granalhadas com granalha de vidro. As medições antes dos ensaios são indicadas na tabela 5 e os resultados obtidos são indicados na tabela 6.

Tabela 5 – Comprimento de sobreposição juntas não reforçadas (1º Ensaio)

Provetes	Comprimento sobreposição (mm)
N1-1	30,46
N2-1	30,04
N3-1	28,30
N4-1	29,30
N5-1	31,20

Tabela 6 - Dados obtidos e calculados no 1º Ensaio

Provetes	F _{máx} (N)	Média F _{máx} (N)	Tensão máx (MPa)	Média tensão máx (MPa)	Deslocamento (mm)	Média deslocamento (mm)
N1-1	10748,1		14,11		2,23	
N2-1	9125,42		12,15		1,65	
N3-1	8817,15	8943,36	12,46	11,99	2,13	1,86
N4-1	8325,93		11,37		1,84	
N5-1	7700,21		9,87		1,46	

A figura 28 ilustra o andamento da curva força vs deslocamento. É possível observar um comportamento aproximadamente linear até à ocorrência da rotura.

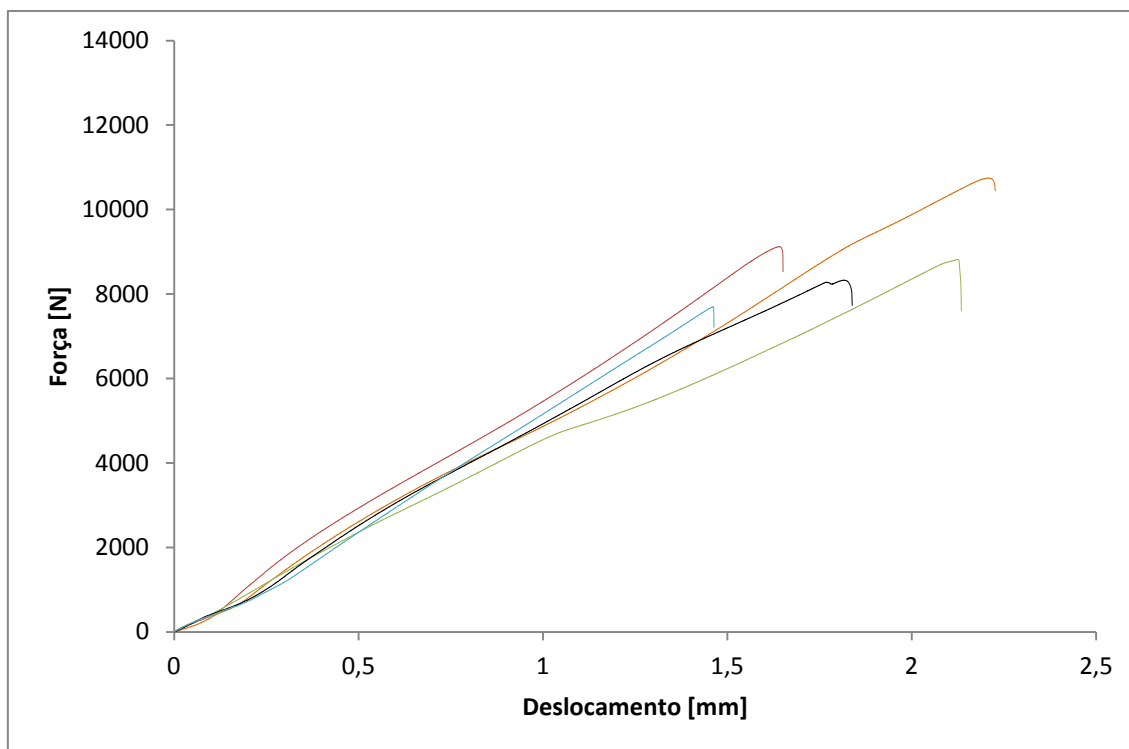


Figura 28 – Gráfico força-deslocamento para 5 ensaios em juntas não reforçadas

4.2. Juntas adesivas reforçadas

Após os ensaios das JSS não reforçadas procedemos aos ensaios das JSS com reforço.

Nos pontos 4.2.1. a 4.2.5. podemos ver os resultados dos ensaios de tração às JSS com reforço.

4.2.1. Resultados para o comprimento nominal de sobreposição de 20mm (granalha de vidro)

A primeira situação de JSS adesivas reforçadas a analisar é para um comprimento nominal de sobreposição de 20mm. Os substratos foram sujeitos a tratamento superficial com granalha de vidro.

As medições antes dos ensaios são indicadas na tabela 7 e os resultados obtidos são indicados na tabela 8.

Tabela 7 – Comprimento de sobreposição efetivo das juntas reforçadas (série Cx_2)

Provetes	Comprimento sobreposição (mm)
C1-2	21
C2-2	20
C3-2	19
C4-2	21
C5-2	19

Tabela 8 – Dados obtidos e calculados da série Cx_2

Provetes	F _{máx} (N)	Média F _{máx} (N)	Tensão máx (MPa)	Média tensão máx (MPa)	Deslocamento (mm)	Média deslocamento (mm)
C1-2	7017,55		13,37		1,08	
C2-2	6716,22		11,07		1,08	
C3-2	6236,71	6424,54	13,13	12,19	0,81	0,96
C4-2	5845,99		12,01		1,00	
C5-2	6306,24		11,37		0,82	

A figura 29 ilustra o andamento da curva força vs deslocamento. É possível observar um comportamento aproximadamente linear até à ocorrência da rotura.

A tensão média encontrada é, aproximadamente, equivalente à tensão média obtida nas juntas não reforçadas enquanto que o deslocamento na rotura reduziu sensivelmente para metade.

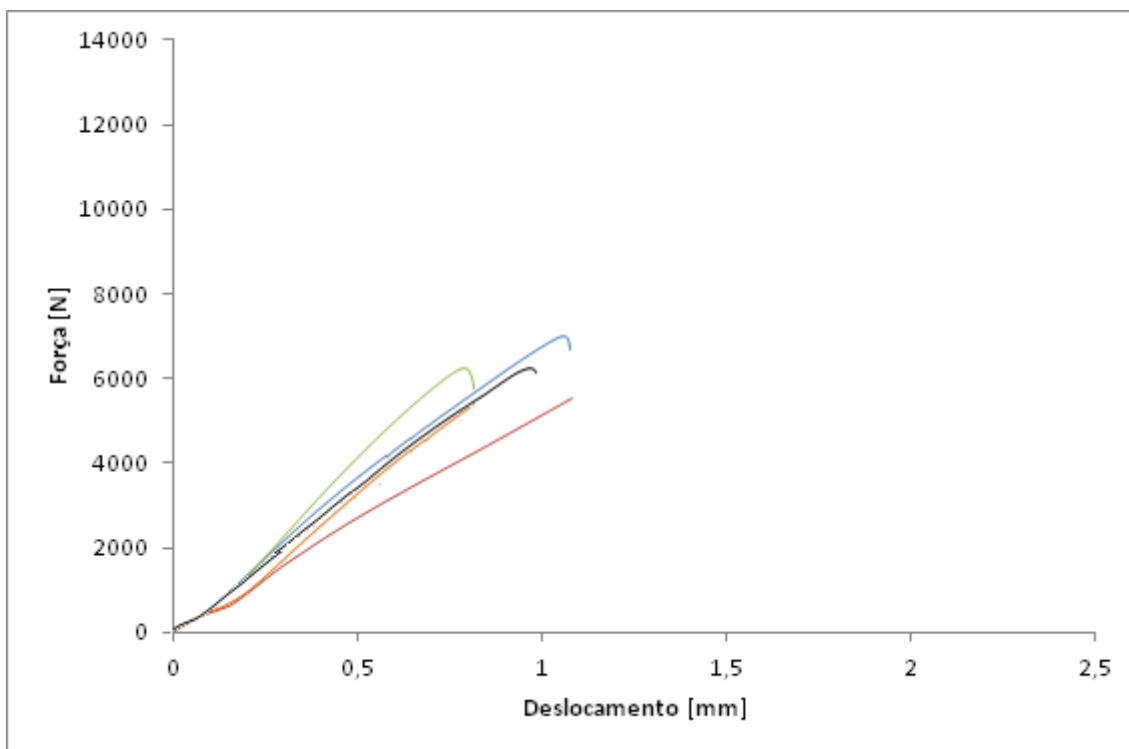


Figura 29 – Gráfico com curvas força-deslocamento para as juntas reforçadas de 20mm de comprimento de sobreposição e tratamento superficial com granalha de vidro

4.2.2. Resultados para o comprimento nominal de sobreposição de 20mm (granalha de óxido de alumínio)

A segunda análise de JSS adesivas reforçadas é para um comprimento nominal de sobreposição de 20mm e com substratos sujeitos a tratamento superficial com óxido de alumínio. A decisão de repetir esta condição para um tratamento superficial diferente resultou da verificação da forte influência das condições da superfície para juntas em que as forças de rotura atingiam valores mais altos e a rotura passava de coesiva a adesiva.

As medições antes dos ensaios são indicadas na tabela 9 e os resultados obtidos são indicados na tabela 10.

Tabela 9 – Comprimento de sobreposição das juntas reforçadas (série Cx_4)

Provetes	Comprimento sobreposição (mm)
C1-4	21,48
C2-4	19,52
C3-4	21,75
C4-4	22,09
C5-4	21,78

Tabela 10 – Dados obtidos e calculados da série Cx_4

Provetes	F _{máx} (N)	Média F _{máx} (N)	Tensão máx (MPa)	Média tensão máx (MPa)	Deslocamento (mm)	Média deslocamento (mm)
C1-4	7657,21		14,26		1,34	
C2-4	7803,92		15,99		1,08	
C3-4	8078,02	7672,01	14,86	14,43	1,26	1,16
C4-4	7547,28		13,67		1,08	
C5-4	7273,61		13,35		1,03	

A figura 30 ilustra o andamento da curva força vs deslocamento. O comportamento é aproximadamente linear até à ocorrência de rotura. Os resultados mostram um aumento da tensão média e um ligeiro incremento do deslocamento máximo.

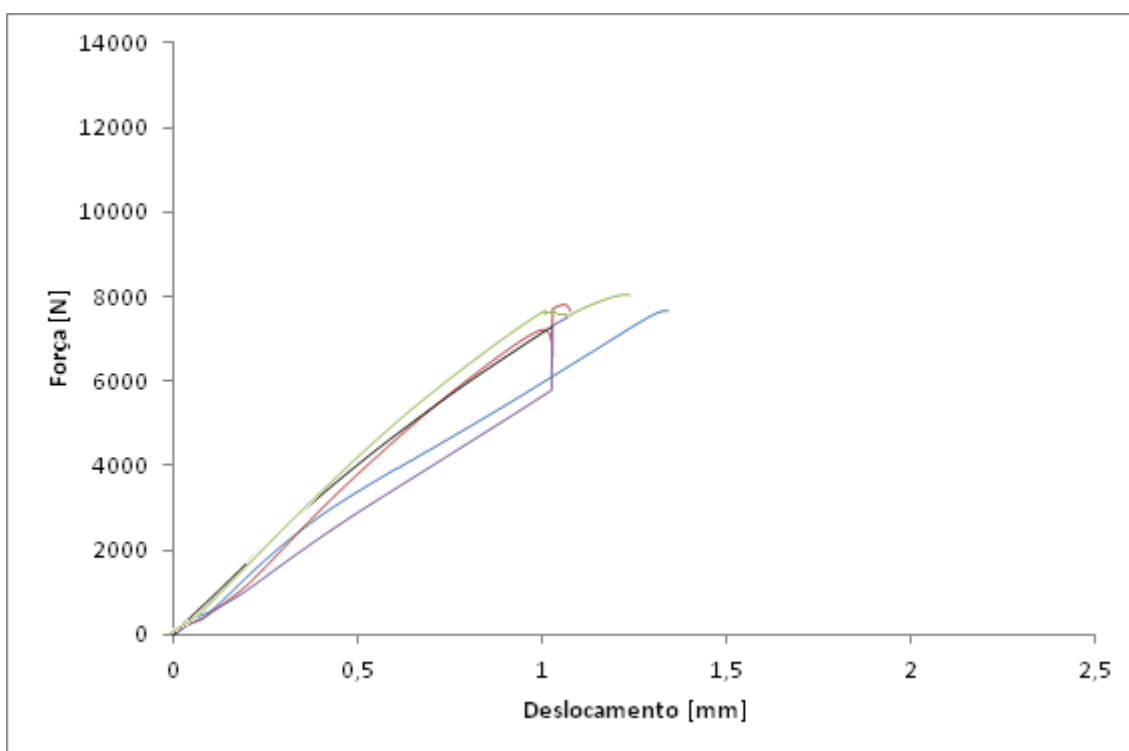


Figura 30 - Gráfico com curvas força-deslocamento para as juntas reforçadas de 20mm de comprimento de sobreposição e tratamento superficial com granalha de óxido de alumínio

4.2.3. Resultados para o comprimento nominal de sobreposição de 30mm (granalha de vidro)

A terceira análise de JSS adesivas reforçadas é para um comprimento nominal de sobreposição de 30mm em que os substratos foram sujeitos a tratamento superficial com granalha de vidro.

