

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



FEUP

**Efeito da espessura do adesivo na resistência de
juntas de sobreposição simples, na ligação
materiais compósitos**

Alexandre Nuno Serra Nascimento

NÚMERO DE ALUNO 200604207

Dissertação realizado no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Ramo de Produção, Desenvolvimento e Engenharia Automóvel

Orientador: Prof. Dr. Lucas Filipe Martins da Silva
Co-orientador: Prof. Dr. Raul Campilho

Janeiro de 2013

Resumo

As uniões mecânicas dos materiais são uma tecnologia muito aplicada na indústria hoje em dia. Com a necessidade de unir materiais com comportamentos diferentes e reduzir o peso, as uniões através de adesivos têm vindo a ter uma grande importância. Sendo assim, o estudo de juntas adesivas torna-se muito relevante e importante para garantir a durabilidade e resistência dessas juntas.

Esta dissertação foca-se no estudo de juntas adesivas de sobreposição simples (JSS) em que o substrato é um material compósito. Os adesivos selecionados para o estudo foram o SikaForce® 7888 (poliuretano) e XNR6852 (epóxico).

O parâmetro avaliado nas juntas de sobreposição simples foi a força de rotura para diferentes espessuras de adesivo e comprimentos de sobreposição. Para conseguir proceder a essa análise foram criadas várias JSS, realizando-se simulações usando os Elementos Finitos com modelo de dano coesivo e análise matemática.

A utilização de vários métodos permite concluir que um aumento da espessura do adesivo provoca uma diminuição da força de rotura da junta. Já para a variação do comprimento de sobreposição, um aumento da sobreposição leva a um aumento da força de rotura.

A análise dos resultados obtidos pela utilização dos vários métodos permitiu concluir que uma análise matemática simples consegue fazer boas previsões para a força de rotura. Por outro lado, a análise por Elementos Finitos, embora realizada com algumas limitações, permitiu obter tendências idênticas às experimentais.

Palavras-Chave: Juntas adesivas, Compósitos, Ensaios destrutivos, Método de Elementos Finitos, Modelo de dano coesivo

Abstract

Mechanical unions of materials are a technology with various applications in the industry today. With the need of joining materials with different behaviors and reduce weight, adhesive bonding has gained a great importance. Thus, the study of adhesive joints becomes very relevant and important to ensure the durability and strength of such joints.

This paper focuses on the study of single lap adhesive joints in which the adherends are a composite material. The selected adhesives for the study were the SikaForce® 7888 (polyurethane) and XNR6852 (epoxy).

The evaluated parameter in the single lap joints (JSS) is the failure load, for different thicknesses and overlap lengths. To be able to carry out this analysis, numerical models of the joints were created and analyzed using finite elements with cohesive damage models, whose results were compared against a simple theoretical model.

The use of the various methods showed that an increase in the thickness of the adhesive causes a decrease of the tensile strength of the joint, and that increasing the overlap length causes an increase of tensile strength.

The results obtained by the use of various methods allowed to conclude that a simple mathematical analysis can make good predictions for the tensile strength. The Finite Element analysis, although being performed with some limitations, gave identical tendencies to the experiments

Key-Words: Adhesive joints, Composites, Destructive testing, Finite Element Method, Cohesive Damage Models

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço à minha família (mãe, pai e irmão) todo o seu carinho e apoio, pois sem eles não seria possível fazer esta tese.

Ao Prof. Dr. Lucas Silva pelo seu apoio e ajuda ao longo da tese. Ao Prof. Dr. Raul Campilho que mostrou sempre disponível e me ajudou em diversas ocasiões.

Um agradecimento ao Eng. Eduardo por me ter ajudado durante os ensaios. Um agradecimento ao grupo de adesivos por me ter recebido no grupo como um colega e amigo. Agradecimento a todos aqueles que me ajudaram na realização desta tese.

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice.....	ix
Lista de figuras	xiii
Lista de tabelas	xvii
Abreviaturas e Símbolos	xix
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Formato da tese	2
1.2 - Propósito da dissertação	2
1.3 - Procedimento utilizado	3
Capítulo 2	5
Estado da Arte.....	5
2.1 - Adesivos.....	5
2.1.1 - Introdução	5
2.1.2 - Início da história de adesivos	5
2.1.3 - História dos adesivos modernos.....	6
2.1.4 - Vantagens e desvantagens das juntas adesivas	6
2.1.5 - Aplicações industriais dos adesivos	7
2.1.6 -Tipos de juntas	7
2.1.7 -Modos de rotura	8
2.1.8 - Espessura do adesivo	9
2.2 - Compósitos	12
2.2.1 - História dos compósitos	12
2.2.2 - Conceito de compósito	12
2.2.3 - Classificação dos compósitos.....	13
2.2.3.1 - Reforços dos compósitos.....	13
2.2.3.2 - Matrizes dos compósitos.....	14
2.2.4 Compósitos de fibras longas.....	15
2.2.5 - Plástico reforçado com fibras de carbono (CFRP)	15

2.3 - Elementos Finitos	17
2.3.1 - Conceitos básicos.....	17
2.3.2 - Vantagens do Método de Elementos Finitos	17
2.4 - Mecânica do dano	18
2.4.1 - Modelos de dano coesivo (MDC).....	18
Capítulo 3	21
Trabalho experimental.....	21
3.1 - Propriedades dos componentes	22
3.1.1 - Adesivos SikaForce® 7888 e XNR6852	22
3.1.2 - Propriedade dos substratos em material compósito	23
3.1.3 - Orientação das fibras	24
3.2 - Fabrico de placas de compósito com pré-impregnado	25
3.2.1 - Procedimento	25
3.2.1 Procedimento de Cura.....	27
3.2.2 - Corte dos provetes	29
3.2.3. - Fabricação das JSS com SikaForce® 7888 e XNR6852	30
3.2.3.1. - Tratamento superficial	30
3.2.3.2 Procedimento de colagem	30
3.2.3.3. - Cura dos adesivos	32
3.2.3.4. - Remoção do excesso adesivo dos provetes.....	32
3.2.3.5.- Ensaio de tração das JSS de SikaForce® 7888 e XNR6852.....	33
Capítulo 4	37
Simulação numérica	37
4.1 - Procedimento da simulação em ABAQUS®	37
4.1.1 - Condições da simulação numérica	37
4.1.2 - Modelo de dano triangular.....	41
Capítulo 5	43
Resultados.....	43
5.1 - Ensaio de tração das JSS com adesivo o SikaForce® 7888.....	43
5.1.1 - Ensaio de tração das JSS com uma sobreposição de 20 mm	43
5.1.2 - Ensaio de tração de JSS com uma sobreposição de 60 mm	45
5.2 - Ensaio de tração das JSS com o adesivo XNR6852.....	48
5.3 - Resultados da simulação numérica em ABAQUS®	50
5.3.1 - Simulação das JSS com o adesivo SikaForce® 7888.....	50
5.3.1.1 - JSS com 20 mm de sobreposição	50
5.3.1.2 - JSS com 60 mm de sobreposição	53
5.3.2 - Simulação das JSS com o adesivo XNR6852	54
5.4 - Resultados analíticos	56
5.4.1 - Cedência generalizada	56
5.4.1.1 - Adesivo XNR6852	56
5.4.1.2 - Adesivo SikaForce® 7888.....	57
Capítulo 6	59
Conclusões e trabalhos futuros.....	59
Referências	61
Anexo A	65
Anexo B.....	66
Anexo C.....	67

Efeito da espessura do adesivo na resistência de juntas de sobreposição simples, na ligação
materiais compósitos

Anexo D.....	68
Anexo E.....	70
Anexo F.....	72

Lista de figuras

Figura 2.1- Tipos de juntas adesivas (da Silva et al. 2007).....	8
Figura 2.2 - Modos de rotura de JSS em substratos de compósito (Banea et al. 2009).....	8
Figura 2.3 - Distribuição das tensões de corte no adesivo para JSS com diferentes valores de t_a (da Silva et al. 2007).	10
Figura 2.4 - Dimensões das JSS (Kahraman et al. 2008).	10
Figura 2.5 - Dimensão dos provetes de JSS (Naito et al. 2012).....	11
Figura 2.6 - Variação cronológica da importância dos materiais (Ashby 2006).	12
Figura 2.7 - Tipos de partículas nos compósitos (Staab 1999).	13
Figura 2.8 - Esquemas de compósitos de fibras (Staab 1999).....	13
Figura 2.9 - Uma imagem de microscópio eletrónico de varrimento da superfície de um pré-impregnado de fibra de carbono-epóxico (Chung 2010).	16
Figura 2.10- Bombardeiro B-2.	17
Figura 2.11 - Elementos coesivos para simular o crescimento do dano em ligações adesivas por uma abordagem local (Campilho et al. 2012).	19
Figura 2.12 - Abordagem contínua numa junta adesiva (Pardoen et al. 2005).	20
Figura 3.1 - Geometria e dimensões características dos provetes.	21
Figura 3.2 - JSS com sobreposição 20 mm.....	22
Figura 3.3 - JSS com sobreposição 60 mm.....	22
Figura 3.4 - Orientação das fibras nas camadas de pré-impregnado (da Silva et al. 2012). ...	24
Figura 3.5 - Rotura devido tensão de arrancamento dos substratos (da Silva et al. 2006).	25
Figura 3.6- (a) Rolo de compósito de CFRP e (b) procedimento de corte das placas.....	26
Figura 3.7 - (a) Placas finais cortadas e (b) Interior da prensa pratos quentes.	26
Figura 3.8 - (a) Peso usada para remover as bolhas de ar e (b) Pistola de ar quente.	27

Figura 3.9 - Procedimento de colar a fita-cola.	27
Figura 3.10 - Ciclo térmico para a cura das placas de compósito.	28
Figura 3.11 - Prensa de pratos quentes.	28
Figura 3.12 - (a) Aplicação de desmoldante nas barras. e (b) Folhas de Teflon® e as barras de espessura posicionadas na prensa.	28
Figura 3.13- Máquina de corte de compósitos.	29
Figura 3.14 - Acabamento superficial nos provetes (Neto et al. 2012).	30
Figura 3.15 - Adesivo SikaForce® 7888 e pistola pneumática.	31
Figura 3.16 - Modo de aplicação do adesivo.	31
Figura 3.17 - Procedimento de montagem das JSS.	31
Figura 3.18 - Molde com as JSS do adesivo XNR6852.	32
Figura 3.19 - Ferramenta pneumática com mó.	33
Figura 3.20 - Mesa de trabalho.	33
Figura 3.21 - Máquina de ensaios INSTRON.	34
Figura 3.22 - Máquina de ensaios SHIMADZU.	34
Figura 4.1 - Desenho 2D dos provetes em ABAQUS®.	38
Figura 4.2 - Diferentes partições na simulação dos provetes em ABAQUS®.	38
Figura 4.3 - Definição dos incrementos em ABAQUS.	40
Figura 4.4 - Representação das condições fronteira na simulação ABAQUS®.	40
Figura 4.5 - Malha dos provetes em ABAQUS® para a JSS de $l_0=20$ mm e $t_a=0,5$ mm.	41
Figura 4.6- Lei de tração-separação triangular disponível no ABAQUS® (Abaqus 2009).	42
Figura 5.1 - Força de rotura média e desvio padrão em função de t_a para $l_0=20$ mm.	43
Figura 5.2 - a) Rotura da camada superficial do CFRP na JSS de $t_a=3$ mm e (b) rotura coesiva na JSS de $t_a=3$ mm.	44
Figura 5.3 - Roturas coesivas de para $t_a=0,2, 0,5$ e 1 mm.	44
Figura 5.4 - Comparação da capacidade de carga das JSS para $l_0=20$ mm.	45
Figura 5.5 - Força de rotura média e desvio padrão em função de t_a para $l_0=20$ e 60 mm. ...	46
Figura 5.6 - (a) Rotura da JSS de $t_a=3$ mm e (b) rotura coesiva na JSS de $t_a=1$ mm	46
Figura 5.7 - Rotura coesiva nas JSS para vários t_a em $l_0=60$	47
Figura 5.8 - Comparação da capacidade de carga das JSS para $l_0=60$ mm nos ensaios de tração.	48

Efeito da espessura do adesivo na resistência de juntas de sobreposição simples, na ligação materiais compósitos

Figura 5.9 - Força de rotura das JSS com adesivo XNR6852 em função de l_0 com $ta=0,2$ mm.....	48
Figura 5.10 - Rotura no compósito da JSS de $l_0=30$ mm.	49
Figura 5.11 - Superfícies de fratura coesivas no adesivo para diferentes valores de l_0	49
Figura 5.12 - Comparação da capacidade de carga das JSS para os diferentes valores de l_0	50
Figura 5.13 - Força de rotura em função de ta para $l_0=20$ mm obtida por simulação ABAQUS®	51
Figura 5.14- Rotura coesiva do adesivo para uma junta com $l_0=20$ e $ta=0,2$ mm.	51
Figura 5.15 - Detalhe da rotura coesiva da junta com $l_0=20$ e $ta=0,2$ mm numa das extremidades de sobreposição.....	52
Figura 5.16 - Comparação da capacidade de carga das JSS para os diferentes valores de ta	52
Figura 5.17 - Força de rotura em função de ta para $l_0=60$ mm obtida por simulação ABAQUS®	53
Figura 5.18 - Rotura no adesivo para a JSS com $l_0=60$ mm e $ta=0,5$ mm.	53
Figura 5.19 - Rotura interlaminar da simulação de JSS com $l_0=60$ mm e $ta=1$ mm.	54
Figura 5.20 - Comparação da capacidade de carga das JSS para simulação numérica com $l_0=60$ mm.	54
Figura 5.21 - Força de rotura para valores de ta de 0,2 mm obtida para simulação ABAQUS®	55
Figura 5.22 - Rotura coesiva no adesivo para a junta $l_0=40$ mm.	55
Figura 5.23 - Força de rotura dos vários critérios para o adesivo XNR6852 em função de l_0 . .	56
Figura 6.1 - Curvas P- δ para o $l_0=60$ mm e $ta=3$ mm.....	71

Lista de tabelas

Tabela 2-1 - Classificação dos compósitos (Chung 2010).	14
Tabela 2-2 - Exemplos de Configurações do empilhamento das camadas (Chung 2010).	15
Tabela 3-1 - Propriedade do adesivo SikaForce® 7888 (Neto et al. 2012, Sika 2012).	23
Tabela 3-2 - Propriedade do adesivo XNR6852 (Saldanha et al. 2012).	23
Tabela 3-3 - Propriedades elásticas das camadas unidirecionais de CFRP (Campilho et al. 2008).	24
Tabela 3-4 - Número de JSS tracionados para cada condição do adesivo XNR6852.	35
Tabela 3-5 - Número de JSS tracionados para cada condição do adesivo SikaForce® 7888.	35
Tabela 4-1 - Propriedades interlaminares do compósito para a modelação MDC (Campilho et al. 2008).	39
Tabela 4-2 - Propriedades dos adesivos para a modelação MDC (Neto et al. 2012, Saldanha et al. 2012).	39
Tabela 5-1 - Resultados do método de cedência generalizados para as JSS com SikaForce® 7888.	57

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

2D	Duas Dimensões
4ENF	Four- Point End Notched Flexure
CFRP	Carbon Fibre Reinforced Plastic
DCB	Double-Cantilever Beam
EF	Elementos finitos
ENF	End-Notched Flexure
JSS	Juntas de sobreposição simples
JSD	Junta de sobreposição dupla
MDC	Modelo de dano coesivo

Lista de símbolos

b	- Largura da junta
E	- Módulo de Young
ε_f	- Deformação à rotura
ν	- Coeficiente de Poisson
σ_y	- Tensão de cedência
σ_f	- Tensão de rotura
G_{IC}	- Energia crítica modo I
G_{IIC}	- Energia crítica modo II
t_a	- Espessura do adesivo
t_p	- Espessura do substrato
l_o	- Comprimento de sobreposição
l_p	- Comprimento total do substrato
P_m	- Força máxima
$P-\delta$	- Força-Deslocamento

Capítulo 1

Introdução

A indústria está sempre à procura de novas oportunidades de criar novos produtos com qualidade e elevado desempenho. Com o desenvolvimento da tecnologia surgem novos materiais e processos de fabrico que permitem responder às necessidades dos fabricantes. O aparecimento de automóveis e aviões de elevado desempenho obrigou ao desenvolvimento de materiais mais leves e mais resistentes. Esses novos materiais são os polímeros, compósitos, e ligas especiais que, para serem utilizados, requerem ligações mecânicas mais exigentes do que as tradicionais (soldadura, aparafusagem ou rebitagem). Essa necessidade, seja devido às limitações desses processos ou impossibilidade de aplicação, conduziu ao surgimento de juntas adesivas estruturais que permitem uma elevada resistência e um baixo peso. As juntas adesivas apresentam inúmeras vantagens em comparação com as ligações mecânicas mais tradicionais tais como: baixo peso, mais resistência (se bem dimensionada), duração e fiabilidade elevadas, possibilidade de unir diferentes materiais e rapidez de fabrico com possibilidade de automatização. Como outros processos, também apresenta limitações que se devem ter em conta, tais como: fraca resistência a forças de arrancamento, eventual necessidade de cura a elevadas temperaturas e a durabilidade.

Tendo em conta que cada vez mais são utilizados materiais compósitos na indústria automóvel, aeroespacial e marítima com o intuito de reduzir peso e reduzir os consumos é necessário estudar com mais atenção este tipo de materiais. A ligação mecânica mais aplicada nos materiais compósitos é a junta adesiva porque é fácil de aplicar e não compromete as propriedades do compósito ao não destruir as fibras do compósito.

Por isso é imperativo o estudo aprofundado de juntas adesivas em materiais compósitos, de forma a garantir a fiabilidade e o elevado desempenho que a indústria necessita.

1.1 - Formato da tese

De forma a tornar mais simples a recolha e interpretação da informação desta dissertação, esta foi dividida em vários capítulos.

- O Capítulo 1 consiste numa pequena introdução ao procedimento e formato da tese.
- No Capítulo 2 é feito um resumo geral sobre as tecnologias, metodologias e resumo histórico sobre os tópicos desta tese.
- O Capítulo 3 refere-se a todo trabalho experimental realizado, desde a fabricação das placas de CFRP, ao corte e colagem dos provetes, remoção do excesso de adesivo e aos ensaios de tração.
- O Capítulo 4 trata da análise numérica. A simulação por EF com modelos de dano coesivo foi feita no *software* ABAQUS®. Uma simples análise analítica foi também aplicada com o critério de cedência generalizada para determinar a resistência das JSS.
- No Capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados. Este capítulo apresenta também toda a informação dos ensaios de tração realizados. São apresentados também os resultados das simulações e comparativos com os resultados experimentais.
- No Capítulo 6 são feitas as observações finais e referências a possíveis trabalhos futuros

1.2 - Propósito da dissertação

O trabalho precursor ao desenvolvido nesta tese é o de Neto et al. (2012). O artigo consiste no estudo do comportamento de juntas adesivas de sobreposição simples com o adesivo SikaForce® 7888 ou Araldite® 2015, com diferentes valores de l_0 em substratos de CFRP. Como conclusões deste artigo refere-se o aumento da resistência da junta com o aumento de comprimento de sobreposição (l_0), particularmente no uso do adesivo dúctil SikaForce® 7888. O estudo numérico, realizado por elementos finitos (EF) com modelo de dano coesivo (MDC), mostrou ser adequado na previsão das resistências da junta e modos de rotura.

Os objetivos principais da dissertação são os seguintes:

- Continuação e aprofundamento dos trabalhos anteriores sobre juntas adesivas com substratos de compósito.

- Analisar a influência da variação da espessura do adesivo (t_a) numa junta adesiva de sobreposição simples (JSS) com substrato de compósito.
- Realizar estudo paramétrico das juntas adesivas de sobreposição simples.
- Simulações numéricas para previsão da resistência.
- Apresentação de resultados e conclusões científicas sobre o potencial e limitações deste tipo de juntas adesivas em função de t_a e l_o .

1.3 - Procedimento utilizado

De forma a cumprir os objetivos propostos foram realizados os seguintes procedimentos:

- Utilização dos adesivos dúcteis SikaForce® 7888 e Nagase Chemtex XNR6852, previamente caracterizados e estudados.
- Produção de provetes de compósito usando pré-impregnado SEAL® (Texipreg HS160 RM) previamente caracterizado e estudado.
- Ensaio de tração de JSS para diferentes valores de t_a e l_o
- Realizar simulações numéricas usando EF com o *software* ABAQUS®.
- Interpretar e apresentar resultados e conclusões sobre os dados científicos obtidos.

Capítulo 2

Estado da Arte

Nesta secção faz-se um resumo da história, metodologia e aplicações dos diferentes componentes que estão envolvidos nesta tese. Os principais tópicos a destacar são a tecnologia dos adesivos, compósitos e EF.

2.1 - Adesivos

2.1.1 - Introdução

A história dos adesivos e vedantes está intimamente relacionada com a história da humanidade. Alguns adesivos têm as suas origens nos tempos antigos, e embora a maioria desses materiais tenha sido objeto de grandes mudanças, outros têm sido muito pouco alterados ao longo do tempo. À medida que novos materiais são desenvolvidos, uma revisão histórica dos usos pode mostrar onde se pode melhorar as aplicações já existentes e, por vezes, satisfazer novos requisitos (Pizzi et al. 2003).

2.1.2 - Início da história de adesivos

São referidos alguns exemplos de aplicações dos adesivos na antiguidade:

- As primeiras ferramentas e armas eram pedras amarradas num pau por fibras, pedaços de pele de animais ou matérias com propriedades adesivas.
- Os primeiros adesivos utilizados pelos seres humanos são agora chamados de cera de abelhas, colofónia, borracha, goma-laca, alcatrão, enxofre e gomas vegetais.
- Os primeiros seres humanos isolavam cascas e folhas com adesivos e matérias impermeáveis para atravessar estreitos de água.
- Resina no tempo antigo servia para reparar vasos de cerâmica.
- Cimentos betuminosos e colas caseiras foram usados no tempo dos antigos egípcios (Pizzi et al. 2003).

2.1.3 - História dos adesivos modernos

A história da indústria moderna de adesivos está intimamente ligada ao desenvolvimento das indústrias de aeronaves e aeroespacial. Desde os primeiros voos até ao mais moderno equipamento aeroespacial, o peso tem sido uma das considerações mais importantes. A ligação adesiva foi o método ideal de ligação nos antigos aviões a madeira e tecido, e hoje em dia é o método mais importante de união para o alumínio, titânio e outros metais em naves militares avançadas e espaciais, e também em alguns aviões comerciais atuais (Pizzi et al. 2003).

2.1.4 - Vantagens e desvantagens das juntas adesivas

As ligações adesivas apresentam vantagens e desvantagens intrínsecas ao processo de ligação. Em termos de vantagens, destacam-se as seguintes:

- As ligações adesivas oferecem a possibilidade de unir materiais diferentes; e.g. metais, plásticos, compósitos, madeira entre outros, pois o adesivo impede contacto íntimo, o que de outro modo poderia conduzir a corrosão galvânica.
- Os adesivos têm a capacidade de unir chapas finas de forma eficiente. É principalmente relevante para produção de veículos ou estruturas leves.
- Uma junta bem projetada terá capacidade de absorver energia, isto é, tende a ter boas propriedades de amortecer e absorver vibrações e sons.
- O adesivo pode ter uma dupla finalidade uma vez que, além de proporcionar a resistência mecânica, também pode vedar a junta contra a entrada de humidade e detritos.
- Comparado com uniões por rebites ou parafusos, as uniões adesivas distribuem a carga de uma maneira uniforme minimizando assim as concentrações de tensões. Como resultado, são minimizados problemas de fadiga.
- A união adesiva é muitas vezes uma técnica conveniente e de baixo custo. A automação do processo com o uso de robôs minimiza a necessidade de qualquer interação humana e, com o aumento do desenvolvimento dos sistemas de fabrico flexíveis, a ligação adesiva pode ser uma parte integrante da linha de montagem (Karač 2008).

As desvantagens mais importantes das ligações adesivas estão relacionadas com os seguintes aspetos:

- O pré-tratamento dos substratos é muito importante para a qualidade da união e tem um grande efeito sobre a resistência da junção, em particular sob condições ambientais severas.
- A ligação adesiva tem uma gama de temperaturas de serviço limitado em comparação com outros tipos de ligações mecânicas.
- A força e a tenacidade dos adesivos são geralmente baixas em comparação com os metais, e, por conseguinte, limitam a sua aplicação.

- As juntas adesivas são inerentemente fracas a forças de arrancamento, por isso requerem um cuidado na concepção.
- Há uma falta de informação e conhecimento sobre o comportamento das juntas adesivas em condições de impacto.
- As ligações adesivas não permitem desmontagem.
- As propriedades dos adesivos são bastantes variáveis o que torna a escolha difícil para uma determinada aplicação (Karač 2008).

2.1.5 - Aplicações industriais dos adesivos

Os adesivos são usados para várias aplicações na indústria automóvel na atualidade, variando desde vedações flexíveis no chassi do carro até adesivos estruturais de alto desempenho. Vários tipos de adesivos com propriedades específicas estão disponíveis para as mais diversas aplicações. Os requisitos para ligações adesivas têm vindo a aumentar devido ao aumento da vida útil dos automóveis. No processamento os adesivos, aspetos industriais relacionados com a saúde e proteção ambiental tornaram-se também mais importantes. Portanto, é mais difícil, mas no entanto necessário determinar os requisitos para os adesivos a ser utilizados no futuro. Além disso, a procura de padrões de qualidade tem vindo a aumentar na indústria (Chung 2010).

A indústria naval utiliza cada vez mais plásticos e compósitos devido ao seu baixo peso, à sua resistência à corrosão e à sua facilidade de processamento. Uma vez que a melhor forma de ligar compósitos é através de adesivos, essa indústria também é um bom exemplo de aplicação. De facto, os compósitos e os adesivos são duas tecnologias muito associadas. Neste caso, deve-se ter em conta a resistência dos adesivos ao meio marinho, que é particularmente severo (da Silva et al. 2007).

2.1.6 -Tipos de juntas

As juntas adesivas podem ter muitas configurações. As mais comuns são a JSS, a junta se sobreposição dupla (JSD), as juntas com chanfro (*scarf joints*) e as juntas em degraus (Figura 2.1). Devido à sua facilidade de fabricação e utilização generalizada, a JSS tem sido a mais estudada na literatura em termos experimentais e teóricos. Mas isto não quer dizer que seja fácil analisar as tensões presentes nesta junta. De facto, o carregamento não é colinear, o que introduz flexão dos substratos. Por isso, o adesivo fica sujeito não apenas a corte, mas também a arrancamento na extremidade da junta. A JSD, a junta com chanfro e as juntas em degrau são projetadas especificamente para diminuir o arrancamento (da Silva et al. 2007).

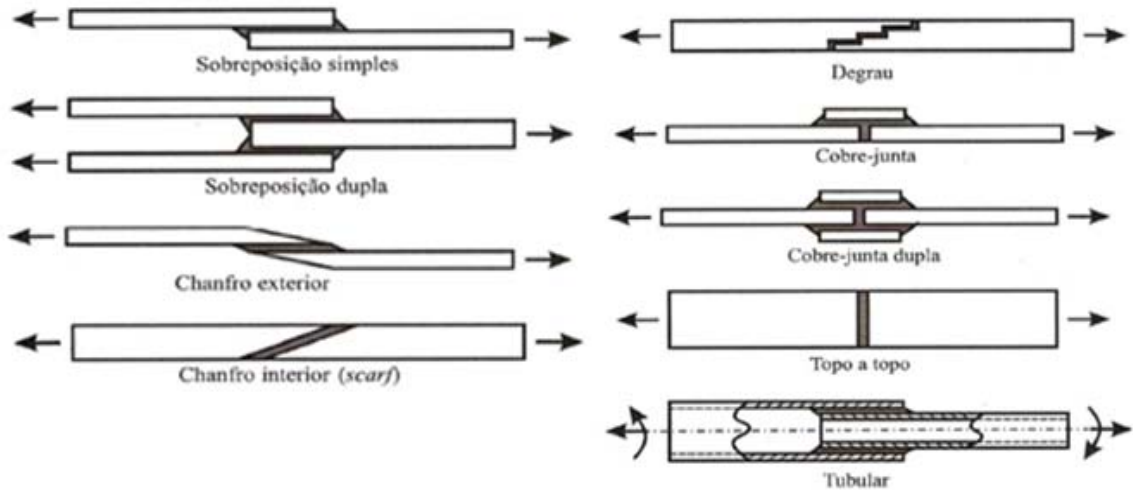


Figura 2.1- Tipos de juntas adesivas (da Silva et al. 2007).

2.1.7 -Modos 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 um modo geral, podem-se distinguir três modos de rotura diferentes em juntas coladas: 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 (da Silva et al. 2007).



Figura 2.2 - Modos de rotura de JSS em substratos de compósito (Banea et al. 2009).

Em juntas adesivas de compósito, de acordo com a norma ASTM D5573, há sete modos típicos de rotura, descritos na Figura 2.2. Os parâmetros típicos que influenciam as roturas

das juntas adesivas em compósitos são: a contaminação da superfície, o filete do adesivo, a espessura do adesivo, a orientação das camadas, a sequência de empilhamento e as condições ambientais. No entanto, ainda é difícil prever o modo de rotura das juntas coladas compósitas devido à multiplicidade de modos de rotura e aos diferentes valores de resistência de cada tipo de rotura (Banea et al. 2009).

2.1.8 - Espessura do adesivo

A espessura do adesivo é uma das características geométricas a considerar no projeto de uma junta. Deve-se assim garantir uma espessura ótima para o adesivo (entre 0,1 e 0,5 mm), necessária à obtenção do melhor desempenho da junta. Na grande maioria das aplicações de juntas coladas, os fabricantes recomendam uma espessura de 0,1 a 0,2 mm para a obtenção da resistência máxima (Gleich et al. 2001). Os motivos pelos quais existe um decréscimo de resistência para valores inferiores a 0,1 mm de espessura não são bem conhecidos. Crê-se, no entanto, que espessuras muito finas aumentam o risco de falhas de colagem com a consequente geração de defeitos (Mahdi et al. 2003). Por outro lado, 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. Os modelos analíticos (Goland e Reissner 1944, Volkersen 1938) ou numéricos, baseados unicamente numa análise elástica, preveem a diminuição das tensões arrancamento e de corte com o aumento de ta . Consequentemente, estes modelos preveem o aumento da resistência da junta, o que contradiz a realidade. Crocombe (1989), recorrendo ao critério de cedência generalizada, mostrou que em JSS a cedência completa do adesivo ocorre prematuramente numa junta com maior valor de ta relativamente a uma de menor espessura (Figura 2.3). O autor concluiu, então, que uma análise não linear material é fundamental para compreender a influência da espessura do adesivo. Todavia, é sabido que os adesivos frágeis atingem a rotura antes da plastificação completa ocorrer. Recentemente, da Silva et al. (2006) recorrendo a uma simulação numérica com elementos finitos incluindo propagação de dano, distinguiram dois tipos de plastificação que podem surgir nas JSS com um adesivo dúctil: (1) a plastificação localizada nas zonas de singularidade e que não se reflete na curva força-deslocamento ($P-\delta$) e (2) a plastificação globalizada que ocorre numa fase muito posterior do ensaio e que origina a alteração de declive da referida curva. A plastificação localizada surge para valores de deslocamento aplicados inferiores nas juntas de menor espessura, ocorrendo o contrário para a deformação plástica generalizada. Esta última constatação explica a razão da diminuição de resistência das juntas com o aumento de ta . Adams e Peppiatt (1974) propuseram três justificações possíveis para explicar a diminuição da resistência com o aumento de ta : 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. Os autores concluíram que a presença dos defeitos internos é o fator preponderante na

explicação do fenómeno. Gleich et al. (2001) propõe uma explicação baseada nas tensões interfaciais. O autor demonstrou que as tensões normais e de corte nas interfaces e junto às extremidades da zona de sobreposição aumentam com o aumento de ta , ao contrário do que sucede com as mesmas componentes de tensão no plano médio do adesivo. As juntas com menor valor de ta apresentam uma distribuição mais uniforme para ambas as componentes de tensão, ao passo que as de maior valor de ta evidenciam um aumento pronunciado junto das interfaces. Estes autores concluíram assim que a maior probabilidade de presença de defeitos internos nas juntas com maior valor de ta adesivo não pode ser considerada como explicação exclusiva para o fenómeno, embora possa contribuir para ele.

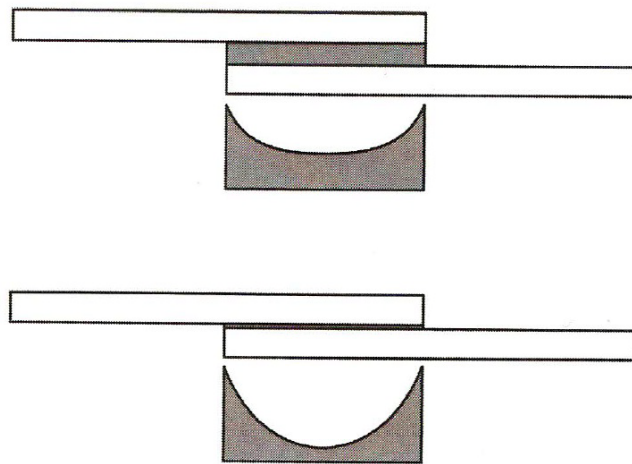


Figura 2.3 - Distribuição das tensões de corte no adesivo para JSS com diferentes valores de ta (da Silva et al. 2007).

O trabalho de Kahraman et al. (2008) avalia a influência de ta em JSS com substratos de alumínio. As dimensões dos provetes utilizados encontram-se na Figura 2.4.

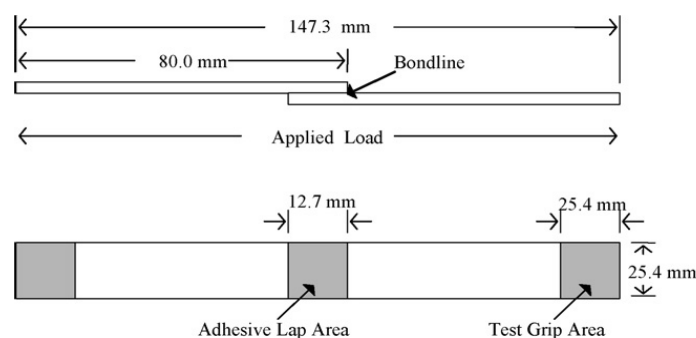


Figura 2.4 - Dimensões das JSS (Kahraman et al. 2008).

O adesivo utilizado nesta investigação foi um adesivo epóxico de dois componentes. Foram ensaiados vários provetes com valores de ta desde 0,1 até 1,4 mm e registou-se a resistência da junta. Os valores obtidos para a força de rotura nos ensaios de tração foram de ≈ 20 MPa para $ta=0,1$ mm e de $\approx 12,5$ MPa para $ta=1,4$ mm. Com estes resultados os autores

concluíram que tanto nos ensaios como nas simulações, as juntas com valor de t_a maior apresentam uma menor resistência.

O trabalho de Nassar et al. (2012) permite avaliar a influência da t_a e l_o em juntas com substratos de compósito, e um adesivo epóxico usando um modelo de simulação do dano. Os substratos usados foram de vidro-epóxico, onde a orientação das fibras foi $[0/90;\pm45]$, e com espessura de substrato (t_p) de 12.5 mm. Os valores de t_a variaram entre 0,58 e 1,27 mm com um l_o de 63,5 mm. É mostrado que o efeito da espessura é insignificante sobre a distribuição de tensões de corte a meio do comprimento de sobreposição, mas influencia o comportamento das referidas tensões na extremidade da sobreposição. Em relação aos diferentes comprimentos de sobreposição (entre 30 e 70 mm), observa-se uma significativa diferença nas distribuições de tensões de corte, na medida em que valores de l_o maiores levam a um aumento dos gradientes de tensão de corte da zona interior da sobreposição para as extremidades.