As medições antes dos ensaios são indicadas na tabela 11 e os resultados obtidos são indicados na tabela 12.

Tabela 11 – Comprimento de sobreposição das juntas reforçadas (série Cx_1)

Provetes	Comprimento sobreposição (mm)
C1-1	30,38
C2-1	33,81
C3-1	30,50
C4-1	25,92
C5-1	28,70

Tabela 12 – Dados obtidos e calculados da série Cx_1

Provetes	F _{máx} (N)	Média F _{máx} (N)	Tensão máx (MPa)	Média tensão máx (MPa)	Deslocamento (mm)	Média deslocamento (mm)
C1-1	8415,78		11,08		1,80	
C2-1	9305,91		11,01		1,70	
C3-1	7548,98	7896,48	9,90	10,60	1,67	1,73
C4-1	7917,20		12,22		2,01	
C5-1	6294,55		8,77		1,48	

A figura 31 ilustra o andamento da curva força vs deslocamento. É possível observar um comportamento aproximadamente linear até à ocorrência da rotura.

Comparativamente com os resultados em juntas não reforçadas, a média da tensão máxima é ligeiramente inferior. O deslocamento máximo é, sensivelmente, igual ao obtido em juntas não reforçadas.

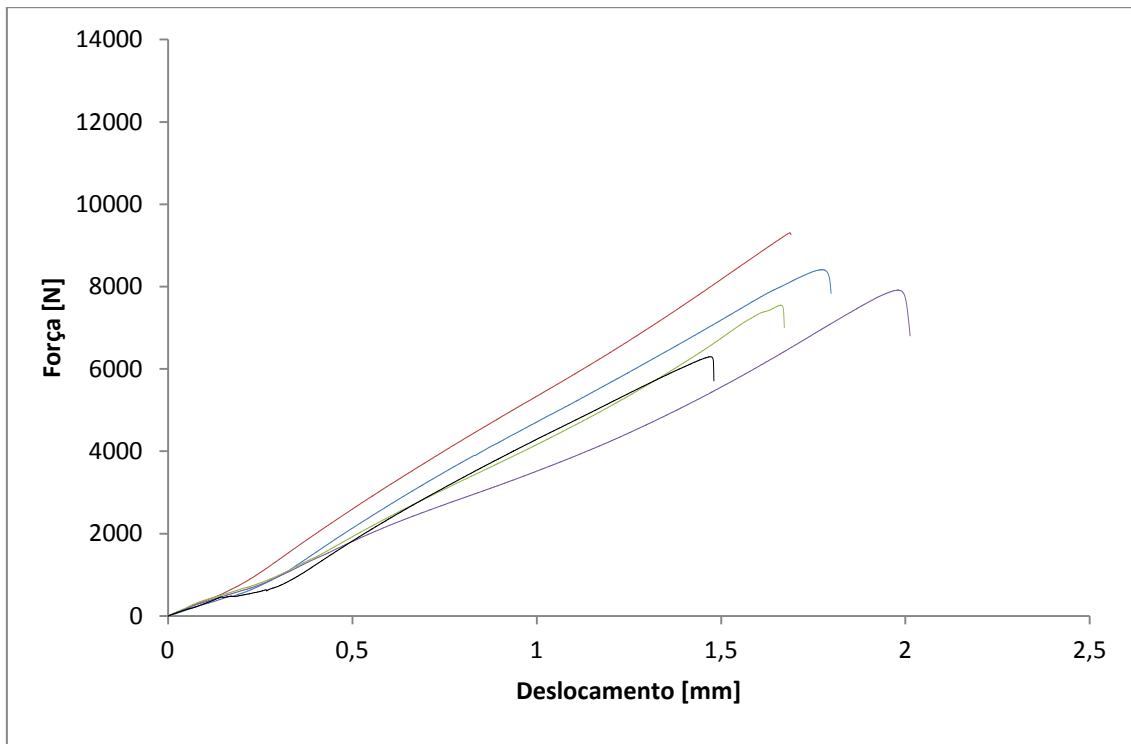


Figura 31 – Gráfico com curvas força-deslocamento para as juntas reforçadas de 30mm de comprimento de sobreposição e tratamento superficial com granalha de vidro

4.2.4. Resultados para o comprimento nominal de sobreposição de 40mm (granalha de vidro)

A seguinte análise de JSS adesivas reforçadas é para um comprimento nominal de sobreposição de 40mm em que os substratos foram sujeitos a tratamento superficial com granalha de vidro.

As medições antes dos ensaios são indicadas na tabela 13 e os resultados obtidos são indicados na tabela 14.

Tabela 13 – Comprimento de sobreposição das juntas reforçadas (série Cx_3)

Provetes	Comprimento sobreposição (mm)
C1-3	40
C2-3	39
C3-3	40
C4-3	39
C5-3	40

Tabela 14 – Dados obtidos e calculados da série Cx_3

Provetes	F _{máx} (N)	Média F _{máx} (N)	Tensão máx (MPa)	Média tensão máx (MPa)	Deslocamento (mm)	Média deslocamento (mm)
C1-3	7499,84		7,50		1,61	
C2-3	7209,08		7,39		1,33	
C3-3	8221,17	7061,77	8,22	6,71	1,37	1,16
C4-3	4993,88		5,12		0,74	
C5-3	7384,86		5,31		0,74	

A figura 32 ilustra o andamento da curva força vs deslocamento. É possível observar um comportamento aproximadamente linear até à ocorrência da rotura. Dos cinco ensaios realizados, dois apresentaram valores bastante inferiores, demonstrando uma maior variabilidade nos resultados obtidos. Como consequência, a tensão máxima é bastante inferior ao expectável. A explicação reside no facto de nesta série se ter verificado rotura adesiva, o que demonstra um mau acabamento da zona de sobreposição para este nível de carregamento.

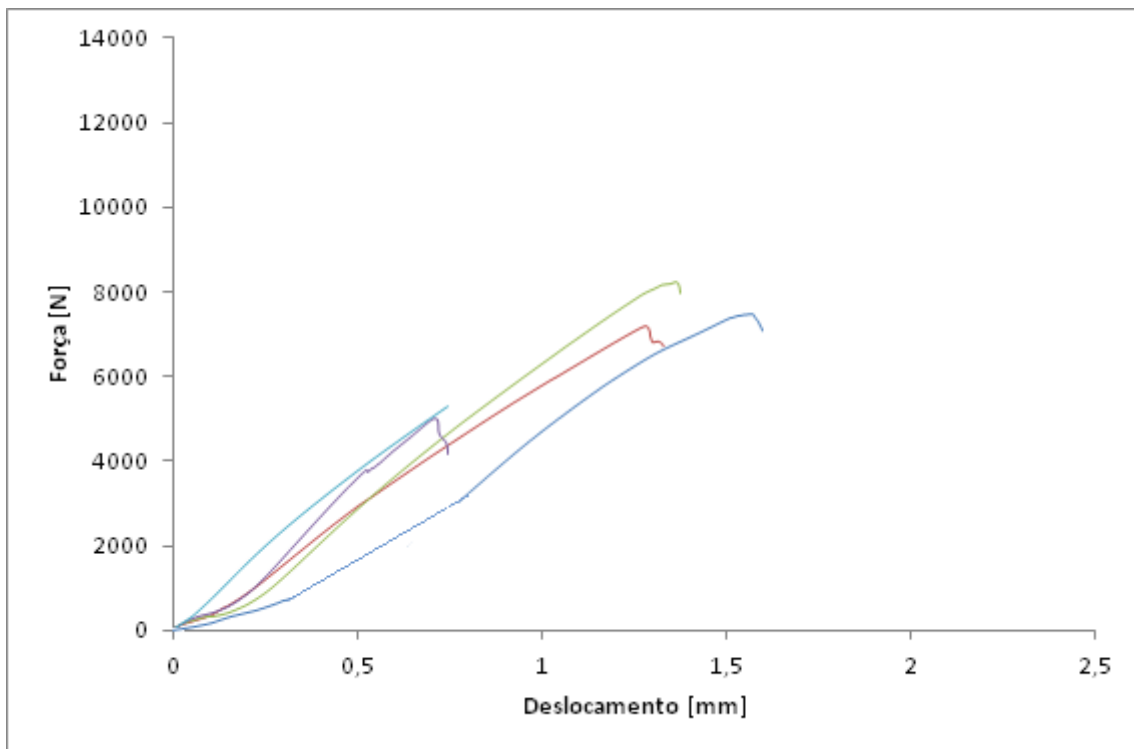


Figura 32 - Gráfico com curvas força-deslocamento para as juntas reforçadas de 40mm de comprimento de sobreposição e tratamento superficial com granelha de vidro

4.2.5. Resultados para o comprimento nominal de sobreposição de 40mm (granalha de óxido de alumínio)

A última análise de JSS adesivas reforçadas é para um comprimento nominal de sobreposição de 40mm em que os substratos foram sujeitos a tratamento superficial com óxido de alumínio.

As medições antes dos ensaios são indicadas na tabela 15 e os resultados obtidos são indicados na tabela 16.

Tabela 15 – Comprimento de sobreposição das juntas reforçadas (série Cx_5)

Provetes	Comprimento sobreposição (mm)
C1-5	41,95
C2-5	39,37
C3-5	41,47
C4-5	40,00
C5-5	37,78

Tabela 16 – Dados obtidos e calculados da série Cx_5

Provetes	F _{máx} (N)	Média F _{máx} (N)	Tensão máx (MPa)	Média tensão máx (MPa)	Deslocamento (mm)	Média deslocamento (mm)
C1-5	13216		12,60		1,94	
C2-5	12485		12,56		1,94	
C3-5	12000	12414	12,68	12,31	1,94	1,83
C4-5	12334		10,97		1,69	
C5-5	12035		12,74		1,63	

A figura 33 ilustra o andamento das curvas força vs deslocamento. É possível observar um comportamento aproximadamente linear até à ocorrência da rotura. A dispersão de resultados é francamente menor. A tensão máxima é cerca do dobro da encontrada com o tratamento de granalha de vidro. Também o deslocamento médio é inferior ao encontrado nas juntas granalhadas com vidro.

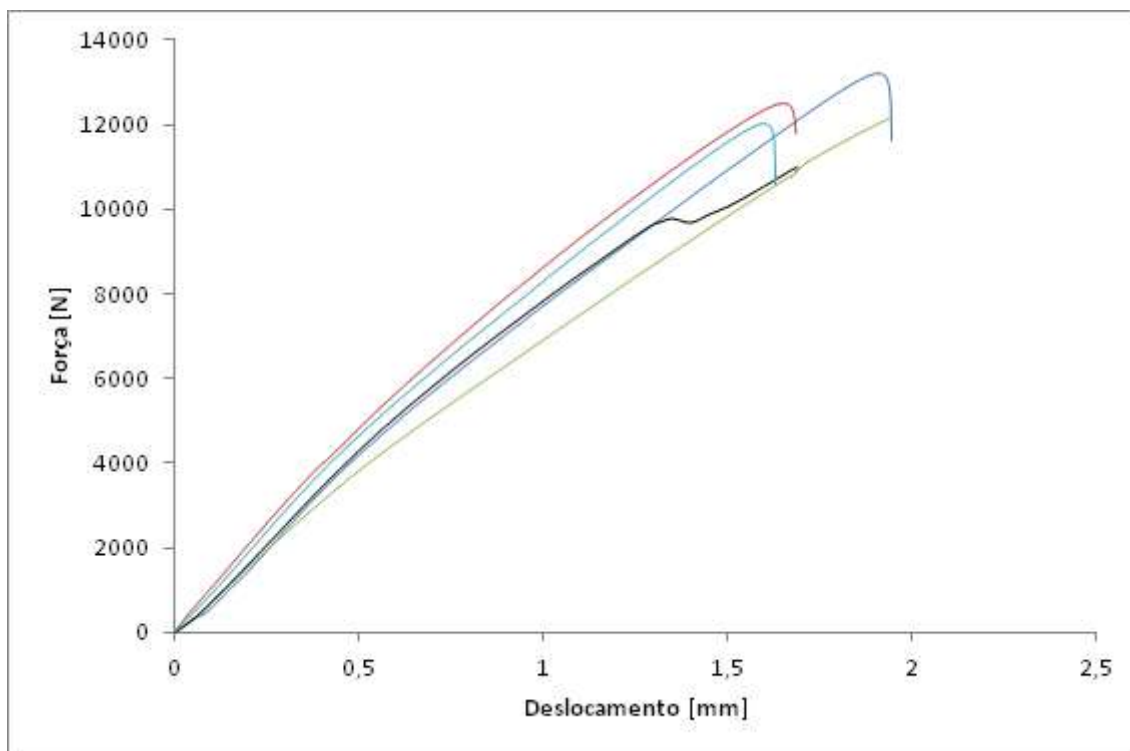


Figura 33 - Gráfico com curvas força-deslocamento para as juntas reforçadas de 40mm de comprimento de sobreposição e tratamento superficial com óxido de alumínio

4.3. Síntese dos resultados de comportamento mecânico

Da análise global de todos os gráficos vistos anteriormente verificamos que, o acabamento superficial influenciou efetivamente a capacidade das JSS resistirem às cargas de tração.

Nas JSS sem reforço e nas JSS com reforço das séries Cx_1 a Cx_3 foi usada a granalha de vidro e, nos dois últimos ensaios óxido de alumínio. Esta alteração provocou um melhor acabamento superficial e, desde logo uma maior aderência do adesivo ao substrato, obtendo-se melhores resultados.

Apesar das forças máximas atingidas serem importantes, não são o principal dado a analisar pois, importa considerar a área de sobreposição. Assim, a tensão máxima atingida dá-nos a percepção mais real se conseguimos atingir o objetivo do trabalho. Pelas diversas séries de JSS analisadas, conforme tabela 17, podemos concluir:

- as JSS das séries Cx_4 e Cx_5 apresentam melhores resultados a nível de tensão máxima do que todas as outras e, foram as que tiveram o acabamento superficial com o óxido de alumínio;
- para o mesmo comprimento de sobreposição de 30mm a série não reforçada apresentou maior resistência do que a reforçada;
- nas séries das JSS Cx_1 a Cx_3, todas com acabamento superficial de fibra de vidro, não se verifica um aumento da resistência mecânica proporcional ao aumento do comprimento de sobreposição pois, a junta com 30mm foi a que obteve maior resistência. Concluimos, também, que a junta com 40mm de sobreposição tem um decréscimo acentuado da resistência mecânica comparativamente às outras JSS;
- a série Cx_4 apresenta uma tensão máxima superior à série Cx_5 apesar da série Cx_5 ter atingido força máxima de 13200N enquanto que a Cx_4 apenas atingiu os 8078N. O efeito do comprimento de sobreposição afecta significativamente e, assim a série Cx_4 foi a melhor do nosso estudo.

Tabela 17 – Tensão máxima atingida pelas JSS

Série da JSS	Tensão máxima (MPa)					Tensão máxima média (MPa)
	1	2	3	4	5	
N (30mm) - GV	14,11	12,15	12,46	11,37	9,87	11,99
Cx_2 (20mm) - GV	13,37	11,07	13,13	12,01	11,37	12,19
Cx_4 (20mm) - OA	14,26	15,99	14,86	13,67	13,35	14,43
Cx_1 (30mm) - GV	11,08	11,01	9,90	12,22	8,77	10,60
Cx_3 (40mm) - GV	7,50	7,39	8,22	5,12	5,31	6,71
Cx_5 (40mm) - OA	12,60	12,56	12,68	10,97	12,74	12,31

N – Série JSS Não Reforçada com o comprimento de sobreposição indicado

Cx – Série JSS Reforçada com o comprimento de sobreposição indicado

GV – Acabamento superficial com granalha de vidro

OA – Acabamento superficial com óxido de alumínio

No gráfico da figura 34, observamos que para um menor comprimento de sobreposição (cerca de 20mm) obtivemos maior tensão máxima. Na figura 35 a tensão média máxima atinge-se para os comprimentos médios de sobreposição de 20 e 40mm.

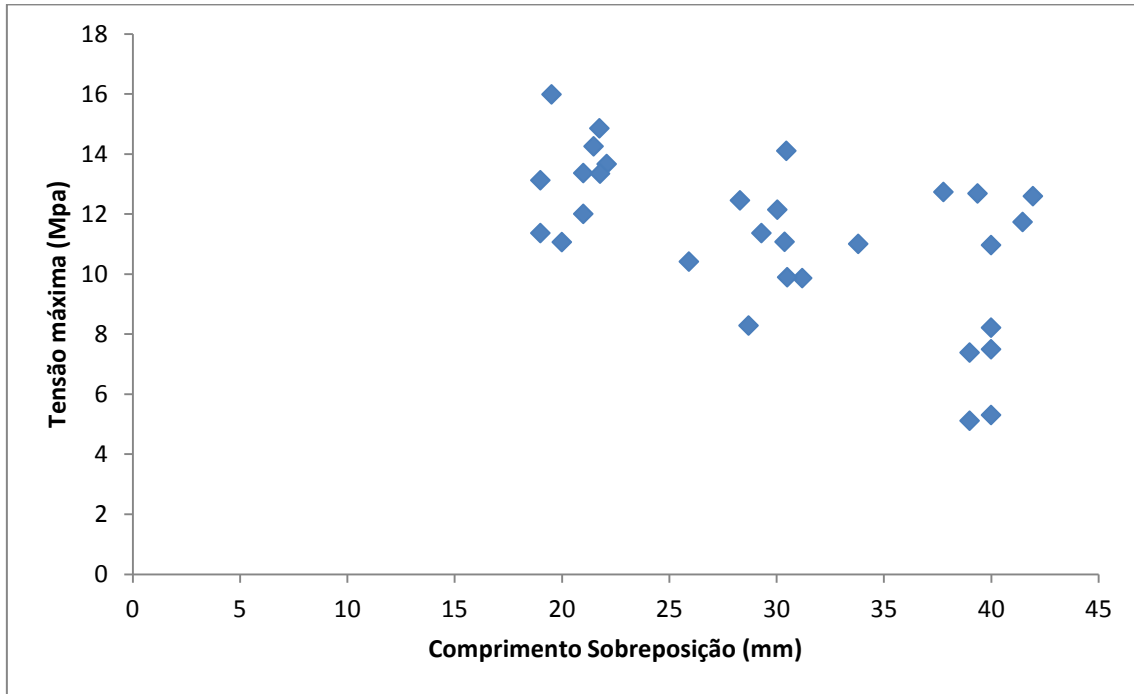


Figura 34 - Tensão máxima vs. comprimento de sobreposição de todas as juntas ensaiadas

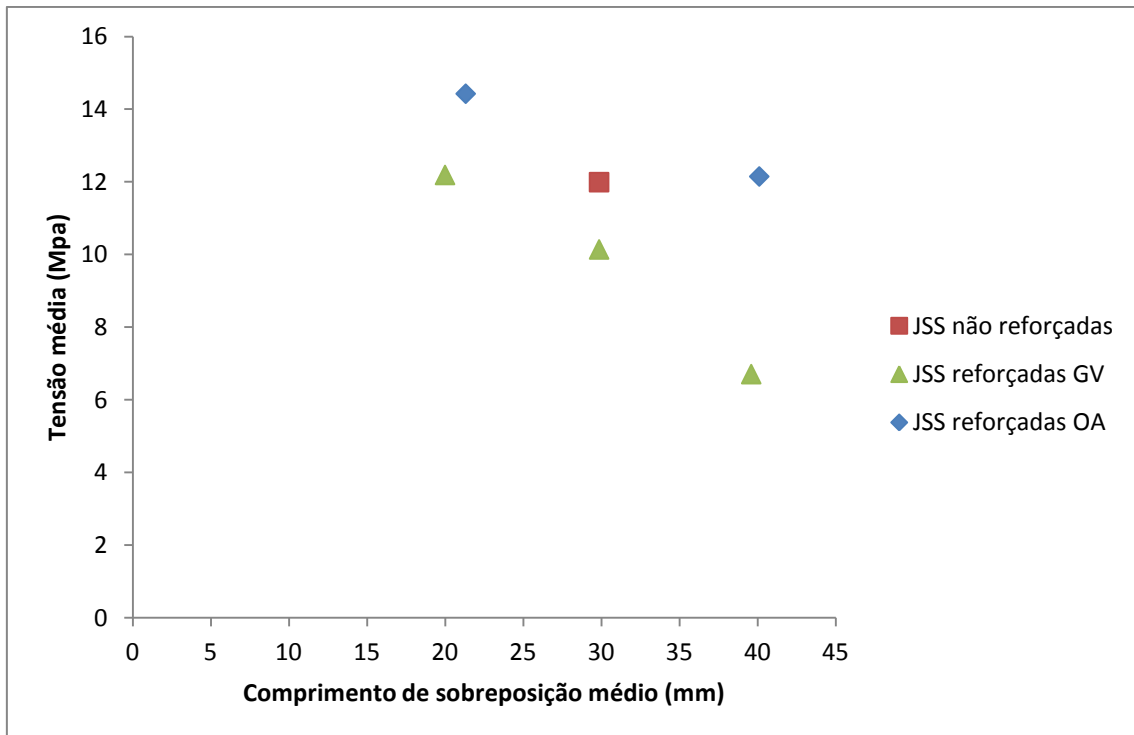


Figura 35 - Tensão máxima média vs. comprimento de sobreposição médio de todas as juntas ensaiadas

Nos gráficos das figuras 36 a 40 podemos visualizar a Força vs. Deslocamento de todas as JSS.

No gráfico da figura 36, vemos que as JSS não reforçadas comparativamente às JSS reforçadas da série Cx_1 apresentaram melhores resultados a nível de deslocamento e força de rotura.