As mesmas conclusões foram obtidas por Naito et al. (2012), que estudaram a variação das tensões de corte e arrancamento com a variação de t_a . O substrato usado é uma liga de alumínio com as dimensões da Figura 2.5. O adesivo é um poliamida, que foi usado nas JSS com valores de t_a de 0,1, 0,3, 0,5 e 1 mm. As JSS foram ensaiadas à tração com uma velocidade de ensaio de 1 mm/min à temperatura ambiente. Os resultados obtidos permitiram obter as seguintes conclusões: para t_a grandes (1 mm) a capacidade de carga da junta é menor do que para t_a pequenos, isto é quanto maior for t_a menor é resistência da junta. A análise de resistência das juntas para diferentes valores de t_a mostra valores poucos influenciados por t_a (conforme referido por Nassar et al. 2012).

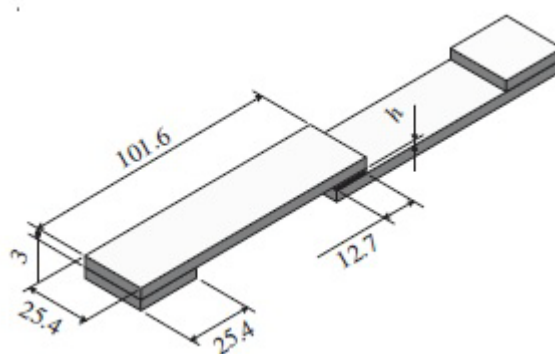


Figura 2.5 - Dimensão dos provetes de JSS (Naito et al. 2012).

2.2 - Compósitos

2.2.1 - História dos compósitos

Os materiais compósitos já existem há muitos séculos. O primeiro registro do aparecimento de materiais compósitos remonta à antiga civilização egípcia, com a introdução do contraplacado e a utilização de um composto de palha com lama para o reforço de tijolos.

A partir dos anos 60, os compósitos de alto desempenho foram introduzidos em grande escala na indústria aeronáutica. O desenvolvimento dos conhecimentos e aplicabilidade dos materiais compósitos é, em grande parte, graças aos inúmeros projetos militares nas áreas da aeronáutica e do programa espacial da década 80 (Staab 1999).

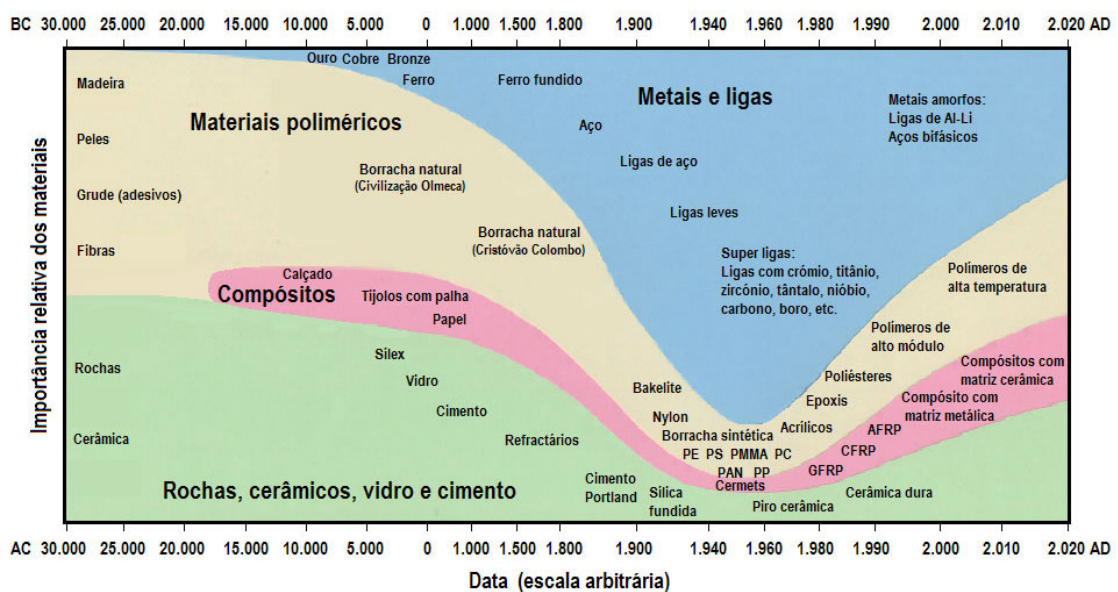


Figura 2.6 - Variação cronológica da importância dos materiais (Ashby 2006).

2.2.2 - Conceito de compósito

Os materiais compósitos são materiais multifásicos obtidos através da combinação artificial de diferentes materiais, a fim de obter propriedades que os componentes individuais, por si só, não podem alcançar. Não são materiais multifásicos em que as diferentes fases são formadas naturalmente por reações, transformações de fase, ou outros fenómenos. Na prática, a maioria das composições consistem de um material, chamado matriz e um outro material chamado de reforço, adicionado principalmente para aumentar a resistência mecânica e a rigidez da matriz, mas também, por vezes, para modificar a sua condutividade térmica ou resistividade elétrica (Cardarelli 2008).

2.2.3 - Classificação dos compósitos

Os compósitos podem ser classificados de acordo com o material da matriz, que pode ser um polímero, um metal, um carbono, uma cerâmica ou um cimento. Podem também ser classificados de acordo com o tipo, forma e topologia do material de reforço (Chung 2010).

2.2.3.1 - Reforços dos compósitos

Um compósito que tenha partículas como o material de reforço é dito ser um compósito de partículas (Chung 2010).

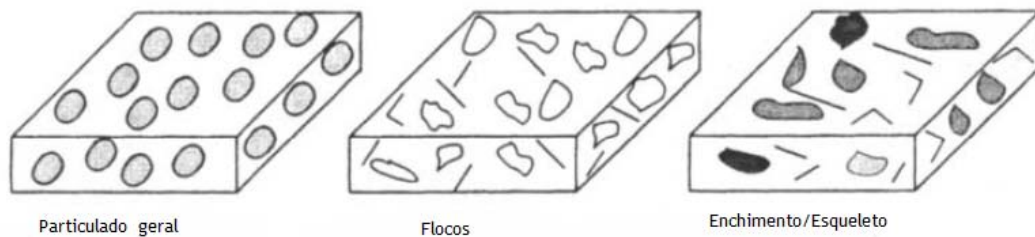


Figura 2.7 - Tipos de partículas nos compósitos (Staab 1999).

Os componentes de um compósito também podem tomar a forma de camadas, massa ou películas. Outro tipo de reforços são as fibras, estas podem ser contínuas (longas) ou descontínuas (úisques/curtas). As fibras longas produzem uma resposta do material que é anisotrópica, mas em muitos casos os reforços de fibras curtas aleatórios produzem compósitos quase isotrópicos. Os compósitos de fibras longas podem ser tanto de camada única como de múltiplas camadas (Staab 1999).

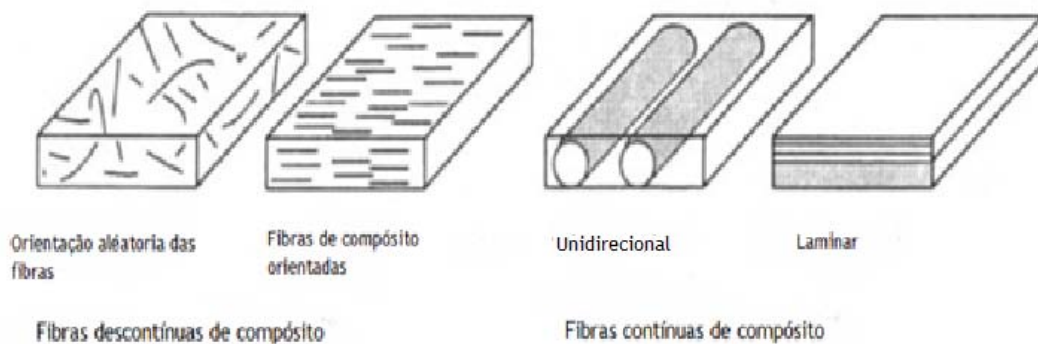


Figura 2.8 - Esquemas de compósitos de fibras (Staab 1999).

2.2.3.2 - Matrizes dos compósitos

Compósitos de matriz polímera (CMP) são os compósitos mais comuns e são também conhecidos como polímeros reforçados com fibras (PRF) ou anteriormente como compósitos à base de resina (CBR). Estes materiais compósitos usam uma resina à base de polímero como matriz, e fibras como o reforço.

Compósitos de matriz cerâmica (CMC) são materiais compósitos utilizados em ambientes agressivos, em altas temperaturas ou quando é necessário resistência à corrosão. A composição deste tipo de compósito consiste numa matriz cerâmica e num reforço de fibras curtas, feitos a partir de carboneto de silício (SiC) e nitreto de boro (BN). Duas importantes sub-classes são os compósitos de matriz vidro-cerâmica (MCV) e compósitos de carbono-carbono (CCC). Os compósitos de matriz metálica (CCM) são muitas vezes considerados como materiais avançados porque apresentam excelentes propriedades mecânicas como uma alta rigidez, uma relação resistência-densidade elevada, resistência a corrosão, e em alguns casos especiais propriedades elétricas e térmicas bastantes favoráveis (Chung 2010).

Tabela 2-1 - Classificação dos compósitos (Chung 2010).

Classe	Tipo de Matriz	Tipo de Reforço
Compósitos de matriz polimérica (CMP) (polímeros reforçados com fibras, base composta por resinas)	Termoplásticos (e.g., PPS, PES)	De enchimento (e.g., pós metal ou cerâmica, partículas, esferas)
		Fibras (e.g., os monofilamentos de carbono /úisques)
		Laminados (e.g., folhas de vidro, folhas de alumínio)
	Termoendurecíveis (e.g., epoxidos, PI, PA)	De enchimento (e.g., pó de metal, ou de cerâmica, partículas, grânulos)
		Fibras (e.g., fibras de vidro, os monofilamentos de carbono /úisques)
		Laminados (e.g., folhas de vidro, papel alumínio, favo de mel)
	Elastómeros (e.g., borracha)	De enchimento (e.g., pó de grafite, partículas, grânulos)
		Fibras (e.g., os monofilamentos de carbono / úisques)
		Laminados (e.g., folhas de vidro)
Compósito de matriz metálica (CMM)	Metais (e.g., Al, Mg, Ti, Cu)	Partículas, flocos (e.g., cerâmica, metal duro, carbono tipo diamante)
		Fibras (e.g., SiC ou B4C ou monofilamentos, úisques)
		Outras (e.g., metal expandido, malha, favo de mel)
	Ligas	Partículas, flocos (e.g., cerâmica, metal duro, carbono tipo diamante)
		Fibras (e.g., SiC ou B4C ou monofilamentos, úisques)
		Outras (e.g., metal expandido, malha, favo de mel)
Compósito de matriz cerâmica (CMC)	Cerâmica	Partículas ou flocos
		Monofilamentos carbono e úisques
		Fibras de metal, fios de corte, e úisques
	Vidro ou Vidro-Cerâmica	Outras (e.g., metal expandido, malha, favo de mel)
		Partículas
	Carbono-Carbono	Monofilamentos, úisques, tecido em favo de mel

2.2.4 Compósitos de fibras longas

Os compósitos de fibras longas são usados como matérias estruturais devido à resistência e ao módulo de elasticidade elevados das fibras, as quais são as que suportam a carga. Os compósitos de fibras podem ser adaptados às condições de utilização através da escolha da orientação das fibras. Uma configuração comum envolve as fibras estarem dispostas em camadas. Uma camada é uma folha que possui fibras com uma certa orientação. O compósito resultante é formado por uma série de camadas sobre postas. Essas camadas podem ser posicionadas com várias orientações, produzindo um compósito com fibras orientadas em direções diferentes. Por exemplo, as fibras das camadas consecutivas podem ser orientadas em 0°, 90°, +45° e -45°, resultando numa configuração bidimensional (2D) quase-isotrópica. A tabela seguinte descreve algumas das configurações mais utilizadas (Chung 2010).

Tabela 2-2 - Exemplos de Configurações do empilhamento das camadas (Chung 2010).

Configuração	Ordem empilhamento
$[0]_8$	Todas as fibras na mesma direção (0°)
$[0/90]_{2s}$	8-camadas 0°, 90°, 0°, 90°, 90°, 0°, 90°, 0°
$[0/45/90/-45]_s$	8-camadas 0°, 45°, 90°, -45°, -45°, 90°, 45°, 0°
$[0/45/90/-45]_{2s}$	16-camadas 0°, 45°, 90°, -45°, -45°, 90°, 45°, 0°, -45°, 90°, 45°, 0°.
$[0/45/90/-45]_{3s}$	24-camadas 0°, 45, 90,-45, 0, 45, 90, -45, 0, 45°, 90°, -45°, -45, 90, 45, 0, -45, 90, 45, 0, -45°, 90°, 45°, 0°

s- significa "simetria no plano central".

A direção perpendicular à camada é conhecida como a espessura. A interface entre duas camadas adjacentes é conhecida como interface interlaminar, que é o elo mecanicamente mais fraco do laminado.

2.2.5 - Plástico reforçado com fibras de carbono (CFRP)

A fabricação de compósitos de matriz polímera de alto desempenho contendo fibras contínuas geralmente envolve camadas de pré-impregnado. As fibras contínuas podem ser alinhadas unidireccionalmente (fitas) ou estarem dispostas em tecido. O pré-impregnado é uma camada de fibras longas orientadas que foram impregnadas com um polímero que não se encontra ainda curado. Um exemplo de um polímero é a resina epóxida que, após a cura (geralmente sob calor e pressão), forma um polímero epóxido, um termoendurecível. No caso

de um pré-impregnado de resina epóxida, o pré-impregnado é flexível e pegajoso, desde que a resina não esteja curada. A fim de aumentar o período de vida de um pré-impregnado de resina epóxida, armazena-se num congelador para retardar o processo de cura. Mesmo com o armazenamento a baixas temperaturas, o período de utilização de um pré-impregnado de resina epóxida é de apenas alguns meses. O nylon, que é um polímero termoplástico, também é utilizado como matriz de compósitos. O amolecimento do polímero termoplástico por aquecimento acima da temperatura de transição vítrea permite ao pré-impregnado ser flexível, o que permite conformar à forma desejada. A Figura 2.9 mostra uma imagem de microscópio eletrônico da superfície de um epóxido pré-impregnado de fibras de carbono. As fibras não podem ser observadas por estarem cobertas com resina (Chung 2010).

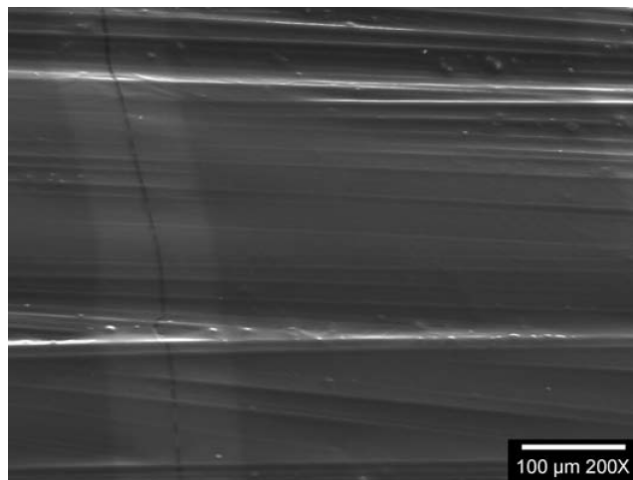


Figura 2.9 - Uma imagem de microscópio eletrônico de varrimento da superfície de um pré-impregnado de fibra de carbono-epóxido (Chung 2010).

Os CFRP são muito utilizados nos mais diversos componentes, como veículos de fórmula 1, equipamentos de desporto e na indústria aeronáutica. O bombardeiro B-2 contém compósitos com fibras de carbono e vidro, e matrizes de resina epóxida, e poliamida de alta temperatura em mais de 10.000 componentes. Esta aeronave constituiu como sendo um dos primeiros passos no sentido de tornar as aeronaves grandes estruturas primárias de compósitos (Staab 1999).

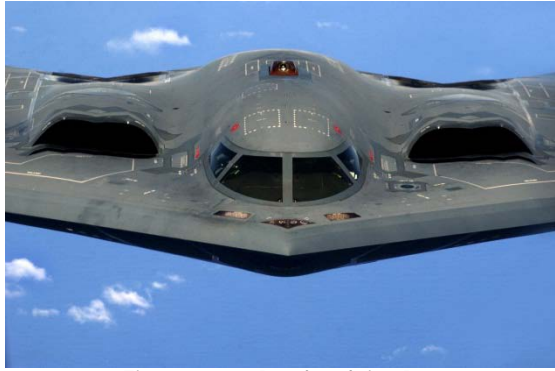


Figura 2.10- Bombardeiro B-2.

2.3 - Elementos Finitos

2.3.1 - Conceitos básicos

A ideia de base no Método de Elementos Finitos é encontrar a solução de um problema complicado substituindo-o por um mais simples. Uma vez que o problema real é substituído por um mais simples seremos apenas capazes de encontrar uma solução aproximada, em vez de a solução exata.

No Método de Elementos Finitos, a região de solução é considerada como construída de muitas de pequenas sub-regiões interconectadas chamadas de elementos finitos (Logan 2010).

2.3.2 - Vantagens do Método de Elementos Finitos

O Método de Elementos Finitos é uma técnica amplamente usada na análise estrutural e, em geral, apresenta diversas vantagens/potencialidades:

- Cria modelos de corpos irregulares com muita facilidade.
- Lida com várias condições de carregamentos e solicitação.
- Modela corpos compostos por diferentes materiais, porque as equações dos elementos são avaliadas individualmente.
- Lida com um número ilimitado e vários tipos de condições de fronteira.
- Permite variar o tamanho dos elementos para tornar possível a utilização de elementos mais pequenos quando necessário.
- Alterar o modelo de elementos finitos é relativamente fácil.
- Inclui efeitos dinâmicos.
- Lida com o comportamento não-linear geométrico (grandes deformações) e a não linearidade dos materiais (Rao 2004).