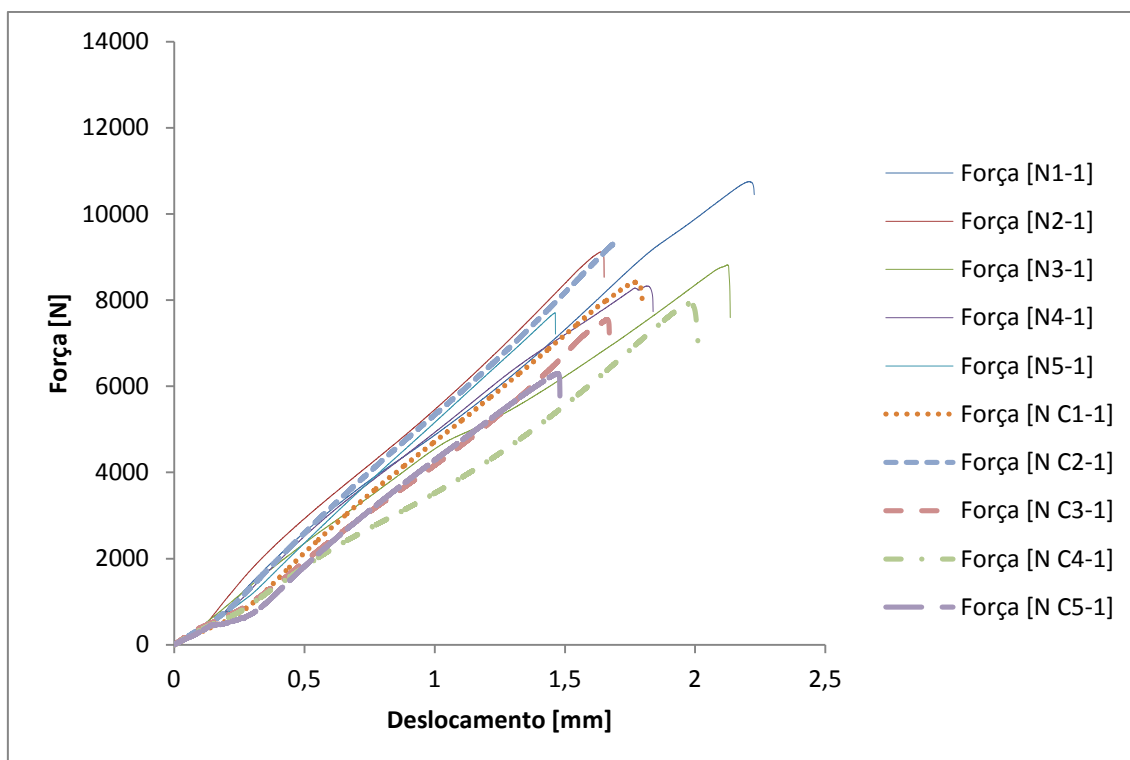


Figura 36 – Gráfico comparativo força vs. deslocamento das juntas não reforçadas / juntas reforçadas de 30mm de comprimento de sobreposição e tratamento superficial com granalha de vidro

No gráfico da figura 37, vemos que as JSS não reforçadas comparativamente às JSS reforçadas da série Cx_2 apresentaram muito melhores resultados a nível de deslocamento e força de rotura.

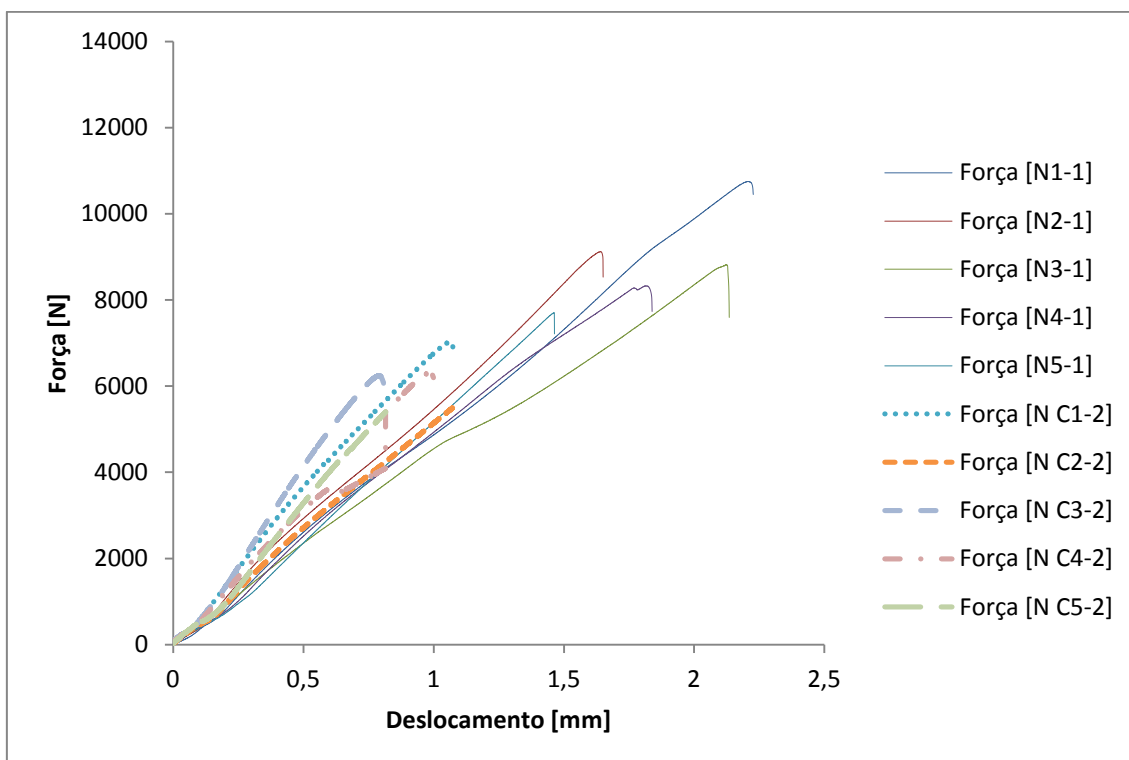


Figura 37 – Gráfico comparativo força vs. deslocamento das juntas não reforçadas / juntas reforçadas de 20mm de comprimento de sobreposição e tratamento superficial com granalha de vidro

No gráfico da figura 38, as JSS não reforçadas comparativamente às JSS reforçadas da série Cx_3 apresentaram melhores resultados a nível de deslocamento e força de rotura.

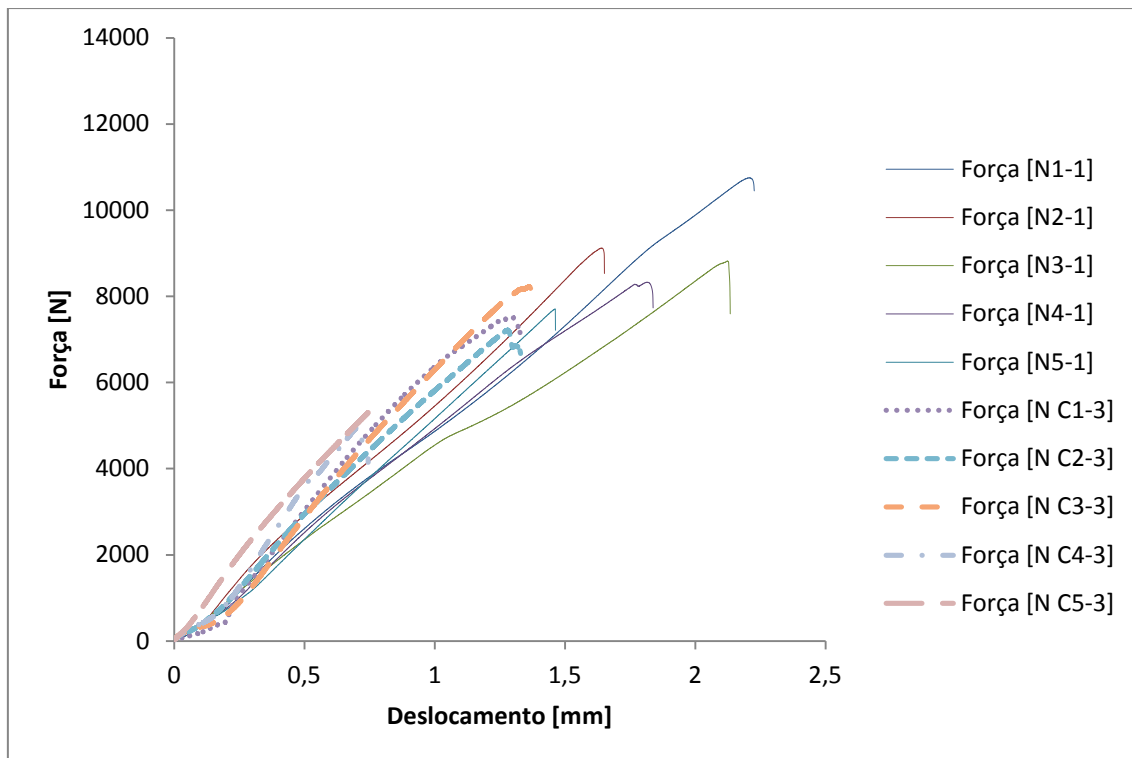


Figura 38 – Gráfico comparativo força vs. deslocamento das juntas não reforçadas / juntas reforçadas de 40mm de comprimento de sobreposição e tratamento superficial com granalha de vidro

No gráfico da figura 39, as JSS não reforçadas comparativamente às JSS reforçadas da série Cx_4 apresentaram muito melhores resultados a nível de deslocamento e força de rotura.

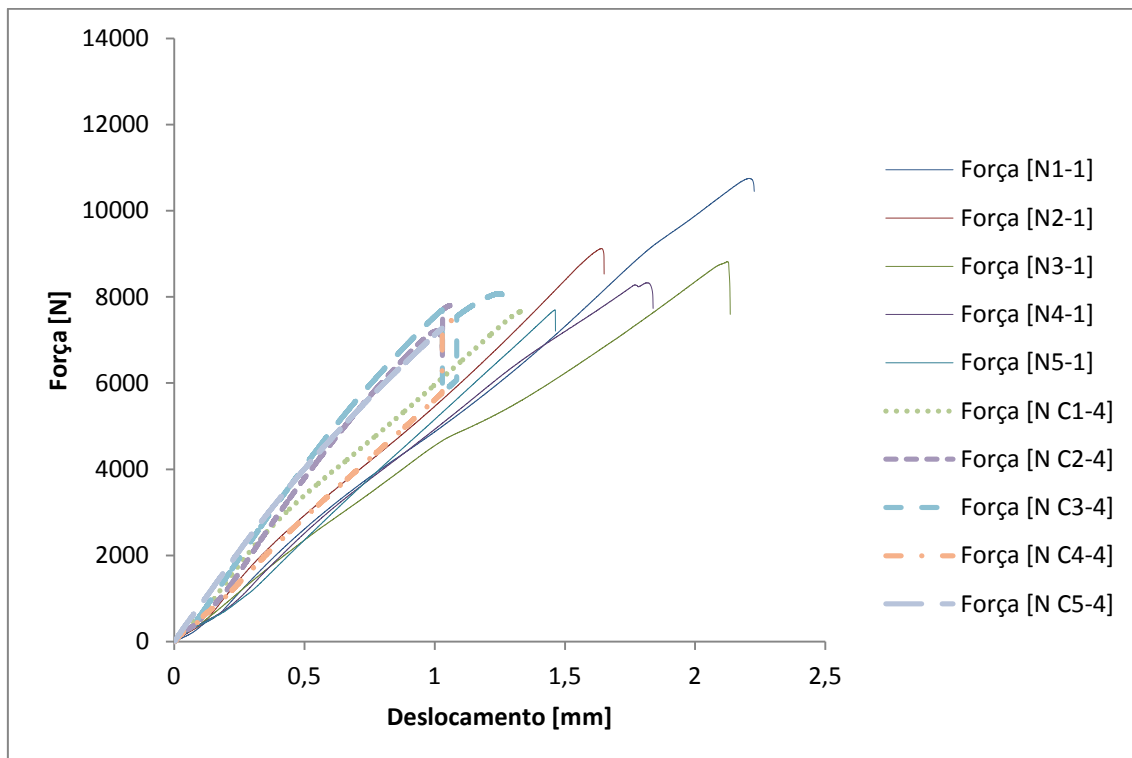


Figura 39 – Gráfico comparativo força vs. deslocamento das juntas não reforçadas / juntas reforçadas de 20mm de comprimento de sobreposição e tratamento superficial com óxido de alumínio

No gráfico da figura 40, as JSS não reforçadas e as JSS reforçadas da série Cx_5 apresentaram resultados semelhantes a nível de deslocamento. Mas as JSS reforçadas apresentam melhor força de rotura.