2.4 - Mecânica do dano

A mecânica do dano permite simular o dano e fratura passo a passo de um componente com uma fenda pré-definida ou arbitrariamente dentro de uma região finita até à rotura completa da estrutura (Duan et al. 2004). Ainda é um campo inovador em constante desenvolvimento, à procura de novas técnicas de modelação, métodos de determinação de parâmetros mais simples e eliminação de problemas de convergência (Liljedahl et al. 2006).

As técnicas disponíveis para a modelação do dano podem ser separadas em abordagens locais ou contínuas. Na abordagem local, o dano é confinado a uma linha de espessura nula ou a uma superfície, o que permite a simulação de uma rotura interfacial entre materiais, juntas adesivas, ou roturas interlaminares nos compósitos. Na abordagem contínua, o dano é modelado sobre uma região finita, no interior de sólidos para modelar roturas coesivas do material, ou então ao longo de uma camada de adesivo para simulação da rotura coesiva da camada como um todo.

Os Modelos de Dano Coesivos (MDC) são baseados nos conceitos de tração-separação e mecânica da fratura, e podem ser aplicados como abordagens locais ou contínuas, uma vez que eles podem ser considerados para modelar o comportamento da fratura interfacial de camadas de compósito igual ou diferentemente orientadas ou interface entre o compósito e a camada de adesivo (abordagem local), ou para simular uma camada fina de um material de espessura constante (abordagem contínua). As camadas finas de adesivo para união de membros estruturais são um grande campo de aplicação dos MDC (Campilho et al. 2008), considerando a aproximação contínua. No entanto, a única linha de elementos coesivos que se usa para modelar a camada fina de adesivo torna impossível diferenciar concentrações de tensões na direção da espessura (Magalhães et al. 2005), proporcionando um comportamento equivalente da ligação.

2.4.1 - Modelos de dano coesivo (MDC)

O conceito de zona coesiva foi proposto por Barenblatt (1959, 1962) e Dugdale (1960) para descrever os danos sob carga estática na zona coesiva à frente da ponta da fenda da fratura. Os MDC foram largamente aperfeiçoados e testados desde então para simular iniciação de fendas e a sua propagação em zonas coesivas, em problema de roturas interfaciais ou delaminações em compósitos.

Uma característica importante dos MDC é a sua facilidade de ser incorporado em *softwares* EF convencionais para modelar o comportamento da fratura em vários materiais, incluindo juntas adesivas (Ji et al. 2010). Os MDC baseiam-se no pressuposto de que uma ou várias interfaces/regiões de fratura podem ser artificialmente introduzidas nas estruturas, e onde o crescimento do dano é conseguido pela introdução de descontinuidades no campo de deslocamentos. A técnica consiste no estabelecimento de leis de tração-separação

(designadas como leis coesivas) para modelar as interfaces ou regiões finitas. As leis coesivas são estabelecidas entre nós homólogos dos elementos coesivos, e podem ser usadas para ligar os nós de elementos sobrepostos representando diferentes materiais ou camadas diferentes nos compósitos. Os elementos coesivos podem simular uma interface de espessura nula (abordagem local; Figura 2.11; Pardoen et al. 2005), ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais que não estão em contato para simular uma camada fina de espessura finita entre eles, como por exemplo uma ligação adesiva (abordagem contínua; Figura 2.12; Campilho et al. 2012).

Algumas técnicas usam a abordagem local (Campilho et al. 2005, Liljedahl et al. 2006, Turon et al. 2007). Com esta metodologia, as dissipações plásticas na ligação adesiva são simuladas pelos elementos finitos sólidos, enquanto a utilização dos elementos coesivos está restrita à simulação do crescimento do dano (Fig. 2.11). As leis coesivas geralmente apresentam uma rigidez inicial extremamente elevada, para não alterar a rigidez global da estrutura. É também viável a colocação dos elementos coesivos em planos diferentes de crescimento na direção transversal da ligação adesiva, o que permite capturar os gradientes de tensão e respetivas concentrações nas regiões singulares (Campilho et al. 2005).

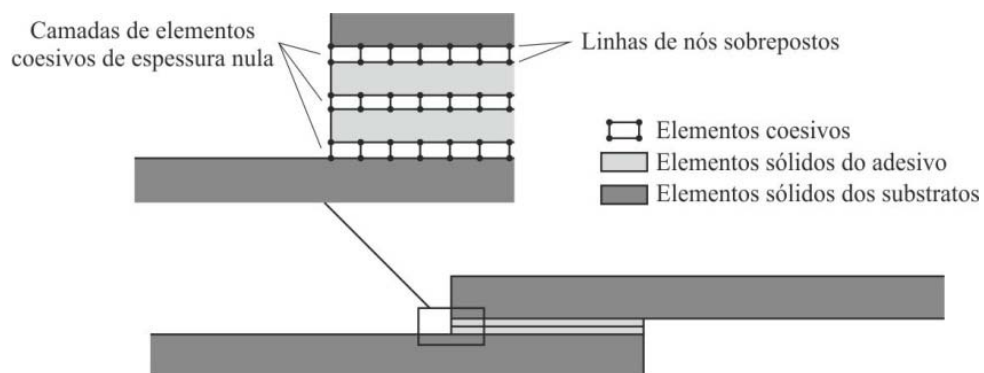


Figura 2.11 - Elementos coesivos para simular o crescimento do dano em ligações adesivas por uma abordagem local (Campilho et al. 2012).

Na abordagem local para simulação das juntas adesivas, o adesivo é modelado como um material elasto-plástico contínuo por elementos sólidos (Pardoen et al. 2005) e a "energia de fratura intrínseca" é considerada pelas leis MDC em vez do G_c , devido à necessária dissipação de energia para criar uma nova superfície, enquanto a dissipação plástica dos materiais dúcteis ocorre nos elementos sólidos representativos da ligação adesiva (Liljedahl et al. 2006). Assim, G_c é a soma destes dois componentes de energias, aumentando pela inclusão da dissipação plástica dos materiais no modelo. Sob estas premissas, o crescimento do dano é governado pelo trabalho da separação das superfícies de fratura em vez de G_c , devido à energia dissipada pelos elementos contínuos. Os efeitos das restrições externas e internas nas dissipações plásticas de uma ligação adesiva são, portanto, consideradas pela abordagem local. Por outro lado, em comparação com a abordagem contínua, são necessários mais parâmetros e cálculos (Ji et al. 2010).

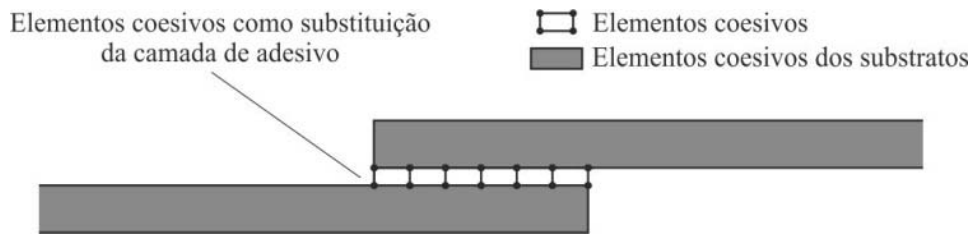


Figura 2.12 - Abordagem contínua numa junta adesiva (Pardoen et al. 2005).

Os MDC também têm sido utilizados para simular o comportamento de ligações adesivas por uma abordagem contínua (Figura 2.12), através da substituição de toda a ligação adesiva por uma única fileira de elementos coesivos com um comportamento equivalente simplificado da ligação adesiva (Kafkalidis e Thouless 2002, Campilho et al. 2008). A rigidez inicial dos elementos coesivos, ao contrário da abordagem local, representa a rigidez da ligação adesiva em cada modo de carregamento, e os comportamentos globais dos aderentes são totalmente correlacionados por estes elementos. Devido à simplicidade desta abordagem, esta tem sido amplamente utilizada na simulação do crescimento de dano em juntas adesivas, dando resultados precisos com as devidas correções nas leis coesivas (Campilho et al. 2009). Apesar da eficiência computacional da modelagem contínua para juntas coladas, existem algumas limitações: o significado físico do processo de fratura foi de alguma forma perdido, porque a verdadeira separação coesiva é geralmente acompanhada por comportamentos de plastificação localizados em toda a camada adesiva, mesmo para adesivos frágeis. A outra limitação é que o MDC se tornou dependente da geometria, mais especificamente de tp e ta , porque estes em grande parte afetam o tamanho da zona de processo de fratura e a plasticidade em torno da ponta da fenda, tornando assim as leis MDC dependentes destes parâmetros (Ji et al. 2010).

De uma geral, os MDC baseiam-se numa relação entre as tensões e os deslocamentos relativos (tração ou corte) que ligam os nós homólogos dos elementos coesivos, para simular o comportamento elástico até à resistência máxima (t_n^0 em tração ou t_s^0 em corte) e subsequentemente degradação das propriedades dos materiais até à rotura. A forma da lei coesiva na zona de degradação também pode ser ajustada para reproduzir de forma fiel o comportamento de materiais distintos. As áreas sob as leis de tração-separação em tensão ou corte (G_n ou G_s , respetivamente) são igualadas à tenacidade à fratura em tração (G_n^c) ou em corte (G_s^c), pela respetiva ordem, para aferir a propagação do dano. Sob uma solitação de tração ou corte puros, o comportamento dos materiais segue a lei respetiva até à rotura. Sob uma carga combinada (tração e corte), são usualmente utilizados critérios de tensões ou energéticos para combinar os dois modos de solitação, dando origem a uma lei de modo misto (Campilho et al. 2012).

Capítulo 3

Trabalho experimental

O trabalho experimental consistiu inicialmente na produção de placas compósitas de CFRP. De seguida fabricaram-se as JSS com o adesivo SikaForce® 7888 e o XNR6852 para realização de ensaios de tração. Para o estudo do comportamento da variação de ta com o adesivo SikaForce® 7888 escolheu-se os valores de ta de 0,2, 0,5, 1 e 3 mm e de $lo=20$ e 60 mm. A escolha destes valores permite abranger a maioria das JSS usadas na indústria. Com escolha de dois lo permite uma posterior comparação do comportamentoda variação de ta .

Os provetes fabricados com o adesivo Sikaforce® 7888 têm as mesmas dimensões dos apresentados no trabalho de Neto et al. (2012) de forma a poder comparar resultados e conclusões, e também aprofundar o respetivo trabalho (Figura 3.1). As principais dimensões das juntas são: $L_T=240$ mm, $b=15$ mm (largura) e $tp=2,4$ mm.

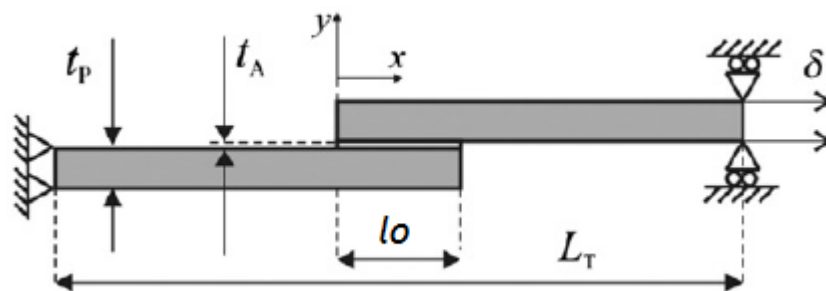


Figura 3.1 - Geometria e dimensões características dos provetes.

Os provetes foram fabricados a partir de pré-impregnado unidirecional (SEAL Texipreg® HS 160 RM) com 0,15 mm de espessura por camada. São necessárias 16 camadas para obter a espessura final dos provetes de $tp=2,4$ mm.

Para garantir $L_T=240$ mm em todos os ensaios, o comprimento dos substratos foi diferente para as duas sobreposições em estudo (20 e 60 mm), conforme se observa nas Figuras 3.2 e 3.3.

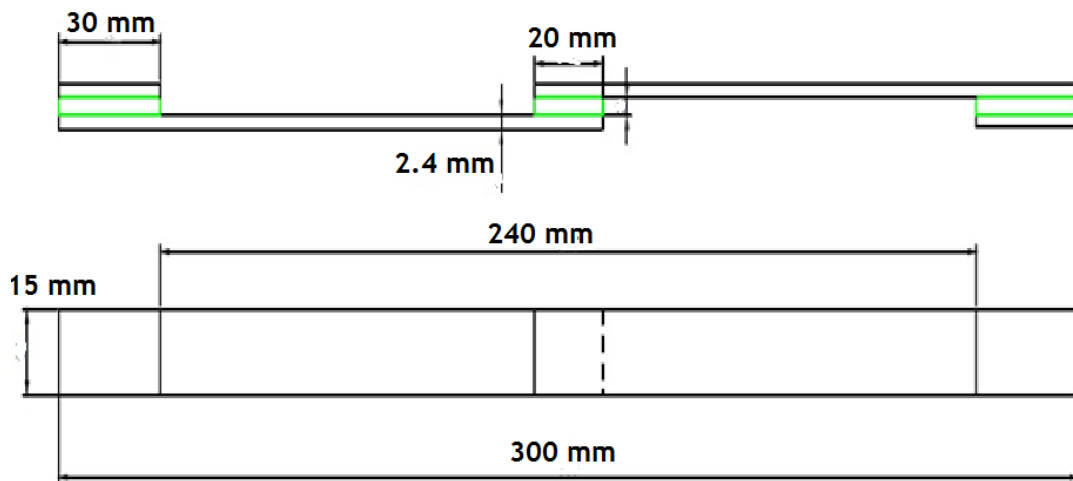


Figura 3.2 - JSS com sobreposição 20 mm.

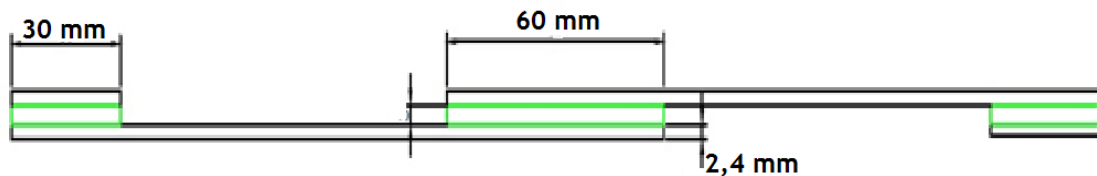


Figura 3.3 - JSS com sobreposição 60 mm.

Os provetes colados com o adesivo XNR6852 foram fabricados com dimensões distintas, devido ao processo de cura a elevada temperatura, que obrigou à compatibilização das dimensões dos provetes com o molde de cura. Sendo assim, as seguintes dimensões foram diferentes das apresentadas anteriormente: $L_T=180\text{mm}$ e $b=25\text{mm}$. Para este adesivo, estudou-se a influência de diferentes valores de l_0 : 10, 20, 30, 40, 50, 60 mm. Os valores de l_0 escolhidos abrangem a maioria das dimensões de JSS usadas na indústria. Foi utilizado o valor de t_a de 0,2 mm, que corresponde ao melhor desempenho expectável da juntas adesivas.

3.1 - Propriedades dos componentes

É importante caracterizar os componentes que constituem as JSS para permitir a sua simulação por EF, com utilização de MDC para a modelação da propagação do dano.

3.1.1 - Adesivos SikaForce® 7888 e XNR6852

Os adesivos utilizados nos ensaios e simulações numéricas foram testados em trabalhos anteriores relativamente às propriedades mecânicas mais relevantes (Neto et al. 2012, Saldanha et al. 2012). O adesivo SikaForce® 7888 é um adesivo estrutural de base poliuretano fornecido pelo fabricante SIKA, composto por dois componentes, e com

Efeito da espessura do adesivo na resistência de juntas de sobreposição simples, na ligação materiais compósitos

aplicações na indústria automóvel. O processo de cura ocorre à temperatura ambiente durante 24 horas. As suas principais propriedades estão descritas na Tabela 3.1.

Tabela 3-1 - Propriedade do adesivo SikaForce® 7888 (Neto et al. 2012, Sika 2012).

Propriedades	SikaForce® 7888
Módulo de Young, E [GPa]	1,89±0,81
Tensão de cedência, σ_y [MPa]	13,20±4,83
Tensão de rotura, σ_f [MPa]	28,60±2,0
Deformação à rotura, ϵ_f [%]	43,0±0,6
Módulo de corte, G [GPa]	0,727
Energia critica modo I, G_{IC} [N/mm]	0,723±0,075
Energia critica modo II, G_{IIC} [N/mm]	8,72±1,22

O outro adesivo utilizado é o XNR6852 da Nagase Chemtex. É um adesivo que combina as propriedades de um adesivo epóxico e um poliuretano, na medida em que combina alongamento e tenacidades elevadas com alta resistência mecânica. É um adesivo estrutural com aplicações na indústria automóvel. É fornecido na forma de uma pasta para ser aplicação direta nos componentes a ligar e cura subsequente a altas temperaturas (150°C durante 3 horas) As propriedades estão descritas na Tabela 3.2.

Tabela 3-2 - Propriedade do adesivo XNR6852 (Saldanha et al. 2012).

Propriedades	XNR6852
Módulo de Young, E [GPa]	1,1763±39,90
Tensão de cedência, σ_y [MPa]	39,25±1.63
Tensão de rotura, σ_f [MPa]	59,88±0,84
Deformação à rotura, ϵ_f [%]	100,7±25,52
Módulo de corte, G [GPa]	0,998
Energia critica modo I, G_{IC} [N/mm]	2,4±0,5
Energia critica modo II, G_{IIC} [N/mm]	12,5±1,1

3.1.2 - Propriedade dos substratos em material compósito

As propriedades elásticas das camadas unidirecionais de Texipreg® 160 RM são definidas no trabalho de Campilho et al. (2008).