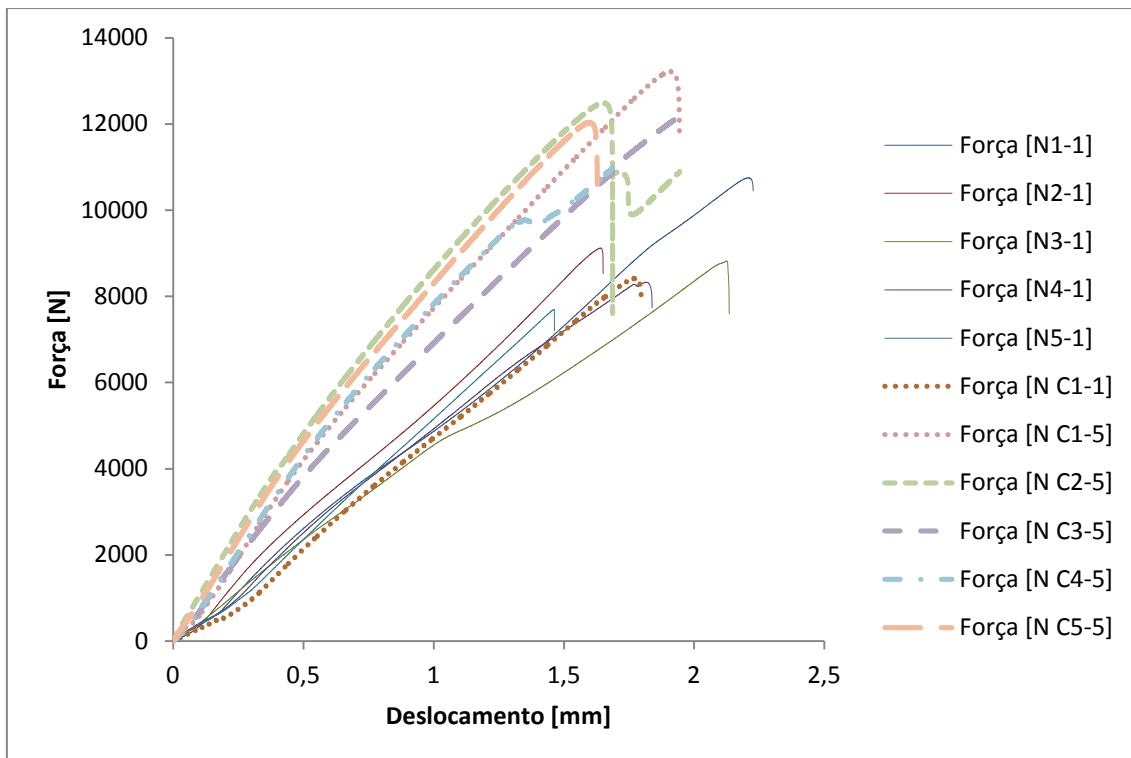


Figura 40 – Gráfico comparativo força vs. deslocamento das juntas não reforçadas / juntas reforçadas de 40mm de comprimento de sobreposição e tratamento superficial com óxido de alumínio

No gráfico da figura 41 temos o intervalo de comprimento de sobreposição vs deslocamento para todas as JSS analisadas. Podemos verificar que a maior parte das JSS não reforçadas tiveram maior deslocamento quando comparadas com as JSS reforçadas. Também é visível que não há uma relação entre o comprimento de sobreposição e o deslocamento obtidos.

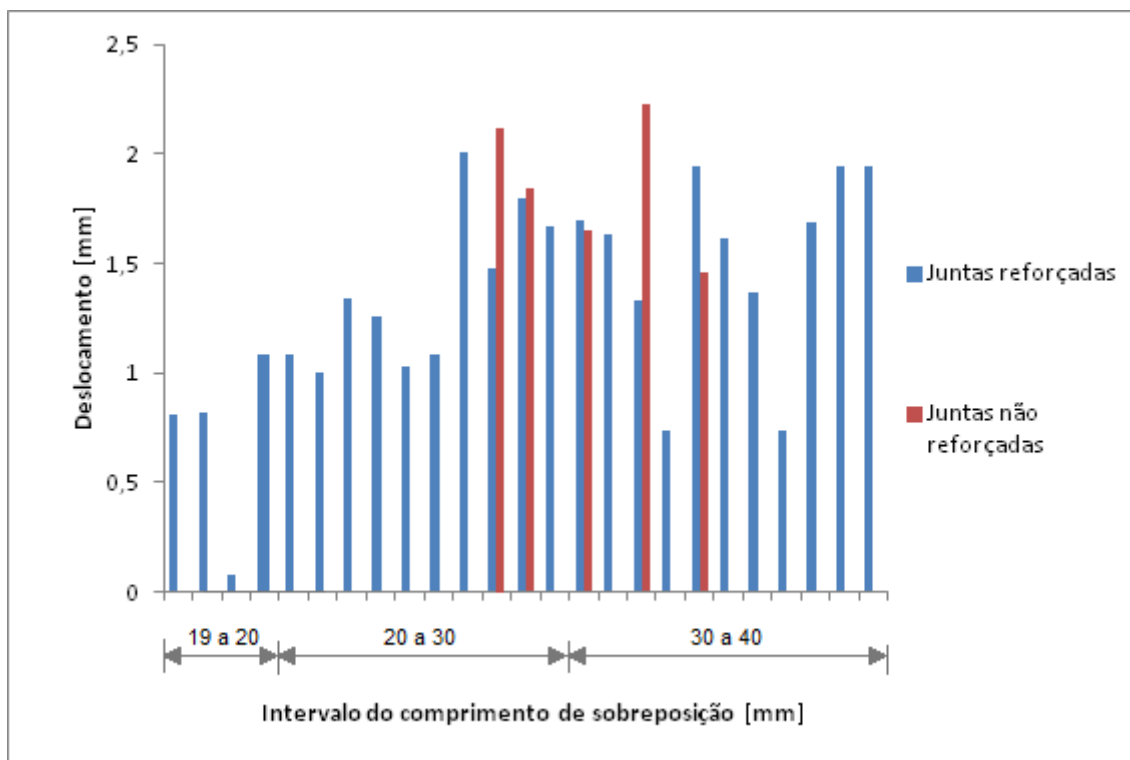


Figura 41 – Variação deslocamento vs. comprimento de sobreposição

No gráfico da figura 42 temos o comprimento de sobreposição nominal vs deslocamento máximo para as JSS reforçadas e não reforçadas com um acabamento superficial de granalha de vidro. Mais uma vez, verificamos que as JSS não reforçadas tiveram maior deslocamento quando comparadas com as JSS reforçadas. Ainda assim, os deslocamentos obtidos superiores foram para os comprimentos de sobreposição de 30 e 40mm.

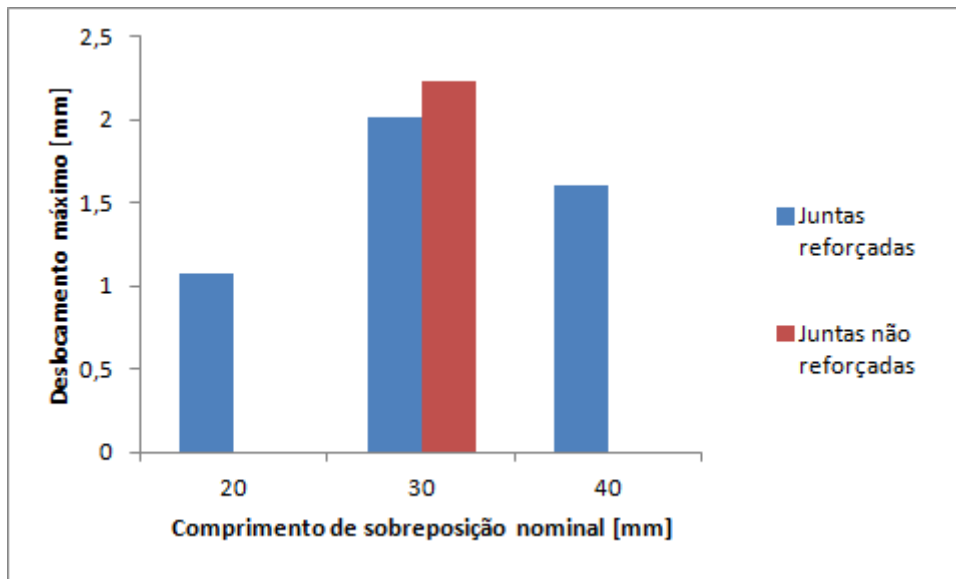


Figura 42 – Gráfico comprimento de sobreposição nominal vs deslocamento máximo

No gráfico da figura 43 temos o comprimento de sobreposição nominal vs deslocamento máximo para as JSS reforçadas com um acabamento superficial de granalha de vidro (GV) e de óxido de alumínio (AO). Neste gráfico pode-se comparar para o mesmo comprimento de sobreposição qual o deslocamento obtido com a alteração do tipo de acabamento superficial. Aqui é notória a melhoria no deslocamento devido ao efeito da alteração de acabamento superficial.

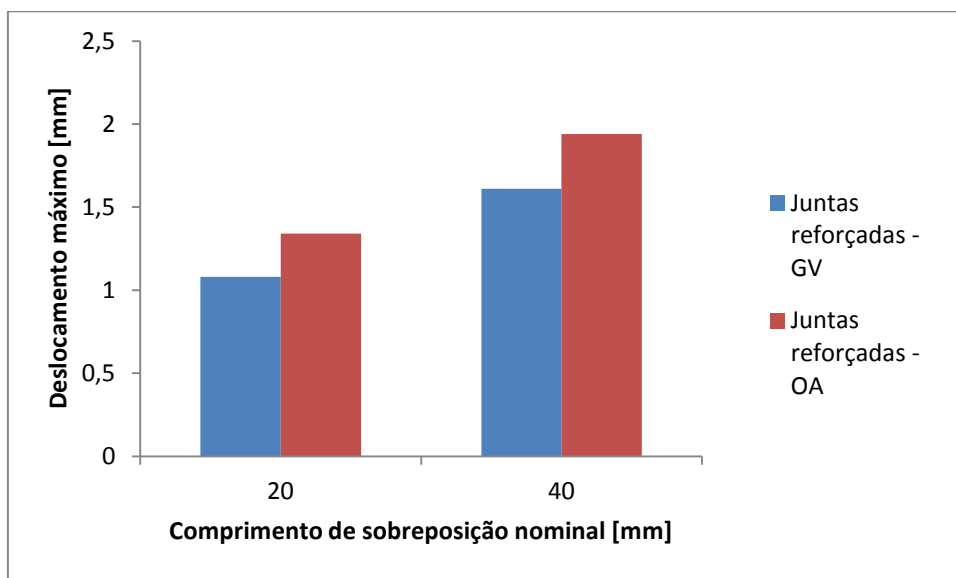


Figura 43 – Comparação comprimento de sobreposição nominal vs deslocamento máximo entre juntas granalhadas com microesferas de vidro e com óxido de alumínio

4.4. Análise da superfície de rotura

Como referido no ponto anterior, o acabamento superficial é um fator muito importante nestes estudos.

De acordo com Nuno Ferreira [42], a rotura esperada para o adesivo Araldite 2015 aplicado a substratos de alumínio é do tipo mista (coesiva e adesiva).

Estudos realizados em provetes de aço com o adesivo Araldite 2015, por Filipe Magalhães [43], obtiveram-se roturas coesivas tal como obtivemos neste trabalho. A rotura coesiva ocorre quando o processo de rotura ocorre no seio do polímero que constitui o adesivo. Neste caso, as superfícies de ambos os substratos ficam cobertas com adesivo. Em termos de performance e controlo de qualidade é recomendável verificar-se uma rutura coesiva [44]. No caso de juntas reforçadas é interessante analisar o local de ocorrência de rotura. A presença do tecido permite que a rotura ocorra a meio da espessura do adesivo e este facto foi sempre observável para os casos em que garantidamente se obteve uma conveniente preparação de superfície.