Tabela 3-3 - Propriedades elásticas das camadas unidirecionais de CFRP (Campilho et al. 2008).

Propriedades	Texipreg® 160 RM
E_x [MPa]	$1,09 \times 10^5$
E_y [MPa]	8819
E_z [MPa]	8819
ν_{xy}	0,342
ν_{xz}	0,342
ν_{yz}	0,380
σ_{xy} [MPa]	4315
σ_{xz} [MPa]	4315
σ_{yz} [MPa]	3200

3.1.3 - Orientação das fibras

A orientação usada das fibras do compósito durante o emparelhamento das 16 camadas é de 0° . Isto é, as fibras encontram-se paralelas entre si e alinhadas com a direção longitudinal do provete. Assim, obtém-se as melhores propriedades das placas compósitas segundo a direção da solitação. Desta forma, durante os ensaios as fibras então a ser tracionadas juntamente com as juntas adesivas.

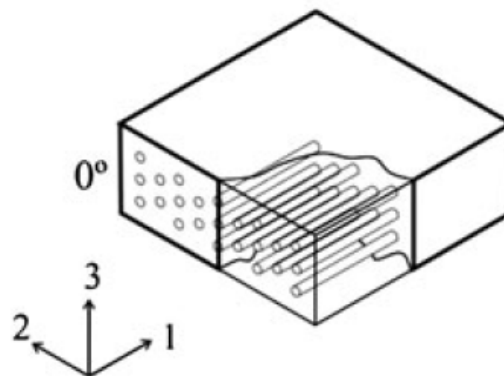


Figura 3.4 - Orientação das fibras nas camadas de pré-impregnado (da Silva et al. 2012).

De uma maneira geral, no caso dos laminados compósitos é aconselhável que estes tenham camadas superficiais com as fibras orientadas paralelamente à direção da solitação para se evitar uma rotura interlaminar destas camadas. De qualquer modo, as tensões de arrancamento podem provocar a rotura interlaminar dos substratos de compósito por via de delaminagens localizadas na proximidade das singularidades (da Silva et al. 2007).

O trabalho de da Silva et al. (2006) aborda a influência das tensões de arrancamento em juntas adesivas com substratos em compósito e híbridas. Os autores começam por referir que os CFRP são normalmente usados pela indústria aeronáutica com uma orientação das

fibras de 0° , e que esse posicionamento leva a que o material seja muito anisotrópico no que diz respeito as suas propriedades. As propriedades na direção das fibras no compósito são muito elevadas, enquanto as propriedades transversais e de corte são muito inferiores. Os autores referem que o principal problema do CFRP é a baixa resistência interlaminar, que apresenta propriedades mecânicas muito baixas, podendo provocar a rotura do compósito em vez do adesivo.

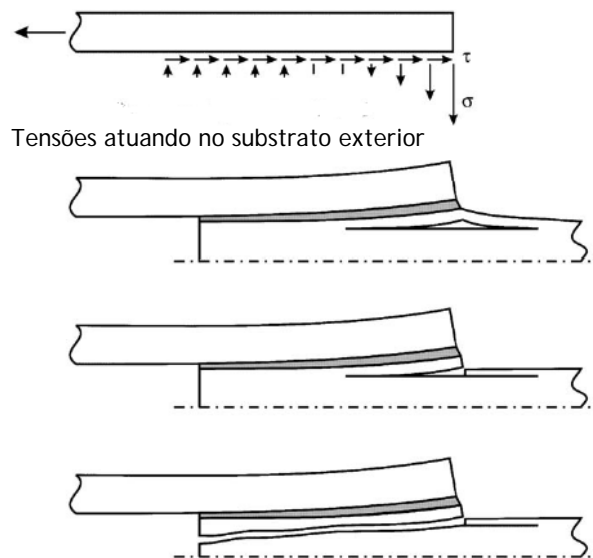


Figura 3.5 - Rotura devido tensão de arrancamento dos substratos (da Silva et al. 2006).

Os referidos autores estudaram JSD com geometrias diferentes do substrato incluindo a utilização de filete de adesivo. Os resultados obtidos mostraram uma distribuição de tensões mais uniformes e uma redução das concentrações de tensões.

3.2 - Fabrico de placas de compósito com pré-impregnado

3.2.1 - Procedimento

Para o fabrico das placas com uma sequência de empilhamento de $[0]_{16}$, seguiu-se os seguintes passos:

- 1) Retirar rolo de compósito de carbono-époxydo da arca congeladora e deixar estabilizar à temperatura ambiente por alguns minutos.
- 2) Dispor o rolo numa superfície limpa e desenrolar. Medir e cortar com o x-ato em placas (no presente caso 600x300 mm) (Figura 3.6).



Figura 3.6- (a) Rolo de compósito de CFRP e (b) procedimento de corte das placas

- 3) De seguida cortar as placas a meio de forma a obter quadrados com 300x300 mm (Figura 3.7).



Figura 3.7 - (a) Placas finais cortadas e (b) Interior da prensa pratos quentes.

- 4) Limpar os pratos da prensa de pratos quentes com ajuda de uma lixa e depois remover gordura e impurezas com acetona e papel.
- 5) Remover com cuidado a película de Teflon[®], evitar colar os dedos ou danificar a resina. Para facilitar a operação pôr as placas no frigorífico durante uns segundos.
- 6) Proceder a um aquecimento com a pistola de ar quente. A temperatura da pistola é de cerca 50°C e deve-se fazer passagens durante 30 s.
- 7) Empilhar cada camada de compósito de forma sequencial (neste caso a orientação de todas as camadas é 0°). Direcionar bem as placas antes de colar porque é impossível de descolar.

Efeito da espessura do adesivo na resistência de juntas de sobreposição simples, na ligação materiais compósitos

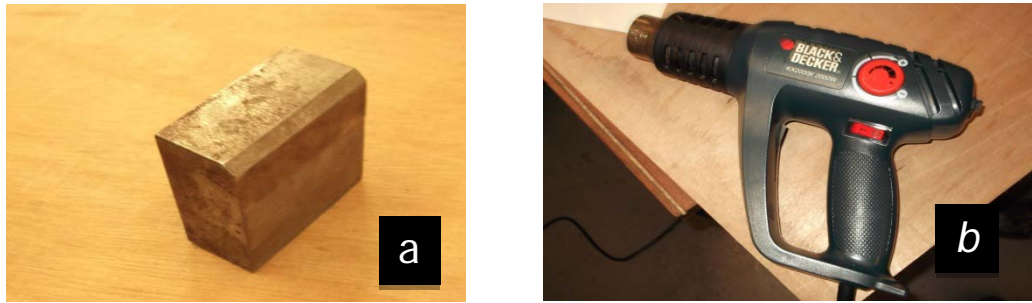


Figura 3.8 - (a) Peso usada para remover as bolhas de ar e (b) Pistola de ar quente.

- 8) Remover as bolhas de ar com um peso. Na parte com papel de proteção esmagar do meio para as pontas com a espátula de forma a remover o ar (Figura 3.8).
- 9) Com uma pinça remover o papel de proteção. Importante remover segundo as direções das fibras do compósito de forma a evitar danificar ou criar bolhas de ar.
- 10) Se após remoção a folha de proteção existir bolhas de ar voltar a passar com o peso.
- 11) Repetir os procedimentos 5,6,7,8,9 e10 para todas as camadas de compósito até terminar a sequência de empilhamento.
- 12) No fim da sequência de empilhamento, cola-se a fita-cola nas duas extremidades paralelas à direção das fibras (Figura 3.9).
- 13) Se não for realizada a cura, isolar a placa com uma película de Teflon® e fita-cola de forma a garantir a estanquicidade e guardar na arca frigorífica.



Figura 3.9 - Procedimento de colar a fita-cola.

3.2.1 Procedimento de Cura

As placas são submetidas a um ciclo térmico na prensa de pratos quentes, com ajuste de pressão e temperatura (Figura 3.10). Os parâmetros utilizados são os recomendados pelo fabricante para garantir boas propriedades das placas de compósito.

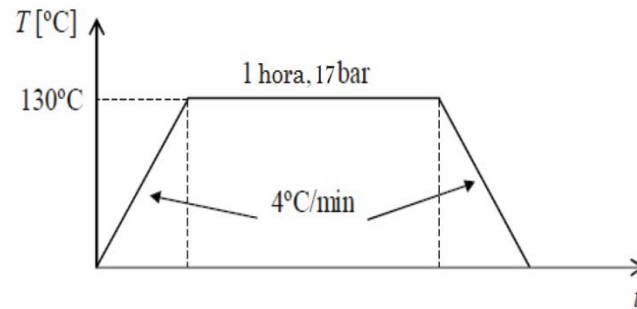


Figura 3.10 - Ciclo térmico para a cura das placas de compósito.

- 1) Ligar a prensa e aquecer os pratos a uma temperatura de 45°C, para melhorar a aderência do Teflon® (Figura 3.11).



Figura 3.11 - Prensa de pratos quentes.

- 2) Limpar as barras com acetona e uma lixa. Aquecer as barras na prensa para melhorar a adesão do desmoldante (Figura 3.12 a). Nota: As barras servem como controle da espessura para as placas CFRP. Evita-se assim que a prensa esmague o CFRP antes de este curar.

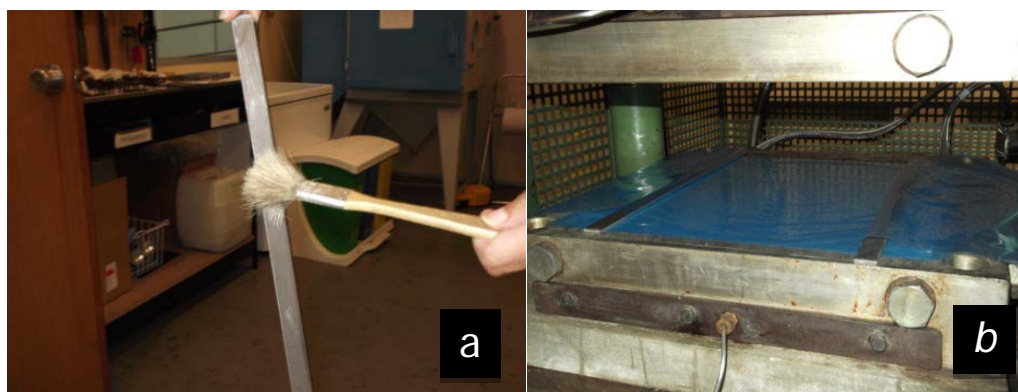


Figura 3.12 - (a) Aplicação de desmoldante nas barras. e (b) Folhas de Teflon® e as barras de espessura posicionadas na prensa.

- 3) Aplicar o desmoldante com um pincel e embrulhar as barras com uma folha de Teflon®.
- 4) Isolar os pratos da prensa com folhas de Teflon®, garantir que as folhas de Teflon® estão bem esticadas e sem vincos.
- 5) Colocar a placa de compósito e as barras paralelas às fibras do compósito.
- 6) Aquecer a prensa aos 130°C recomendados e manter durante 1 hora.
- 7) Quando passar 1 hora mudar a temperatura dos pratos para 20°C e aguardar até a temperatura chegar aos 50°C para remover a placa.
- 8) Durante o arrefecimento, quando a temperatura atingir os 95°C abrir água durante alguns segundos de 2 em 2 min para melhorar o arrefecimento.
- 9) Por fim desligar a prensa, remover a placa e limpar a prensa.

3.2.2 - Corte dos provetes

Depois de serem produzidas as placas CFRP com a dimensão de 300x300 mm realizou-se o corte dos provetes. Esta operação consistiu na utilização de uma máquina de corte de materiais compósitos com um disco de corte revestido a diamante refrigerado por água com mesa deslizante (Figura 3.13). Para garantir as dimensões precisas dos provetes para as JSS começa-se por proceder dois cortes de 90° nas laterais da placa com a ajuda de batentes para posicionar a placa. Com as superfícies da placa lisa e os batentes posicionados com a largura dos provetes procede-se ao respetivo corte. Por fim cortou-se os calços que são depois colados nas extremidades das juntas para o alinhamento na máquina de ensaios tração.



Figura 3.13- Máquina de corte de compósitos.

3.2.3. - Fabricação das JSS com SikaForce® 7888 e XNR6852

Refere-se inicialmente que se tentou fabricar JSS com $t_a=3$ mm para o adesivo XNR6852. Mas como o adesivo apresenta baixa viscosidade estas foram impossíveis de fazer.

3.2.3.1. - Tratamento superficial

O tratamento superficial é aplicado a todos os provetes antecedendo o procedimento de aplicação do adesivo. A superfície onde vai aderir o adesivo é muito importante para garantir uma boa junta. Nas juntas em compósitos a superfície apresenta uma baixa rugosidade, o que leva a uma baixa energia de adesão, e também alguns restos de óleos e pó de carbono resultante do corte, o que torna este procedimento muito importante. O aumento da energia de superfície resultante dos tratamentos térmicos permite igualmente uma melhor molhagem do adesivo e a formação de um filme contínuo. Primeiro agrupa-se os provetes que apresentam dimensões aproximadas (o corte provoca pequenas variações na largura dos provetes de $\approx 0,5$ mm) e em seguida usando uma folha de lixa grossa procede-se à remoção da camada superficial do compósito e de fibras soltas nas laterais. Deve-se evitar usar muita força para não danificar as fibras do CFRP. Depois usando acetona e papel limpou-se muito bem a superfície até não existir nenhum vestígio de sujidade e poeiras. A Figura 3.14 mostra o resultado final do tratamento superficial do CFRP.



Figura 3.14 - Acabamento superficial nos provetes (Neto et al. 2012).

3.2.3.2 Procedimento de colagem

Este procedimento do adesivo SikaForce® 7888 deve ser realizado por duas pessoas. O adesivo é fornecido num tubo de dois componentes que são misturados num tubo de mistura estático. Com uma “pistola” pneumática, mostrada na Figura 3.15, aplica-se o adesivo nos provetes. Primeiro segura-se os provetes com ajuda de amarras numa superfície plana isolada com Teflon®. De seguida um operador segura e procede à aplicação do adesivo com a “pistola” enquanto o outro operador guia e alinha as juntas. É importante controlar o alinhamento e dimensão da sobreposição a fim de garantir a veracidade dos resultados obtidos. Para cada JSS colou-se calços nas extremidades. A função destes calços é manter a JSS alinhada durante os ensaios de tração. Por fim, com uma mola aplica-se pressão força junto da zona colada para garantir uma boa adesão e verifica-se o alinhamento e a dimensão da sobreposição no final de cada procedimento de colagem.

Efeito da espessura do adesivo na resistência de juntas de sobreposição simples, na ligação materiais compósitos

Repete-se este procedimento para todos os provetes. Durante a aplicação do adesivo utiliza-se um padrão em s (Figura 3.16) para garantir que toda a área da junta é coberta e evitando-se o aprisionamento do ar entre cordões consecutivos. Para criar as JSS com diferentes espessuras foram usadas camadas de papel de 80 g/m² como calços para produzir as espessuras de $t_a=0,2, 0,5, 1$ e 3 mm de adesivo como se observa na Figura 3.17. Sabendo que cada película de papel apresenta uma espessura de 0,1 mm.

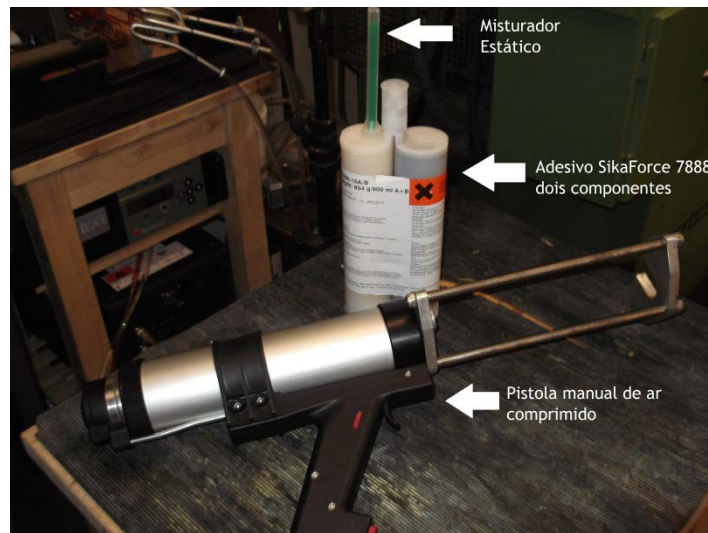


Figura 3.15 - Adesivo SikaForce® 7888 e pistola pneumática.

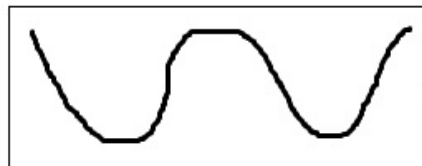


Figura 3.16 - Modo de aplicação do adesivo.



Figura 3.17 - Procedimento de montagem das JSS.

O procedimento de colagem do adesivo XNR6852 é diferente do SikaForce® 7888. Em primeiro lugar o adesivo apenas tem um componente que requer temperatura elevada para o processo de cura. Para este processo usou-se o molde representado na Figura 3.18. Para garantir que o adesivo e o compósito não aderem ao molde limpou-se muito bem com acetona e depois aplicou-se várias camadas de Loctite® 770NL (desmoldante). Posiciona-se os provetes no molde com ajuda de parafusos e calços. Aplicou-se o adesivo com uma espátula nos provetes de CFRP e procedeu-se ao alinhamento com cuidado. A espessura foi controlada com camadas de folhas de papel resistente ao calor devido à elevadas temperaturas de cura. Como nas juntas de SikaForce® 7888, colaram-se calços nas extremidades de cada junta para alinhamento nas garras de aperto da máquina de tração.



Figura 3.18 - Molde com as JSS do adesivo XNR6852.

3.2.3.3. - Cura dos adesivos

Os dois adesivos estudados apresentam processos de cura muito diferentes. No caso do adesivo SikaForce® 7888 o fabricante recomenda fazer a cura à temperatura ambiente durante 24H. Já para o adesivo da Nagase o XNR6852 a cura é feita numa prensa de pratos quentes a uma temperatura de 150°C durante 3 horas como é especificado pelo fabricante. A duração e condições do processo de cura devem ser respeitadas para se conseguir obter as melhores propriedades adesivas possíveis. Para realizar o processo de cura com temperatura foi usada a prensa de pratos quentes INTOCO. Durante a cura as JSS estão sobre constante pressão aplicada pela prensa.

3.2.3.4. - Remoção do excesso adesivo dos provetes

Após colagem e cura, os provetes apresentam excesso de adesivo que necessita de ser removido, porque este alterar os campos de tensão na zona de sobreposição e como tal

também o valor de resistência das juntas. Estudos científicos indicam que o filete de adesivo (excesso de adesivo) permite aliviar a concentração de tensões e a distribuição das tensões transversais no compósito seriam mais uniformes, afetando assim os resultados obtidos as JSS (da Silva et al. 2007).

Este processo apresenta algumas dificuldades porque o CFRP é facilmente danificado pela mó de polir (Figura 3.19). O equipamento usado nesta operação consiste em luvas, bata, óculos de proteção e extratores de pó (Figura 3.20). Segurando o provete e com a mó de polir remove-se o excesso de adesivo ao longo da periferia da zona colada.



Figura 3.19 - Ferramenta pneumática com mó.

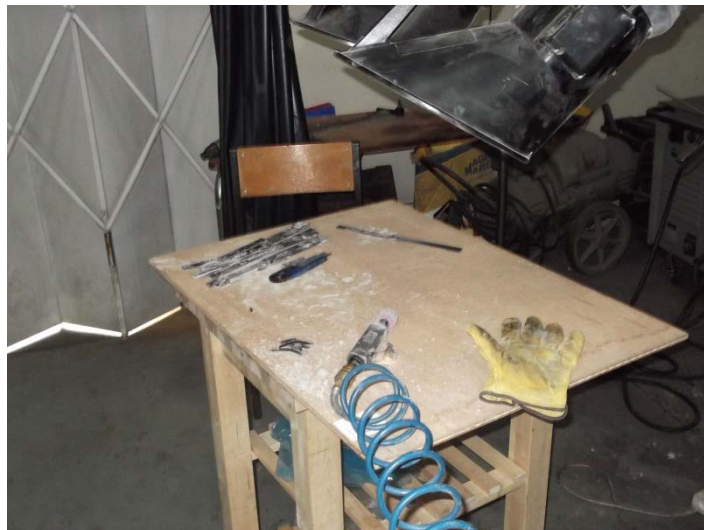


Figura 3.20 - Mesa de trabalho.

3.2.3.5.- Ensaios de tração das JSS de SikaForce[®] 7888 e XNR6852

Para as JSS com adesivo SikaForce[®] 7888 o equipamento utilizado foi uma máquina INSTRON modelo 3367 com uma célula de carga de 35 kN (Figura 3.21). No caso das JSS com o

Efeito da espessura do adesivo na resistência de juntas de sobreposição simples, na ligação materiais compósitos

adesivo XNR6852 foi utilizado uma máquina mecânica SHIMADZU (Figura 3.22) com uma célula de carga de 100 kN. As previsões para força de rotura de algumas JSS com adesivo XNR6852 eram superior á célula de carga da máquina INSTRON, por isso é que foi necessário recorrer a outra máquina de ensaios. Para ambos os casos procede-se ao alinhamento e fixação dos provetes nas maxilas da máquina e iniciou-se o ensaio até atingir a rotura. Regista-se os dados na forma de curvas $P-\delta$ e no fim de cada ensaio fez-se uma análise (visual) do tipo de rotura obtido para cada JSS. Os ensaios realizaram a temperatura ambiente com uma velocidade de 1 mm/min o que permitiu um ensaio controlado em condições quasi-estáticas. A Tabela 3.4 e 3.5 mostra número de ensaios de JSS para cada condição e tipo de adesivo.



Figura 3.21 - Máquina de ensaios INSTRON.



Figura 3.22 - Máquina de ensaios SHIMADZU.

Efeito da espessura do adesivo na resistência de juntas de sobreposição simples, na ligação materiais compósitos

Tabela 3-4 - Número de JSS tracionados para cada condição do adesivo XNR6852.

	<i>l_o</i> =10 mm	<i>l_o</i> =20 mm	<i>l_o</i> =30 mm	<i>l_o</i> =40 mm	<i>l_o</i> =50 mm	<i>l_o</i> =60 mm
<i>t_a</i> =0,2 mm	3	4	3	4	3	4

Tabela 3-5 - Número de JSS tracionados para cada condição do adesivo SikaForce® 7888.

	<i>t_a</i> =0,2 mm	<i>t_a</i> =0,5 mm	<i>t_a</i> =1 mm	<i>t_a</i> =3 mm
<i>l_o</i> =20 mm	6	5	5	5
<i>l_o</i> =60 mm	5	5	4	4

Capítulo 4

Simulação numérica

4.1 - Procedimento da simulação em ABAQUS®

A simulação computacional é uma ferramenta vital no *design* e criação de projetos de engenharia. Com um reduzido custo (*software* e computador) as simulações numéricas permitem obter o comportamento de componentes sobre solitação. Tanto as experiências em laboratório como as simulações numéricas são duas ferramentas importantes para compreender os fenómenos físicos das juntas adesivas. Com o desenvolvimento das técnicas de simulação os valores obtidos nos resultados numéricos são cada vez mais precisos e fiáveis. A simulação computacional das juntas adesivas realizadas neste trabalho permite assim obter informação detalhada do comportamento sobre solitação das JSS.

4.1.1 - Condições da simulação numérica

A análise de EF é feita em 2D com MDC, e baseia-se na utilização de elementos sólidos de 4 nós para os substratos (CPE4 do ABAQUS®) e elementos coesivos para a camada de adesivo (COH2D4 do ABAQUS®). Foi utilizada uma análise 2D como aproximação da geometria em análise, sabendo-se que esta fornece resultados precisos para este tipo de geometrias (Campilho et al. 2012).

Os substratos de CFRP são modelados de uma forma mista, isto é, na sua maioria por elementos contínuos com um comportamento ortotrópico, mas incluindo também zonas interlaminares para simulação da rotura interlaminar, modeladas por elementos coesivos com o modelo de dano triangular, utilizando a abordagem local. O adesivo é modelado por elementos coesivos como a zona interlaminar, embora por uma abordagem contínua. O MDC usado é o modelo de dano triangular que existe no ABAQUS® e que se encontra descrito na secção 4.1.2. Este modelo caracteriza adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivo e requer poucos parâmetros para a simulação.

A descrição seguinte refere passo a passo as operações realizadas para a criação das juntas na interface do ABAQUS®. Na interface gráfica existem vários passos que devem ser completados de forma sequencial, conforme se refere.

1º Part

Inicia-se por desenhar a junta adesiva, como mostra a Figura 4.1. Desenhou-se só um corpo para modelar os substratos e adesivo, em vez de os modelar separadamente, o permite reduzir a complexidade do sistema sem afetar a validade dos resultados obtidos. Para cada caso de ta e lo em estudo foram recriados os provetes com a suas dimensões características na simulação numérica.

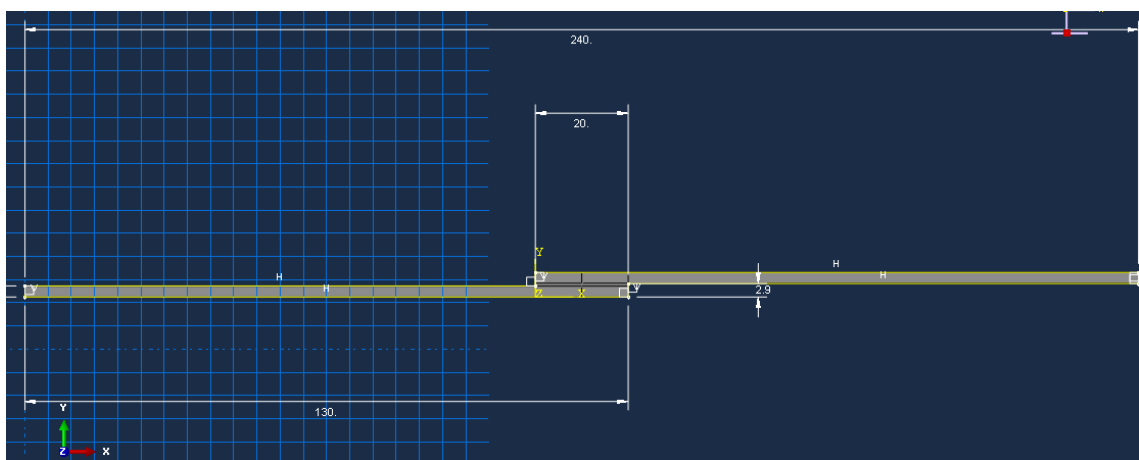


Figura 4.1 - Desenho 2D dos provetes em ABAQUS®.

Depois de desenhar o conjunto substratos-adesivo é necessário dividir em partições de forma a atribuir diferentes propriedades e comportamentos às secções.



Figura 4.2 - Diferentes partições na simulação dos provetes em ABAQUS®.

As partições criadas devem isolar diferentes zonas da junta, como a camada de adesivo com ta de 0,2 mm e as zonas de rotura interlaminar do compósito, dispostas ao longo de todo o comprimento dos substratos e posicionadas a 0,05 mm da interface com o adesivo para simulação da rotura interlaminar. Este procedimento é baseado nos trabalhos de Campilho et al. 2008 e Neto et al 2012, e consistiu na medição pós-rotura da espessura

Efeito da espessura do adesivo na resistência de juntas de sobreposição simples, na ligação materiais compósitos

removida do substrato nas roturas interlaminares observadas. O objetivo é para que as simulações numérica reproduzam o mais fielmente possível os resultados experimentais.

2ºProperty

Nesta secção atribui-se as propriedades mecânicas a cada segmento criado anteriormente. As secções criadas são o compósito, adesivo e o interlaminar. As propriedades dos adesivos foram obtidas por ensaios Double-Cantilever Beam (DCB), End Notched Flexure (ENF) e de provetes sólidos ensaiados à tração realizados em projetos anteriores (Neto et al. 2012, Saldanha et al 2012). As propriedades interlaminares do CFRP foram obtidas no trabalho de Campilho et al. (2008) (Tabela 4.1). As propriedades dos adesivos estão descritas na Tabela 4.2.

Tabela 4-1 - Propriedades interlaminares do compósito para a modelação MDC (Campilho et al. 2008).

<i>Propriedades</i>	
K_1 [N/mm ³]	10 ⁶
K_2 [N/mm ³]	10 ⁶
[MPa]	25,0
[MPa]	13,5
[N/mm]	0,33
[N/mm]	0,79

Tabela 4-2 - Propriedades dos adesivos para a modelação MDC (Neto et al. 2012, Saldanha et al. 2012).

<i>Propriedades</i>	<i>SikaForce 7888</i>	<i>XNR6852</i>
E [MPa]	1890	1176,25
G [GPa]	0,727	0.4524
[MPa]	28,6	39
[MPa]	20	19
[N/mm]	0,7023	2,4
[N/mm]	10	12,5

3ºAssembly

Não se aplica sendo só uma parte sólida.

4ºStep

Nesta secção introduz-se os parâmetros de computação da simulação. Os incrementos e tamanhos estão descritos na Figura 4.3. Aplicou-se um número máximo de incrementos elevados para evitar a paragem da análise por exceder o nº permitido de incrementos. O

tamanho dos incrementos é reduzido para evitar uma variação repentina da rigidez da junta, o que podia bloquear a simulação.

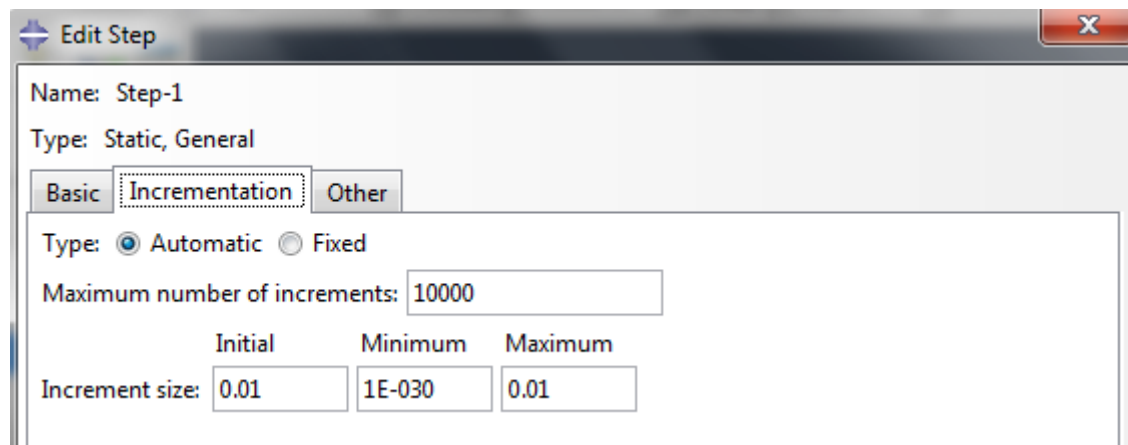


Figura 4.3 - Definição dos incrementos em ABAQUS.

5ª Interaction

Não se aplica neste caso porque é uma peça única.

6ª Load

Para simular carregamento de tração é necessário introduzir condições fronteira na peça. A Figura 4.4 permite visualizar as condições fronteira utilizadas nas simulações em ABAQUS®. Numa das extremidades do substrato simula-se um encastramento enquanto no outro lado aplica-se um deslocamento horizontal de 1 mm e restringe-se o movimento verticalmente.

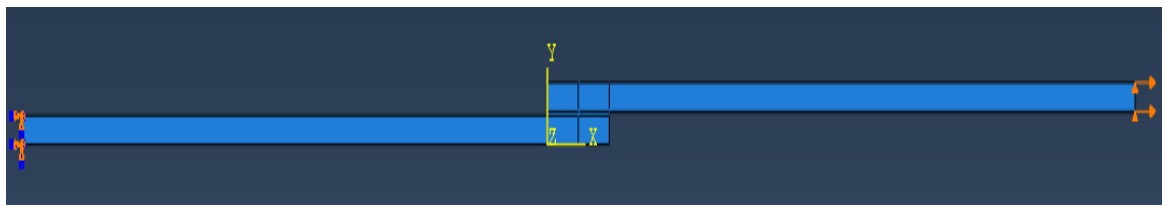


Figura 4.4 - Representação das condições fronteira na simulação ABAQUS®.

7ª Mesh

Nesta secção divide-se as juntas em elementos finitos. As zonas onde ocorrem os maiores gradientes de tensão devem ser o mais refinadas possível. Como mostra a Figura 4.5, as zonas mais perto das extremidade da sobreposição estão mais refinadas do que o centro da junta. As secções simuladas por elementos coesivos (zona interlaminares e adesivo) apenas apresentam um elemento segundo a vertical. À medida que se aumentou o valor de l_0 aumentou-se o número de elementos na junta colada de forma a manter idêntico o tamanho dos elementos nas zona críticas. Por exemplo, para uma sobreposição $l_0=20$ mm existem

cerca de 35 elementos do meio para extremidade da sobreposição e no caso $l_0=60$ mm 90 elementos.

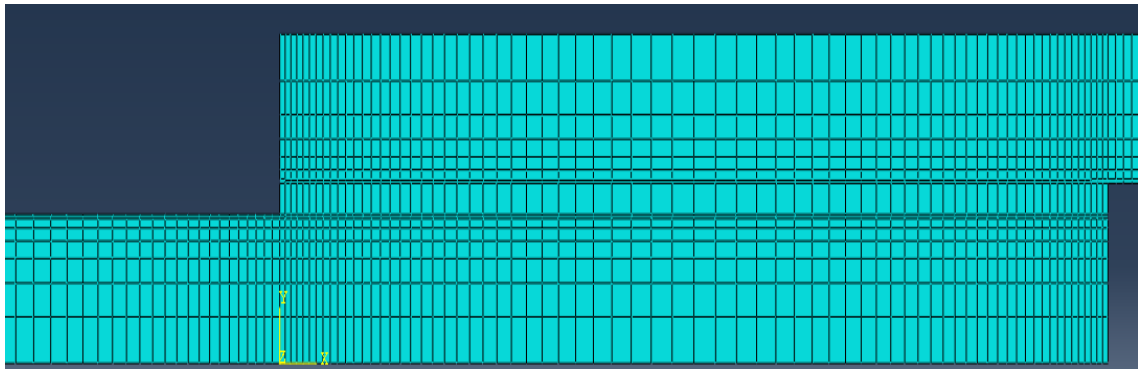


Figura 4.5 - Malha dos provetes em ABAQUS® para a JSS de $l_0=20$ mm e $t_a=0,5$ mm.

8º Job

Nesta área dá-se início à simulação, coloca-se o nome e a capacidade computacional que se quer dedicar à simulação no menu das opções.

9º Results

Depois de terminar a simulação é necessário proceder à análise dos resultados para produzir as curvas $P-\delta$. No "output" de valores soma-se todas as reações do encastramento e retira-se os valores do deslocamento para criar as curvas $P-\delta$.

4.1.2 - Modelo de dano triangular

A lei de dano triangular, descrita em detalhe nesta secção, é a mais vulgarmente usada devido à sua simplicidade e reduzido número de parâmetros a ser determinado, e geralmente produz resultados aceitáveis para a maioria das condições reais (Liljedahl et al. 2006). Contudo, genericamente falando, a forma das leis coesivas pode ser ajustada para conformidade com o comportamento do material, ou da interface que ser simulado para mais resultados mais precisos (Campilho et al. 2009).