Nas figuras 44 a 46 temos fotografias das JSS não reforçadas. Todas as juntas desta série apresentam uma rotura adesiva pois, a rotura aconteceu entre o adesivo e um dos substratos. Este tipo de rotura deve-se a um mau acabamento superficial tendo estas juntas sido granalhadas com a granalha de vidro. A rugosidade superficial parece ser um parâmetro a considerar, remetendo o processo de ligação para uma grande preponderância de efeito de ancoragem do adesivo.

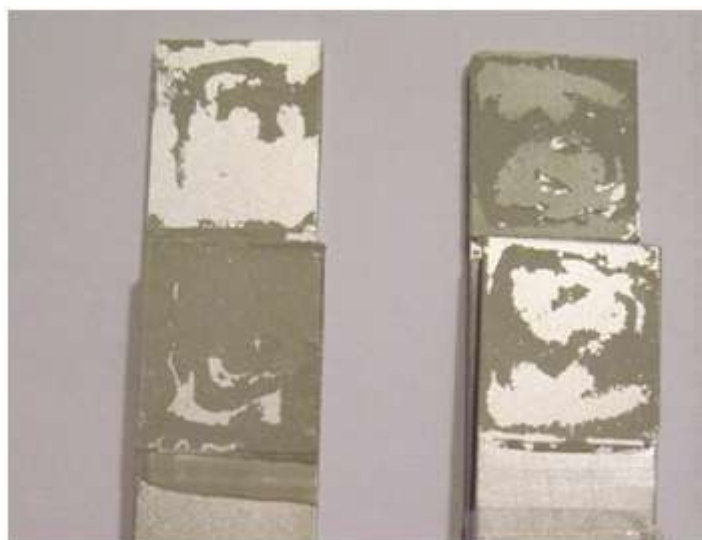


Figura 44 – Juntas não reforçadas N1_1 e N2_1



Figura 45 – Juntas não reforçadas N3_1 e N4_1

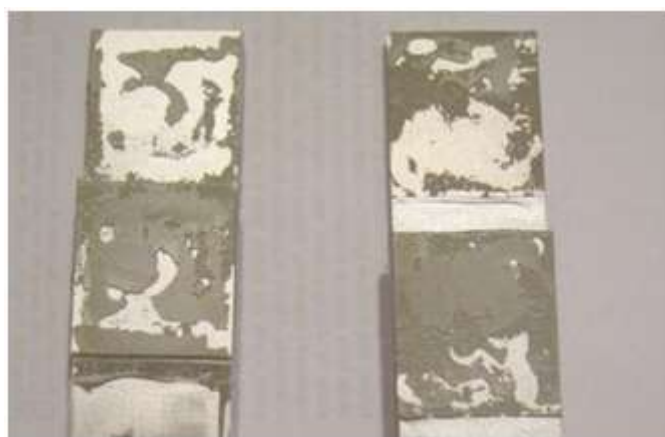


Figura 46 – Juntas não reforçadas N4_1 e N5_1

Nas figuras 47 a 50 temos as fotografias das JSS reforçadas da série Cx_1 (30mm de comprimento de sobreposição).

Na figura 47, vemos que a junta C1_1 teve uma rotura aparentemente mista (parte da junta teve rotura no meio do adesivo e parte entre o adesivo e o substrato) e, a C2_1 uma rotura adesiva.



Figura 47 – Juntas reforçadas C1-1 e C2-1

Na figura 48 as juntas C3_1 e C5_1 (também na figura 50) tiveram uma rotura adesiva.



Figura 48 - Juntas reforçadas C3-1 e C5-1

Na figura 49, junta C4_1, observamos uma verdadeira rotura adesiva. Os substratos após rotura ficaram apenas unidos pela linha central do adesivo a meio da zona de sobreposição. A fenda propagou-se de forma interfacial. Mais uma vez, esta rotura deve-se a um mau acabamento superficial.



Figura 49 - Juntas reforçadas C4-1



Figura 50 - Juntas reforçadas C4-1 e C5-1

Nas figuras 51 a 53 temos as fotografias das JSS reforçadas da série Cx_2 (20mm de comprimento de sobreposição). A junta C3_2 apresenta uma rotura aparentemente mista e, as restantes juntas da série Cx_2 apresentam rotura coesiva que ocorre quando uma falha se propaga no seio do adesivo. Em termos de performance e controlo de qualidade do adesivo e da ligação adesiva, esta rotura é mais recomendada e, significa que o acabamento superficial foi efetivamente melhorado.



Figura 51 - Juntas reforçadas C1-2 e C2-2



Figura 52 - Juntas reforçadas C3-2 e C4-2



Figura 53 – Juntas reforçadas C4_2 e C5_2

Nas figuras 54 a 56 temos as fotografias das JSS reforçadas da série Cx_3 (40mm de comprimento de sobreposição).

Na figura 54, as juntas C1_3 e C2_3 apresentam uma rotura mista o que ainda são sinais de mau acabamento superficial.



Figura 54 - Juntas reforçadas C1-3 e C2-3

Nas figuras 55 e 56, a juntas C3_3 apresenta uma rotura mista e, as juntas C4_3 e C5_3 têm uma rotura adesiva, resultados de um mau acabamento superficial.



Figura 55 - Juntas reforçadas C3-3 e C4-3



Figura 56 - Juntas reforçadas C4-3 e C5-3

Na figura 57 temos a fotografia das JSS reforçadas da série Cx_4 (20mm de comprimento de sobreposição). Todas as juntas desta série apresentam rotura coesiva.

Uma vez que tínhamos alterado a granalhagem para óxido de alumínio, o resultado demonstra que conseguimos, com a alteração da rugosidade, um bom acabamento superficial.



Figura 57 – Juntas de sobreposição simples reforçadas série Cx-4 – C1_4 a C5_4

Na figura 58 temos a fotografia das JSS reforçadas da série Cx_5 (40mm de comprimento de sobreposição). À semelhança da série Cx_4, obtivemos em todas as juntas rotura coesiva demonstrando mais uma vez a eficácia da mudança do tipo de granalha.

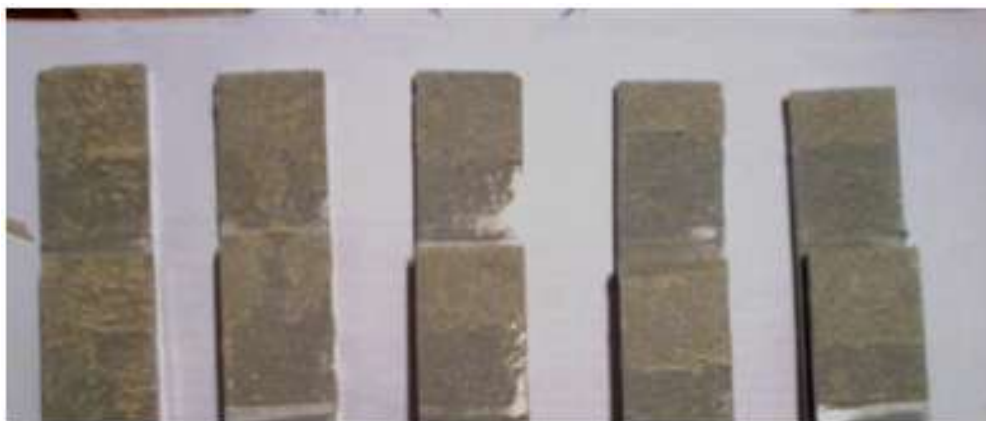


Figura 58 - Juntas de sobreposição simples reforçadas série Cx-5 – C1_5 a C5_5

5. Conclusões e considerações futuras

Após apresentação dos resultados e discussão dos mesmos, é de referir que o objetivo inicial proposto foi cumprido.

Verificou-se que existem vários parâmetros que influenciaram o comportamento mecânico deste tipo de juntas, principalmente o comprimento de sobreposição e a rugosidade do substrato.

O deslocamento maior obtido foi para as JSS não reforçadas e para um comprimento de sobreposição crítico entre 30 e 40mm, apesar de termos verificado que não existe relação entre estes dois parâmetros quando verificamos os resultados para todas as juntas sem colocar a questão do acabamento superficial pois, isolando as juntas com este ponto vemos que, com o aumento do comprimento de sobreposição de 20mm para 40mm obtivemos maior deslocamento.

A tensão máxima obtida verificou-se para os comprimentos de sobreposição de 20 e 40mm, mas foi mais notória a melhoria deste parâmetro após a mudança do tipo de acabamento superficial para óxido de alumínio.

Demonstrou-se também que o acabamento superficial influencia muito o tipo de rotura. Isto foi bem evidenciado ao alterarmos o tipo de granalha e, passarmos de roturas adesivas a roturas coesivas.

O acabamento superficial afetou também o deslocamento sofrido pelas JSS. De facto, o deslocamento não foi influenciado pelo comprimento de sobreposição como esperado, mas sim pelo acabamento superficial. Observamos uma melhoria notória no deslocamento como resultado da alteração do acabamento superficial e, com o aumento do comprimento de sobreposição.

Num próximo trabalho devemos considerar os seguintes aspetos:

- estudar outros comprimentos de sobreposição explorando a possibilidade de existir um comprimento crítico;
- explorar a hipótese de colocação de outros tipos de reforços e com outro tipo de malhas;
- estudar o efeito da rugosidade do substrato;

- estudar os vários efeitos com outros adesivos, nomeadamente adesivos frágeis e outros adesivos dúcteis;
- realizar ensaios com substratos de outros materiais, nomeadamente materiais compósitos no sentido de tentar obter ligações monomaterial.

6. Bibliografia e outras fontes de informação

- [1]. **Esteves, José Luís Soares.** Estudo do Comportamento de Adesivos Estruturais. *Tese de Mestrado da Universidade de Engenharia do Porto*. Porto : s.n., 1990.
- [2]. **Lammas, David.** *Adhesives and Sealants*. s.l. : Special Interest Model Books, 1998. ISBN-10: 1854860488.
- [3]. **Silva, Lucas F. M. da, G.Magalhães, António e Moura, Marcelo F. S. F.** *Juntas Adesivas Estruturais*. Porto : Publindústria, 2007.
- [4]. **Luís, Artur, et al.** *Adesivos em Engenhos Mecânicos*. Porto : Faculdade de Engenharia do Porto. http://paginas.fe.up.pt/~projfeup/cd_2010_11/files/MMM509_relatorio.pdf.
- [5]. **Adams, R.D.** The Project of Adhesively - Bonded Lap Joints. *General Lectures, Pluralis*. Mechanical Behaviour of adhesive Joints, 1997, Vols. Pág. 3-19.
- [6]. **Monteiro, D. F.** Análise do Comportamento à Fratura de Juntas de Aço Efectuadas com Adesivos Estruturais. *Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*. 1995.
- [7]. **Pereira, A.M., et al.** Analysis of manufacturing parameters on the shear strength of aluminium adhesive single-lap joints. *Journal of Materials Processing Technology*. 1 de Março de 2010, 2010, Vol. 210, Issue 4, Pág. 610–617.
- [8]. **Gonçalves, J. P. M.** *Tese de Doutoramento Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*. s.l. : Contribuição para a Análise Numérica e Experimental do Comportamento de Juntas de Sobreposição Simples”, 2000.
- [9]. **Nascimento, Alexandre Nuno Serra.** Efeito da espessura do adesivo na resistência de juntas de sobreposição simples, na ligação materiais compósitos. *Dissertação realizado no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica*. Porto, Porto, Portugal : s.n., Janeiro.
- [10]. **M., Lucas F., et al.** *Effect of Adhesive Type and Thickness on the Lap Shear Strength*. s.l. : The Journal of Adhesion, 82:1091-1115, 2006.
- [11]. **Silva, LFM da, Critchlow, GW e Figueiredo, MAV.** Parametric study of adhesively bonded single lap joints by the Taguchi method. *J Adhes Sci Technol*. 2008, 22:1477–94.
- [12]. **Silva, LFM da, et al.** Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength. *J Adhes Sci Technol*. 2006, 82:1091–115.