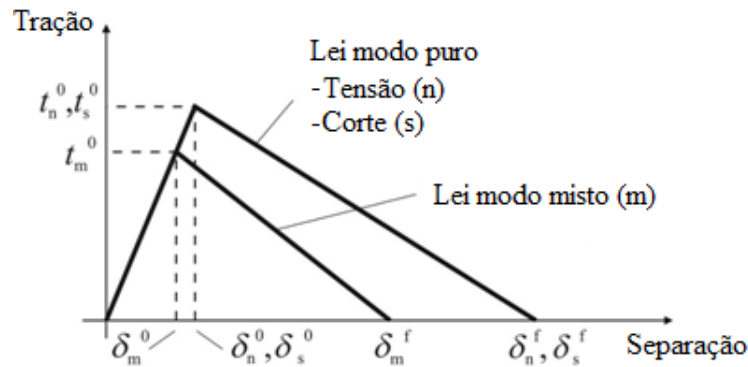


Figura 4.6- Lei de tração-separação triangular disponível no ABAQUS® (Abaqus 2009).

A lei triangular, ver a Figura 4.6, assume inicialmente um comportamento linear elástico, seguido de degradação linear. A elasticidade é definida por um matriz constitutiva (\mathbf{K}), que contém os parâmetros de rigidez, para relacionar as tensões e deformações em tração e corte ao longo dos elementos coesivos (subscritos n e s, respetivamente).

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} \\ K_{ns} & K_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K} \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Para camadas finas de adesivo, uma aproximação viável é dada por $K_{nn} = E$, $K_{ss} = G$ e $K_{ns} = 0$. A iniciação do dano pode ser especificada por diferentes critérios. É considerado o critério quadrático de tensões que se segue para a iniciação do dano, por já ter sido provada a sua fiabilidade (Campilho et al. 2012), e dado por:

$$\left\langle \frac{t_n}{t_n^0} \right\rangle^2 + \left\langle \frac{t_s}{t_s^0} \right\rangle^2 = 1. \quad (2)$$

$\langle \rangle$ são os parêntesis de Macaulay, que indicam que um estado de tensão puramente compressivo não contribui para a iniciação do dano. Depois de atingida a resistência máxima em modo misto (t_m^0 na Figura 4.6), através da equação acima, a rigidez do material é degradada. A separação completa é prevista por um critério linear energético da forma

$$\frac{G_n}{G_n^c} + \frac{G_s}{G_s^c} = 1. \quad (3)$$

Capítulo 5

Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de tração, simulações em ABAQUS® e análise analítica.

5.1 - Ensaio de tração das JSS com adesivo o SikaForce® 7888

5.1.1 - Ensaio de tração das JSS com uma sobreposição de 20 mm

As curvas $P-\delta$ dos ensaios de tração estão em Anexo C. Para poder interpretar os resultados obtidos dos ensaios de tração, é apresentada a Figura 5.1 com os valores médios da carga de rotura e desvio padrão em função de t_a .

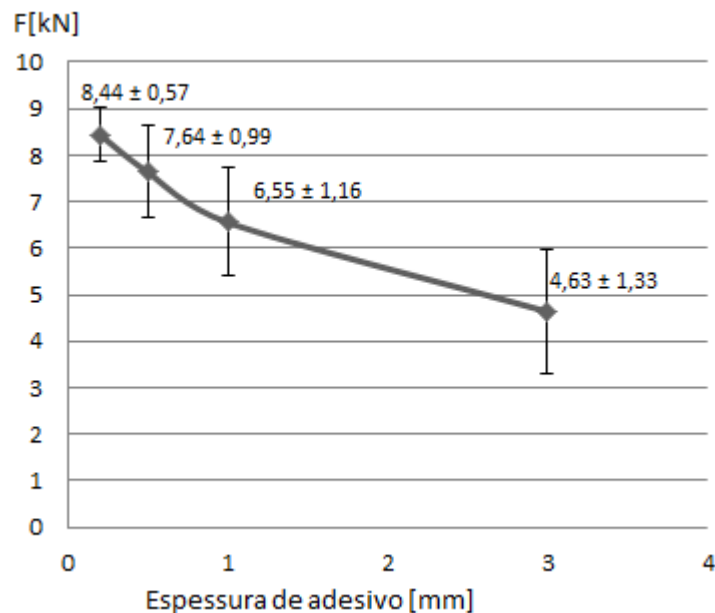


Figura 5.1 - Força de rotura média e desvio padrão em função de t_a para $l_o=20$ mm.

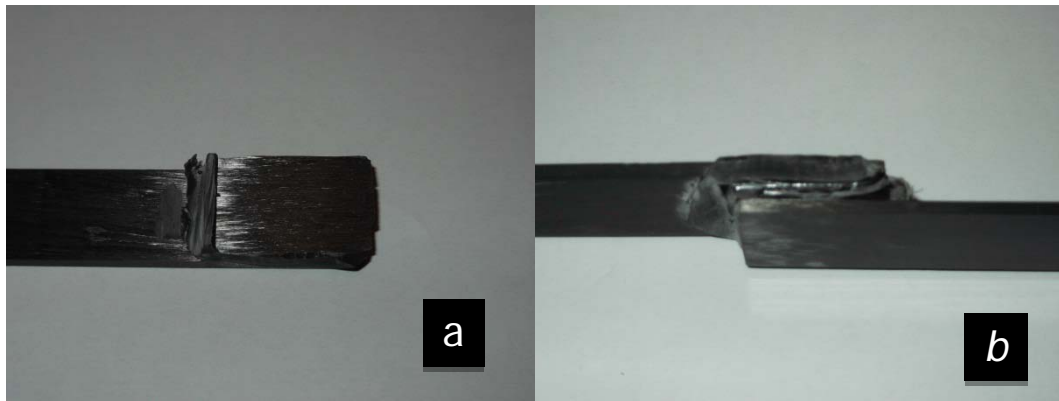


Figura 5.2 - a) Rotura da camada superficial do CFRP na JSS de $t_a=3$ mm e (b) rotura coesiva na JSS de $t_a=3$ mm.

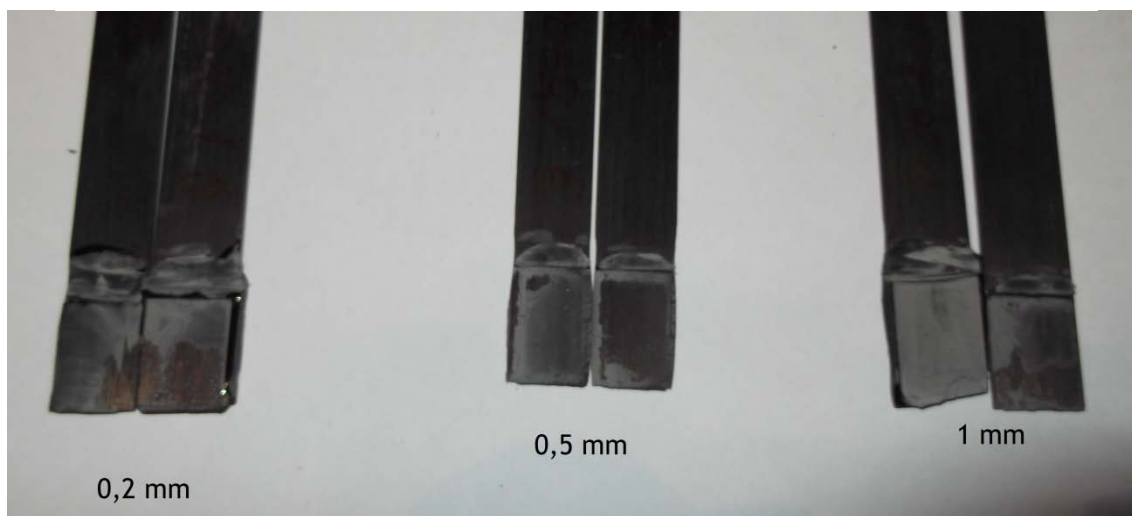


Figura 5.3 - Roturas coesivas de para $t_a=0,2$, 0,5 e 1 mm.

Começa-se por referir que a maioria dos provetes ensaiados apresentou um tipo de rotura coesiva, isto é, a rotura ocorre no interior do adesivo. A Figura 5.3 mostra isso mesmo, onde para três JSS com t_a diferentes se verifica visualmente rotura coesiva. Isto permite verificar a influência do valor de t_a na resistência da camada de adesivo, como se pretende.

O valor obtido para $t_a=0,2$ mm é idêntico ao obtido no trabalho de Neto et al. (2012) para condições geométricas e materiais idênticas (€ 8,5 kN). A Figura 5.2 a) mostra uma JSS com $t_a=3$ mm onde verifica-se uma rotura nas fibras do CFRP.

Para valores superiores de t_a ($t_a=1$ mm e $t_a=3$ mm) algumas JSS no fim do ensaio não apresentam uma separação completa da junta. A Figura 5.2 (b) mostra uma JSS de 3mm depois do ensaio, onde os substratos ainda se encontram unidos pela camada de adesivo. Através da análise visual da junta fraturada, observa-se claramente uma fenda coesiva no adesivo.

Os dados da Figura 5.1 mostram que o valor da carga máxima para JSS com espessuras de adesivos menores é sempre superior do que as JSS com espessuras maiores e que há uma progressiva com o aumento de t_a . Os valores experimentais obtidos de carga máxima no ensaio de tração para cada grupo de espessuras apresentam também uma

repetibilidade bastante razoável, como se pode verificar pela análise do desvio padrão. A Figura 5.4 é uma comparação para os valores médios obtidos por valor de t_a da capacidade máxima das JSS. Considerando como o melhor desempenho possível o valor de 8,4 kN para $t_a=0,2$ mm, comparou-se com os valores obtidos para outras espessuras.

Só fazendo variar o valor de $t_a=0,2$ mm para $t_a=3$ mm faz com que a capacidade da junta suportar carga fique reduzida em $\approx 50\%$. Um valor muito elevado se tivermos em conta que as condições são todas iguais e o único fator a variar é t_a . Esta diferença da capacidade de carga das juntas pode ser explicada por vários fatores. Em primeiro lugar a utilização de uma espessura elevada de adesivo potencia a aparição de defeitos como poros de ar, microfissuras ou até degradação do adesivo. Também se sabe que as propriedades coesivas de camadas finas de adesivo (tensões coesivas e tenacidades) variam bastante com o valor de t_a da junta adesiva (Carlberger and Stigh 2010), embora este aspeto não tenha sido detalhado neste trabalho. Outro fator a ter em conta é a tensão de corte mais elevada nas extremidades das juntas adesivas com maiores valores de t_a , levando a uma plastificação prematura.

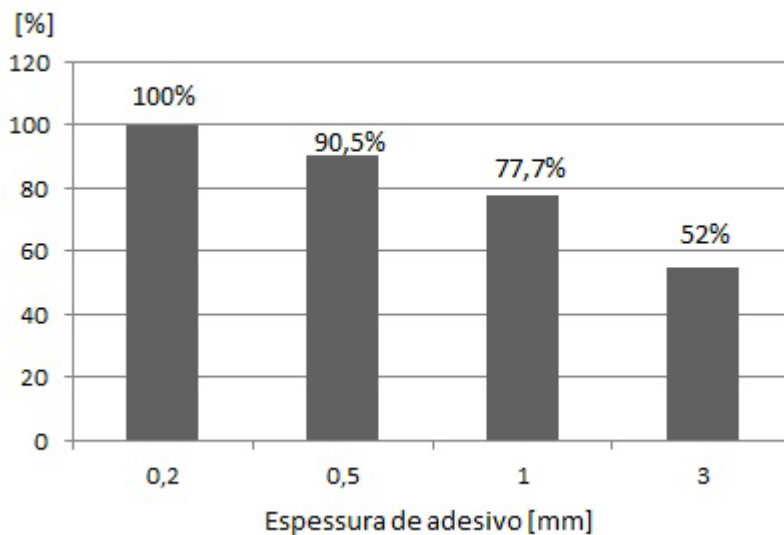


Figura 5.4 - Comparação da capacidade de carga das JSS para $l_o=20$ mm.

5.1.2 - Ensaio de tração de JSS com uma sobreposição de 60 mm

Tal como para a sobreposição de $l_o=20$ mm a informação obtida dos ensaios de $l_o=60$ mm é descrita na Figura 5.5. e na forma de tabela no Anexo B e curvas de $P-\delta$ no Anexo D. São sobrepostos os resultados $l_o=20$ mm para permitir comparação.

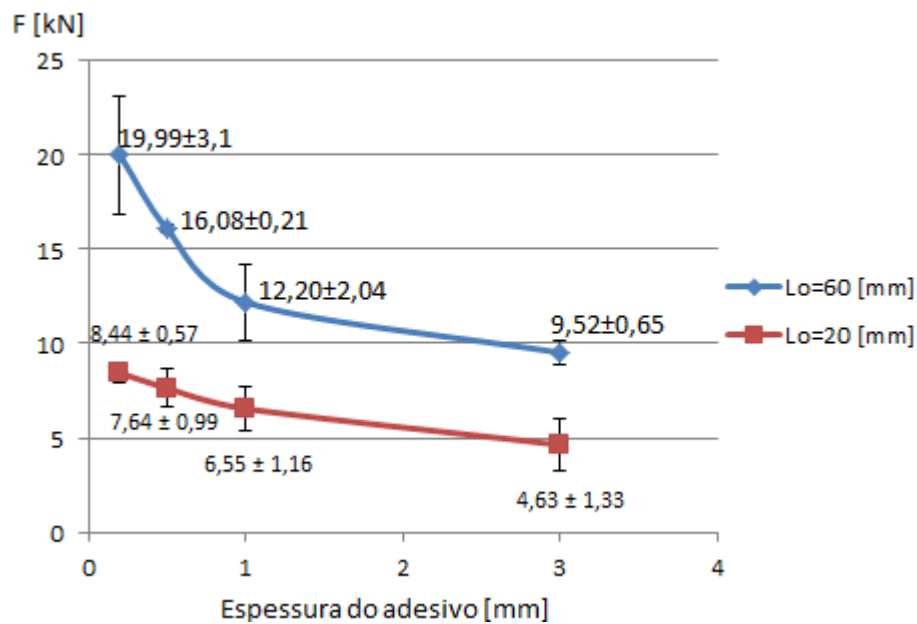


Figura 5.5 - Força de ruptura média e desvio padrão em função de t_a para $l_o=20$ e 60 mm.

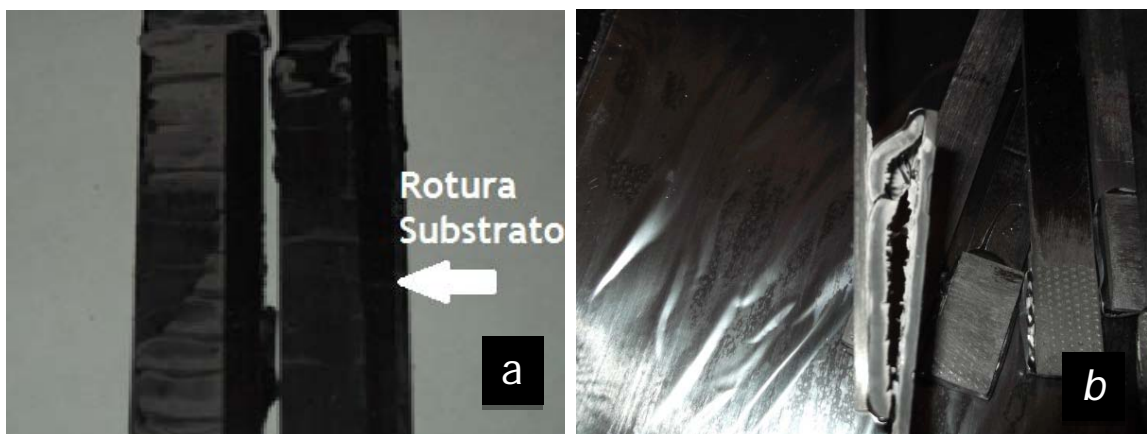


Figura 5.6 - (a) Rotura da JSS de $t_a=3$ mm e (b) rotura coesiva na JSS de $t_a=1$ mm

A Figura 5.5 mostra que os valores obtidos nos ensaios de tração para as JSS com $l_o=60$ mm são todos superiores aos obtidos para as JSS de $l_o=20$ mm. Esta diferença deve-se à maior área de junta adesiva que permite suportar mais carga. Esta conclusão está de acordo com o trabalho do Neto et al. (2012), onde o autor demonstra a capacidade de carga das JSS para diferentes l_o . O valor referido do trabalho de Neto et al. (2012) para $l_o=60$ mm e $t_a=0,2$ mm é de 23 kN, um pouco superior aos 19,9 kN do presente trabalho. Como as cargas são maiores para $l_o=60$ mm, existem mais juntas que sofreram roturas nas fibras dos CFRP em vez do adesivo, mas a tendência dos ensaios foi de ocorrer rotura coesiva como se verifica na tabela no Anexo B. A Figura 5.6 b) mostra uma rotura na camada superficial do provete em compósito que ocorre em algumas juntas.

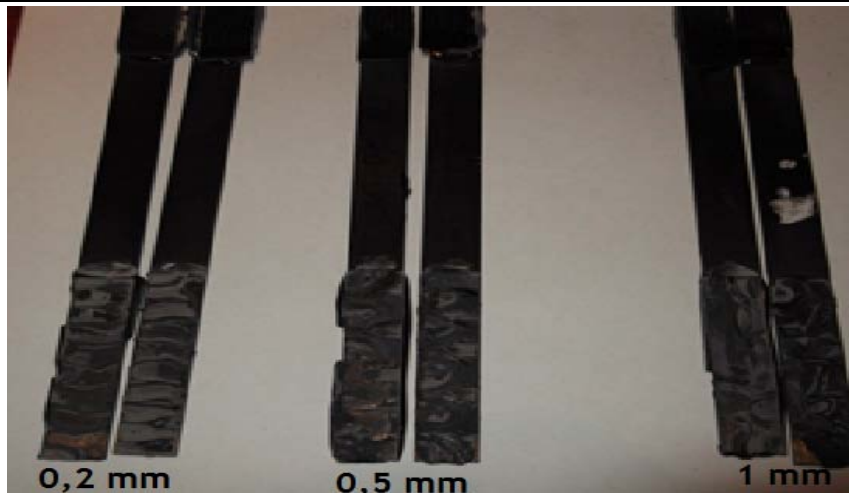


Figura 5.7 - Rotura coesiva nas JSS para vários ta em $lo=60$

A Figura 5.7 mostra JSS com roturas coesivas para diferentes espessuras de adesivo. Com a obtenção de roturas coesivas é possível analisar a influência da espessura de adesivo na sua resistência.