- [13]. **Xu, Wei e Wei, Yueguang.** Influence of adhesive thickness on local interface fracture and overall strength of metallic adhesive bonding structures. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. Janeiro, 2013, Vol. 40, Pág. 158–167.
- [14]. **Arenas, José M., Narbón, Julián J. e Alía, Cristina.** Optimum adhesive thickness in structural adhesives joints using statistical techniques based on Weibull distribution. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. Dezembro, 2009, Vol. 30, Pág. 160–165.
- [15]. **Barbosa, A. Q., Silva, L. F. M. da e Ochsner, A.** Effect of the amount of cork particles on the strength and glass transition temperature of a structural adhesive. *Journal of Materials: Design and Applications*. 22 de Abril, 2013, Vol. Part L.
- [16]. **Couvrat, P.** *Le Collage Structural Moderne: théorie et pratique*. Paris : Tec&Doc - Lavoisier, 1992.
- [17]. **Razak, Siti Noorseri A., Othman, A. R. e Sheng, L. W.** Effect of Temperature on the Strength Properties of Adhesively Single-Lap Bonded Joint for Composite Laminates. *Institute of Materials of Malaysia - Centre for Materials Science & Engineering*. 2013, Scientific Article 1.
- [18]. **Nordberg, Hans.** Fatigue Properties of Stainless Steel Lap Joints. 2005, Outokumpu Stainless Research Foundation and Sheffield Hallam University.
- [19]. *Parametric Study of Adhesively Bonded Single Lap Joints by the Taguchi Method.* **Silva, Lucas F. M. da, Critchlow, G. W. e Figueiredo, M. A. V.** s.l. : Journal of Adhesion Science Technology, 2008.
- [20]. **Borsellino, C., Bellab, G. Di e Ruisi, V.F.** Adhesive joining of aluminium AA6082: The effects of resin and surface treatment. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. Janeiro, 2009, Vol. 29, Issue 1, Pág. 36–44.
- [21]. **Petrie, Edward M.** *Handbook of Adhesives and Sealants*. New York : McGraw Hill, 2007.
- [22]. **Lees, W. A.** *Adhesives in Engineering Design*. London : The Design Council, 1984.
- [23]. **Burchardt, Bernd.** *Elastic Bonding*. s.l. : Landsberg: Verlag Modern Industrie, 1998.
- [24]. **OSANAI, KENJI RAMOS.** Efeito da Temperatura e da Geometria na Resistência de Juntas Coladas Submetidas ao Cisalhamento. *Dissertação de Mestrado*. NITERÓI : UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE, 2011.
- [25]. **Volkersen, O.** *Luftfahrtforschung*. 1938, Vol. 15, Pág. 41-47
- [26]. **Goland, M. e Reissner, E.** The stresses in cemented joints. *Journal of Applied Mechanics*. 1944, Vol. 66, Pág. A17–27.
- [27]. **Hart-Smith, L. J.** NASA Contract Report 1973a. NASA CR-112236.

[28]. Tensão Superficial FQM01. [Online] Lucien Silvano Alhanati. [Citação: 10 de Outubro de 2013.] http://alfaconnection.net/pag_avsf/fqm0101.htm.

[29]. **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.

[30]. **Kinloch, A. J.** *Adhesion and Adhesives: science and technology*. London : Chapman and Hall, 1990.

[31]. *Adhesively bonded joints in composite materials: an overview*. **Banea, M.D. e Silva, L.F.M. da.** s.l. : Journal of Materials Design and Applications, 2009, Vol. Part L.

[32]. **Berry, Nara G. e d'Almeida, José Roberto M.** Efeito da Presença de Defeitos no Comportamento Mecânico de Juntas Coladas Carbono-Epoxi. *Revista ABPOL - Polímeros*. July/Sept. , 2000, Vol. ol.10 n.3.

[33]. **Karachalios, E. F., Adams, R. D. e Silva, Lucas F.M. da.** Strength of single lap joints with artificial defects. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. Abril, 2013, Vol. 45, Pág. 69–76.

[34]. **Moura, M. F. S. F. de, Daniaud, R. e Magalhães, A.G.** Simulation of mechanical behaviour of composite bonded joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. Junho, 2005, Vol. 26, Pág. 464–473.

[35]. **Khalili, S.M.R., M.H.Jafarkarimi e M.A.Abdollahi.** Creep analysis of fibre reinforced adhesives in single lap joints — Experimental study. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. 6 March, 2009, Vol. 29.

[36]. **Solmaz, Murat Yavuz e Turgut, Aydin.** An Experimental and Numerical Study on the Effects of Taper Angles and OverLap Length on the Failure and Stress Distribution of Adhesively-Bonded Single-Lap Joints. *Mathematical and Computational Applications*. 2011, Vol. Vol. 16, No. 1, pp. 159-170.

[37]. **Khalilia, S.M.R., et al.** Experimental study of the influence of adhesive reinforcement in lap joints for composite structures subjected to mechanical loads. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. Special Topic Issue on Structural Adhesive Joints, 2008, Vol. 28, Pág. 436 - 444.

[38]. **ALPLAN - LANEMA.**

http://lars.mec.ua.pt/public/LAR%20Projects/RescueRobotics/2009_DAfonso/fontes/catalogos/lanema/Cat%C3%A1logo%20T%C3%A9cnico%20-%20ALUMINIOS.pdf. [Online] 27 de Abril de 2013.

[39]. **CMV.** *CMV Líder em Jateamento.* [Online] [Citação: 19 de Setembro de 2013.] <http://www.cmv.com.br/>.

[40]. **Fernandes, Rui Miguel da Rocha Pereira.** Definição de uma lei coesiva para juntas coladas em Carbono-. *Dissertação do MIEM - FEUP.* Porto : s.n., 2012.

[41]. **Farnell.**

<http://pt.farnell.com/araldite/araldite-2015-200ml/adhesive-araldite-2015-200ml/dp/1759545>.

[42]. **Ferreira, Nuno Miguel Amorim Jobling.** Effect of grooves on the strength of adhesively bonded joints. *Tese de Mestrado da Faculdade de Engenharia do Porto.* Porto : s.n., 2010.

[43]. **Magalhães, Filipe Alberto da Cunha Rocha Gonçalves de.** Determinação da tenacidade de adesivos estruturais em modo II. *Tese de Mestrado da Faculdade de Engenharia do Porto.* Porto : s.n., 2010.

[44]. **SMM, Almeida.** [Online] [Citação: 19 de Setembro de 2013.]

<http://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/1688/2/Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>.

[45]. **Essel.** [Online] [Citação: 10 de Junho de 2013.]

<http://www.essel.com.br/cursos/material/01/ProcessosFabricacao/73proc.pdf>.

[46]. **CAMPILHO, R.D.S.G.** Juntas de sobreposição simples adesivas, soldadas e adesivas-soldadas: modelo numérico para previsão da resistência. *Ciência & Tecnologia dos Materiais.* n.º 1/2, 2012, Vol. 24.

[47]. **McGrath, Gareth.** *Adhesives - Application and Joint Design.* s.l. : The Institute of Materials, 2001.

[48]. **Jesus, Ivo Sérgio Pinho de.** Resistência de Ligações Coladas Metal-Metal. *Tese de Mestrado da Universidade de Aveiro.* Aveiro : s.n., 2009.

**ANEXO I – *Ficha técnica*
*propriedades Araldite 2015***

Advanced Materials

Araldite® 2015

Structural Adhesives

TECHNICAL DATA SHEET

Araldite® 2015

Two component epoxy paste adhesive

Key properties

- Toughened paste
- Ideal for bonding GRP, SMC and dissimilar substrates
- Low shrinkage
- Gap filling, non sagging up to 10mm thickness
- High shear and peel strength

Description

Araldite 2015 is a two component, room temperature curing paste adhesive giving a resilient bond. It is thixotropic and non sagging up to 10mm thickness. It is particularly suitable for SMC and GRP bonding.

Product data

Property	2015 A	2015 B	Mixed Adhesive
Colour (visual)	neutral paste	neutral paste	neutral paste
Specific gravity	1.4	1.4	1.4
Viscosity at 25°C (Pas)	thixotropic	thixotropic	thixotropic
Pot Life (100 gm at 25°C)	-	-	30 - 40 minutes

Processing

Pretreatment

The strength and durability of a bonded joint are dependent on proper treatment of the surfaces to be bonded.

At the very least, joint surfaces should be cleaned with a good degreasing agent such as acetone, iso-propanol (for plastics) or other proprietary degreasing agents in order to remove all traces of oil, grease and dirt.

Low grade alcohol, gasoline (petrol) or paint thinners should never be used.

The strongest and most durable joints are obtained by either mechanically abrading or chemically etching ("pickling") the degreased surfaces. Abrading should be followed by a second degreasing treatment.

Mix ratio	Parts by weight	Parts by volume
Araldite 2015/A	100	100
Araldite 2015/B	100	100

Araldite 2015 is available in cartridges incorporating mixers and can be applied as ready to use adhesive with the aid of the tool recommended by Huntsman Advanced Materials.

Application of adhesive

The resin/hardener mix may be applied manually or robotically to the pretreated and dry joint surfaces. Huntsman's technical support group can assist the user in the selection of an suitable application method as well as suggest a variety of reputable companies that manufacture and service adhesive dispensing equipment.

A layer of adhesive 0.05 to 0.10 mm thick will normally impart the greatest lap shear strength to the joint. Huntsman stresses that proper adhesive joint design is also critical for a durable bond. The joint components should be assembled and secured in a fixed position as soon as the adhesive has been applied.

For more detailed explanations regarding surface preparation and pretreatment, adhesive joint design, and the dual syringe dispensing system, visit www.araldite2000plus.com.

Equipment maintenance

All tools should be cleaned with hot water and soap before adhesives residues have had time to cure. The removal of cured residues is a difficult and time-consuming operation.

If solvents such as acetone are used for cleaning, operatives should take the appropriate precautions and, in addition, avoid skin and eye contact.

Times to minimum shear strength

Temperature	°C	10	15	23	40	60	100
Cure time to reach	hours	12	7.5	4	1	-	-
LSS > 1MPa	minutes	-	-	-	-	17	6
Cure time to reach	hours	21	13	6	2	-	-
LSS > 10MPa	minutes	-	-	-	-	35	7

LSS = Lap shear strength.

Typical cured properties

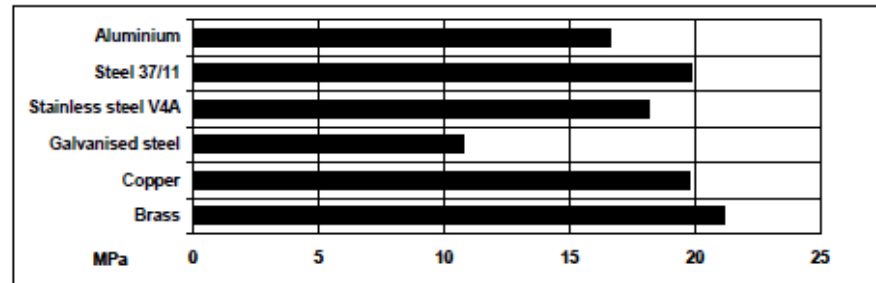
Unless otherwise stated, the figures given below were all determined by testing standard specimens made by lap-jointing 114 x 25 x 1.6 mm strips of aluminium alloy. The joint area was 12.5 x 25 mm in each case.

The figures were determined with typical production batches using standard testing methods. They are provided solely as technical information and do not constitute a product specification.

Average lap shear strengths of typical metal-to-metal joints (ISO 4587)

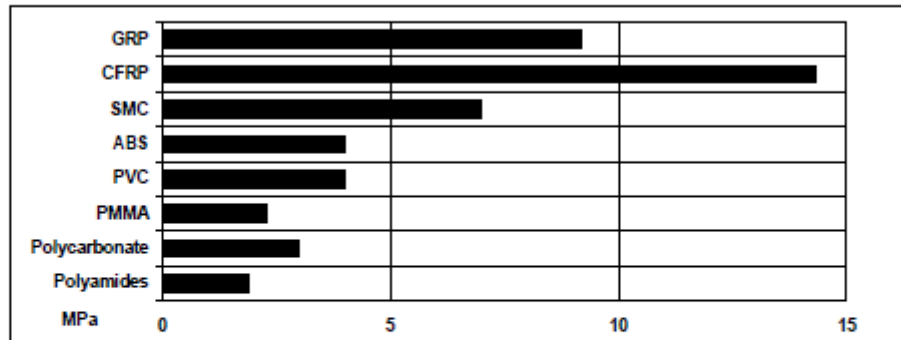
Cured for 16 hours at 40°C and tested at 23°C

Pretreatment - Sand blasting



Average lap shear strengths of typical plastic-to-plastic joints (ISO 4587)

Cured for 16 hours at 40°C and tested at 23°C. Pretreatment – Lightly abrade and alcohol degrease.



Tensile strength at 23°C (ISO 527)

30 MPa

Tensile modulus

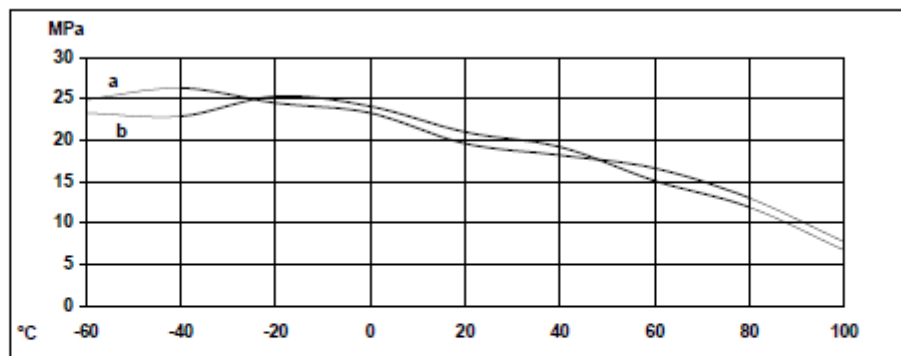
2 GPa

Elongation at break

4.4 %

Lap shear strength versus temperature (ISO 4587) (typical average values)

Cure: (a) = 7 days at 23°C; (b) = 24 hours at 23°C + 30 minutes at 80°C



Roller peel test (ISO 4578)

Cured: 16 hours at 40°C

4 N/mm

Glass transition temperature

Cure: 16 hours at 40°C

67°C by DSC

Cure: 1 hour at 80°C

87 by shear modulus

DIN 53445

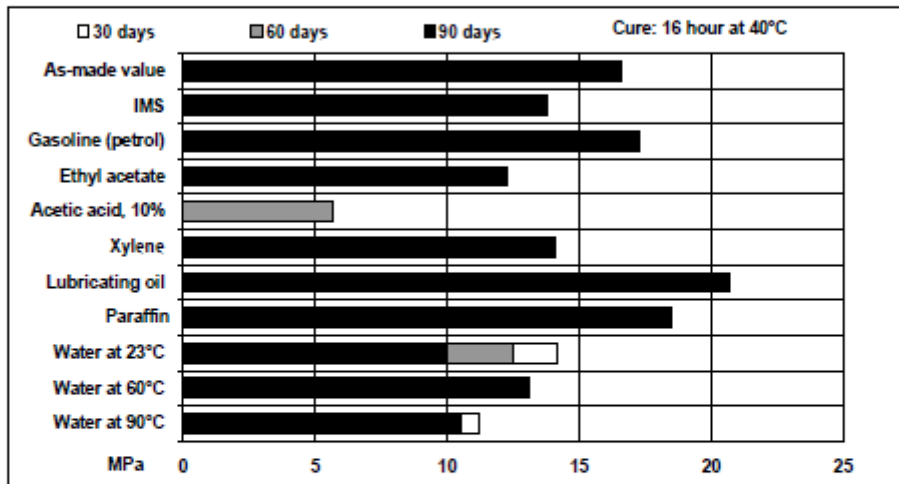
Dielectric constant (500v at 25°C)

5.6 at 1 kHz



Lap shear strength versus immersion in various media (typical average values)

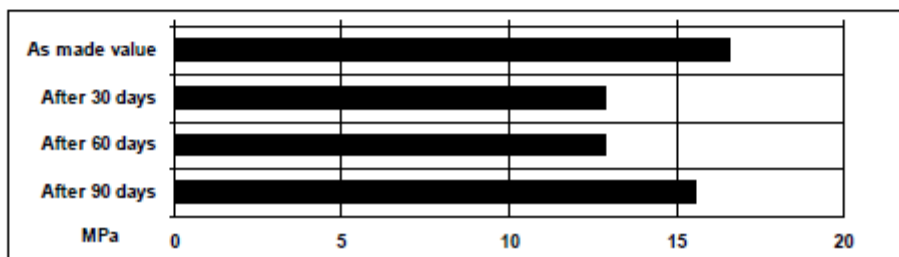
Unless otherwise stated, L.S.S. was determined after immersion for 90 days at 23°C



Lap shear strength versus tropical weathering

(40/92, DIN 50015; typical average values)

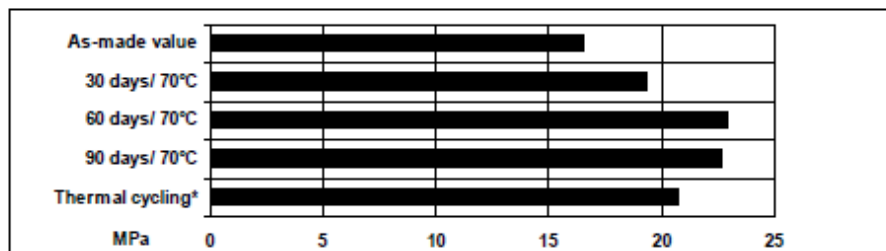
Cure: 16 hours at 40°C Test: at 23°C





Lap shear strength versus heat ageing

Cure: 16 hours at 40°C



*25 cycles -30°C to + 70°C

Shear modulus (DIN 53445)

Cure: 1 hour at 80°C

Temperature	G'	λ
0°C	1.0 Gpa	0.25
25°C	0.9 Gpa	0.25
50°C	0.8 Gpa	0.35
75°C	0.2 Gpa	1.9
100°C	2 MPa	0.5

Flexural Properties (ISO 178) Cure 16 hours/ 40°C tested at 23°C

Flexural Strength 42.7 MPa
Flexural Modulus 1813.6 MPa

Resistance to fatigue (40 Hz at 23°C) (quoted as cycles to failure)

Maximum applied load	Sandblasted aluminium	Chromate pickled aluminium
20% of static failing load	>10 ⁷	>10 ⁷
25% of static failing load	>10 ⁷	10 ⁷
30% of static failing load	3 x 10 ⁶	8 x 10 ⁵

(Static failing load 16 MPa)



Storage	Araldite 2015/A and Araldite 2015/B may be stored for up to 3 years at room temperature provided the components are stored in sealed containers. The expiry date is indicated on the label.
Handling precautions	<p>Caution</p> <p>Our products are generally quite harmless to handle provided that certain precautions normally taken when handling chemicals are observed. The uncured materials must not, for instance, be allowed to come into contact with foodstuffs or food utensils, and measures should be taken to prevent the uncured materials from coming in contact with the skin, since people with particularly sensitive skin may be affected. The wearing of impervious rubber or plastic gloves will normally be necessary; likewise the use of eye protection. The skin should be thoroughly cleansed at the end of each working period by washing with soap and warm water. The use of solvents is to be avoided. Disposable paper - not cloth towels - should be used to dry the skin. Adequate ventilation of the working area is recommended. These precautions are described in greater detail in the Material Safety Data sheets for the individual products and should be referred to for fuller information.</p>
Huntsman Advanced Materials	<p>All recommendations for the use of our products, whether given by us in writing, verbally, or to be implied from the results of tests carried out by us, are based on the current state of our knowledge. Notwithstanding any such recommendations the Buyer shall remain responsible for satisfying himself that the products as supplied by us are suitable for his intended process or purpose. Since we cannot control the application, use or processing of the products, we cannot accept responsibility therefor. The Buyer shall ensure that the intended use of the products will not infringe any third party's intellectual property rights. We warrant that our products are free from defects in accordance with and subject to our general conditions of supply.</p>

ANEXO II - Ficha técnica granalha de vidro



Líder em Jateamento




HOME EMPRESA **PRODUTOS** LANÇAMENTOS LOCALIZAÇÃO CONTATO HELPDESK
Empresa Certificada ISO 9001:2008

Home > Produtos > Jateamento > Abrasivos > Microesfera de Vidro

Abrasivos
Microesfera de Vidro
Óxido de Alumínio
Granelha de Aço
Granelha de Aço Inox

Microesferas de Vidro

Características: Pouco abrasivas, devido a forma esférica associada à dureza e a densidade do vidro, removem contaminações e acabam superfícies na maioria dos casos com rapidez e eficiência sem destruir as tolerâncias das peças tratadas. É um material inerte, não reage com os materiais tratados, pois não se incrustam nas superfícies jateadas. Sua dureza situa-se entre 5 e 7 na escala MOHS.

Aplicações: Limpeza, acabamentos acetinados, gravação, desrebarbamento, shot peening (martelamento: geram micro-tensões elevadas que alteram as características normais como a resistência à fadiga, ao atrito, à ruptura, ao desgaste, à oxidação e às altas temperaturas entre as mais importantes). Baixa produtividade, média reciclagem.



Granulometrias mais usuais em jateamento		
DENOMINAÇÃO	MALHA A.S.T.M.	DIÂMETRO (microns)
RA	30-70	425 - 212
RB	50-80	300 - 180
RC	60-100	250 - 150
RD	70-140	215 - 107
RE	100-170	150 - 90
RF	140-270	106 - 53
RH	170-325	90 - 45
RI	53 - Finos	38 - Finos



ANEXO III - Ficha técnica óxido de alumínio



Líder em Jateamento

HOME EMPRESA **PRODUTOS** LANÇAMENTOS LOCALIZAÇÃO CONTATO HELPDESK
Empresa Certificada ISO 9001:2008

Home > Produtos > Jateamento > Abrasivos > Óxido de Alumínio

Abrasivos

Microesfera de Vidro

Óxido de Alumínio

Granalha de Aço

Granalha de Aço Inox

Óxido de Alumínio

Características: Produto abrasivo com alto poder de limpeza, em pó na cor cinza ou marrom, obtido através da bauxita, de origem mineral, com baixo grau de toxicidade. Alta dureza: 9 na escala Mohs, muito tenaz e refratário, baixa reatividade e boa estabilidade, resistente à altas temperatura, fusão acima de 2000°C, densidade + ou - 1,8 gr/cm3.

Aplicações: Podendo ser utilizado em cabine ou gabinetes de jateamento, para limpeza de peças em geral, remoção de camadas oxidadas, limpeza de "carepas" provenientes de tratamento térmico, preparação de superfícies a serem pintadas ou revestidas, além de materiais metálicos é utilizada em peças de vidro, plásticos e metais não ferrosos. Apresenta ótima produtividade nos processos de decapagem, preparação de pintura ou para aplicações de outros revestimentos em metais ferrosos. Ótima produtividade, reciclagem média.

Tipo	Granulometria
N 24	1,00 mm
N 36	0,80 mm
N 46	0,65 mm
N 60	0,49 mm
N 80	0,29 mm
N 120	0,15 mm
N 150	0,11 mm
N 220	0,07 mm