Tal como nas juntas com $lo=20$ mm, para $ta=3$ mm observa-se o fenómeno de separação incompleta (Figura 5.6 a). Os resultados obtidos para as JSS com cada valor de ta estão bastante próximos. Ao analisar o desvio padrão pode-se comprovar esse facto, já que os valores calculados do desvio padrão são relativamente baixos. Verificando os valores obtidos para carga máxima média que cada espessura de adesivo consegue suportar observa-se o mesmo padrão que se encontrou para sobreposição mais pequena, na medida em que as JSS com valores de ta reduzidos suportam uma carga superior, que diminui gradualmente com o aumento de ta .

A Figura 5.8 faz uma comparação entre o valor da carga máxima média para $ta=0,2$ mm (19,99 kN) com os valores obtidos para os outros ta para $lo=60$. Verifica-se que apenas pela alteração da espessura do adesivo, se observa uma redução da capacidade da junta de suportar carga de mais de 50% para $ta=3$ mm. Esta redução é um pouco superior à encontrada para a mesma espessura de adesivo em $lo=20$ mm. A influência da espessura de adesivo na capacidade de carga das juntas é também mais acentuada no caso de sobreposição maior ($lo=60$ mm) do que para $lo=20$ mm. Este fenómeno pode-se dever á maior quantidade de adesivo $lo=60$ mm e $ta=3$ mm com microfissuras ou porosidades superiores às encontradas nas juntas $lo=20$ mm. Já em relação aos fatores que levam a esta perda de carga máxima são os mesmos que para a sobreposição mais pequena (conforme referido na secção 5.1.1).

Efeito da espessura do adesivo na resistência de juntas de sobreposição simples, na ligação materiais compósitos

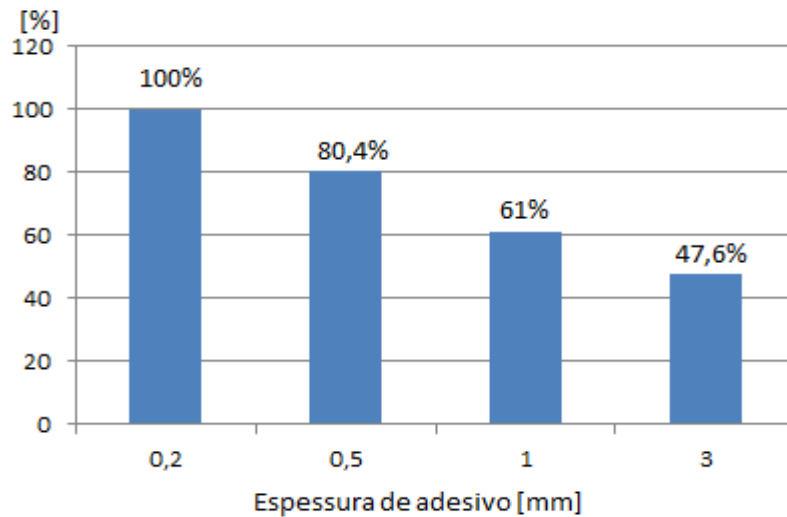


Figura 5.8 - Comparação da capacidade de carga das JSS para $l_0=60$ mm nos ensaios de tração.

5.2 - Ensaio de tração das JSS com o adesivo XNR6852

O objetivo de estudo para o adesivo XNR6852 não é a variação da espessura do adesivo, mas sim os diferentes comprimentos de sobreposição. As curvas $P-\delta$ dos ensaios de tração estão apresentadas no Anexo F.

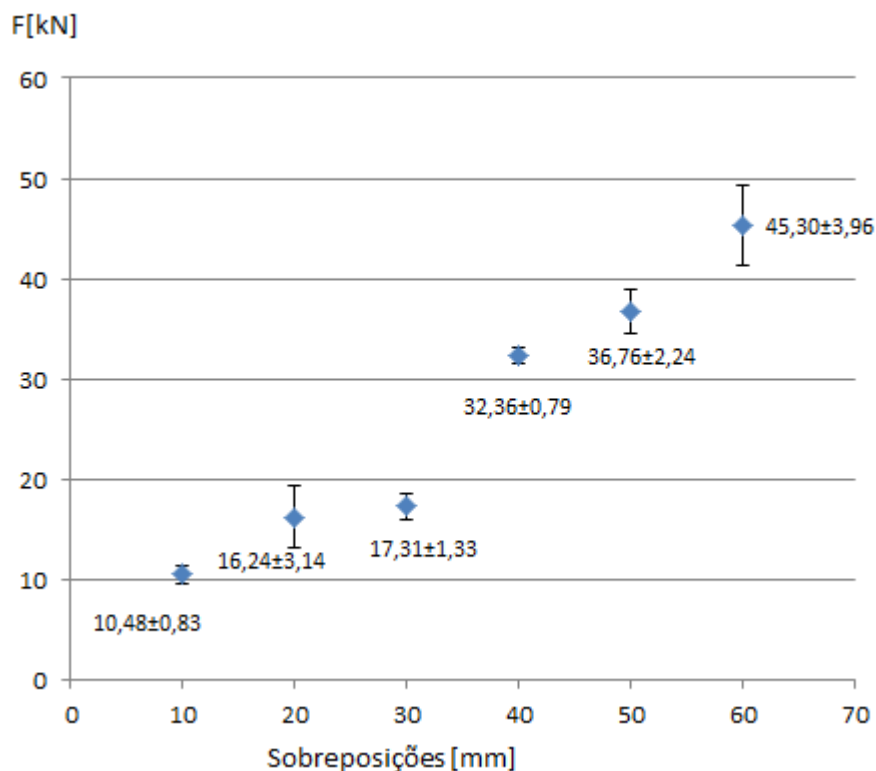


Figura 5.9 - Força de rotura das JSS com adesivo XNR6852 em função de l_0 com $t_a=0,2$ mm.

Os resultados obtidos para a carga máxima das JSS com estes provetes são mais irregulares entre provetes da mesma condição, comparativamente àqueles obtidos com as juntas coladas com o adesivo SikaForce® 7888 (Figura 5.9). Isto pode-se dever aos seguintes fatores: processo de cura do adesivo, controlo da espessura e remoção do excesso de adesivo. O CFRP durante a cura do adesivo fica exposto a uma temperatura de 150°C, que é superior à utilizada na cura das placas de CFRP (130°C), podendo afetar negativamente as propriedades mecânicas do compósito. Outro fator a ter em conta é o processo de remoção de resto de adesivo que pode ter danificado algumas JSS, levando a rotura no compósito. O controlo da espessura do adesivo é de difícil execução porque as juntas durante a cura estão sobre constante pressão em molde fechado.



Figura 5.10 - Rotura no compósito da JSS de $l_0=30$ mm.

Relativamente aos resultados obtidos, verifica-se um aumento aproximadamente linear da carga máxima suportada pela junta com o aumento de l_0 , isto é, a junta com $l_0=60$ mm é a que suporta a carga mais elevada. O aumento linear é justificado principalmente pela elevada ductilidade do adesivo XNR6852 (Tabela 3.2), o que faz com que a rotura das juntas ocorra em condições próximas da cedência generalizada e, como tal, a sua resistência é ditada quase exclusivamente pela área de corte da junta. O padrão obtido está em linha com os resultados encontrados noutros artigos científicos (Neto et al. 2012), o que corrobora os dados da Figura 5.9.

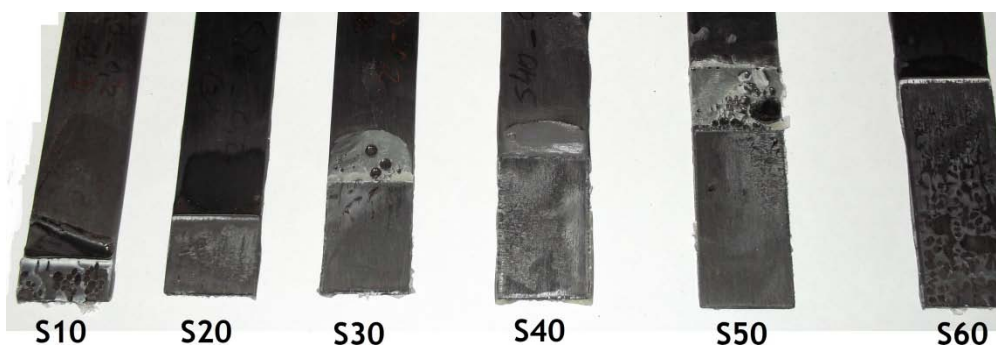


Figura 5.11 - Superfícies de fratura coesivas no adesivo para diferentes valores de l_0 .

Algumas juntas apresentam rotura no compósito, como mostra a Figura 5.10. No entanto, genericamente as roturas foram coesivas no adesivo, conforme se observa na Figura 5.11. A Figura 5.12 é uma comparação em percentagem entre a carga máxima que uma junta suporta em relação ao maior valor obtido em $l_o=60$ mm. A junta com sobreposição mais pequena 10 mm só suporta 18% da carga suportada pela junta com sobreposição $l_o=60$ mm, só pela alteração do l_o . Conforme já foi referido, isto deve-se à menor área colada, o que consequentemente leva a uma carga suportada inferior.

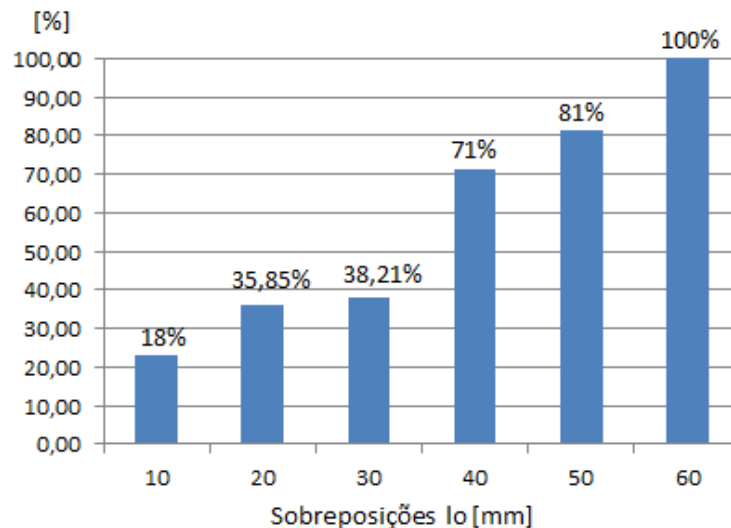


Figura 5.12 - Comparação da capacidade de carga das JSS para os diferentes valores de l_o .

5.3 - Resultados da simulação numérica em ABAQUS®

5.3.1 - Simulação das JSS com o adesivo SikaForce® 7888

As simulações em ABAQUS® foram divididas em duas secções. Para cada dimensão de sobreposição ($l_o=20$ e 60 mm) são feitas simulações para as espessuras $t_a=0,2, 0,5, 1, 3$ mm.

5.3.1.1 - JSS com 20 mm de sobreposição

De forma a poder verificar-se se os valores obtidos nas simulações numéricas representam o real comportamento das JSS, adicionou-se os valores de carga máxima média dos ensaios de tração. A Figura 5.13 mostra um comparativo dos resultados entre a simulação numérica em ABAQUS® do adesivo SikaForce® 7888 e os valores dos ensaios de tração para as diferentes valores de t_a . A simulação no caso da espessura $t_a=0,2$ mm e $l_o=20$ está com valores semelhantes com os que se encontram no artigo do Neto et al. (2012), isto é, $\approx 5,5$ kN. As simulações produzem valores para carga máxima inferiores para os vários t_a , comparando com os valores obtidos dos ensaios de tração. A diferença máxima entre os dois métodos é de cerca 45% para $t_a=3$ mm, mas a tendência obtida representa uma boa aproximação dos resultados experimentais.

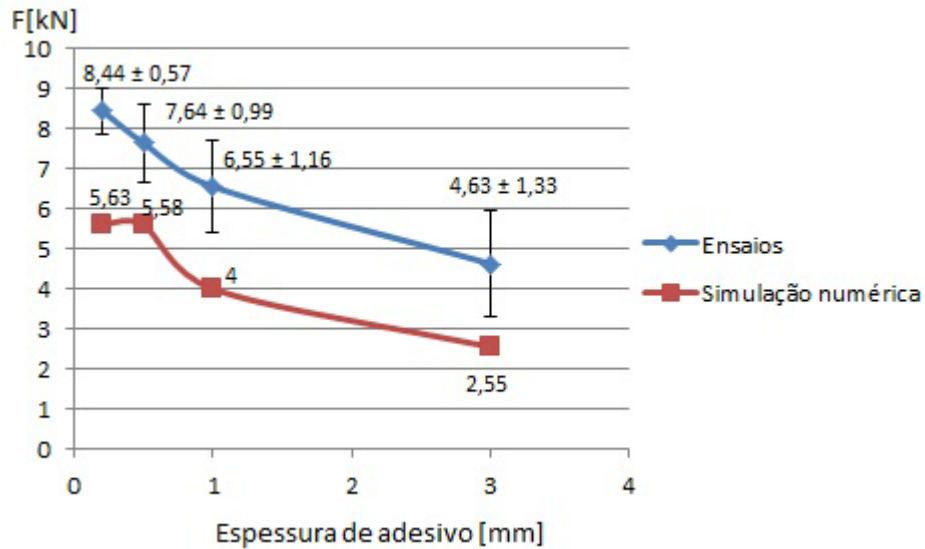


Figura 5.13 - Força de ruptura em função de ta para $l=20$ mm obtida por simulação ABAQUS®

Para espessuras mais pequenas (como $ta=0,2$ mm ou $ta=0,5$ mm) as simulações apresentam uma rotura coesiva, como mostram as Figuras 5.14 e 5.15 (detalhe numa das extremidades da sobreposição). Com o aumento de ta , a simulação não apresenta resultados corretos, já que prevê uma rotura interlaminar do compósito. Esta diferença deve-se à utilização das propriedades do adesivo determinadas para $ta=0,2$ mm para todas as simulações, sabendo-se de antemão que as propriedades coesivas de camada finas variam bastante com o valor de ta (Carlberger e Stigh 2010). Outra possibilidade é a modelação continua das leis coesivas não ser muito apropriada para ta elevados. Uma simulação com elementos locais das leis coesivas poderia obter uma simulação mais aproximada do real comportamento da junta adesiva. Mesmo com estas limitações, consegue-se capturar a tendência de evolução da força máxima com a variação de ta . De facto, com o aumento de ta , os valores apresentados para carga máxima são cada vez menores.

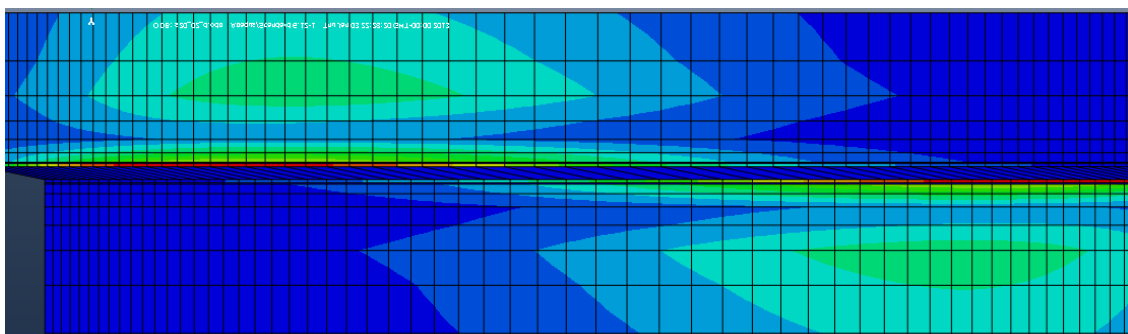


Figura 5.14- Rotura coesiva do adesivo para uma junta com $l=20$ e $ta=0,2$ mm.

Efeito da espessura do adesivo na resistência de juntas de sobreposição simples, na ligação materiais compósitos

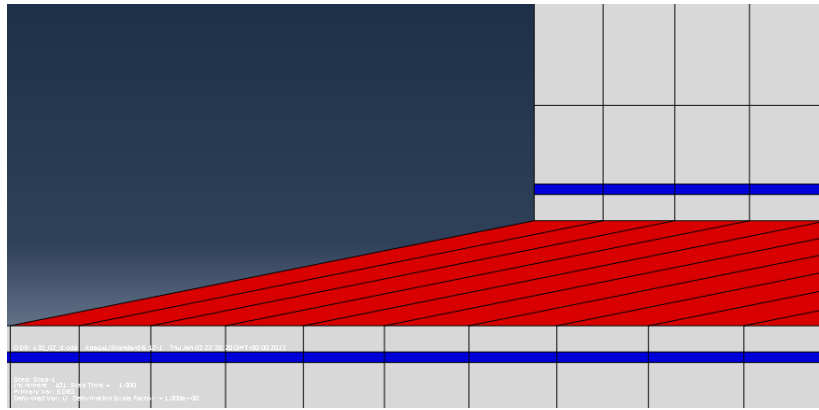


Figura 5.15 - Detalhe da rotura coesiva da junta com $l=20$ e $t_a=0,2$ mm numa das extremidades de sobreposição.

A Figura 5.16 faz um comparativo da carga máxima para diferentes t_a . A JSS com $t_a=3$ mm apenas consegue suportar 45% da carga máxima da JSS com $t_a=0,2$ mm.

Outra consideração a ser feita é a pequena variação do valor de rotura nas simulações entre $t_a=0,2$ mm e $t_a=0,5$ mm (5,6 para 5,5 kN), quando os ensaios apresentam uma variação muito maior. Esta semelhança numérica está relacionada com a utilização de propriedades iguais para os dois valores de t_a , quando na realidade esta gama de espessuras é aquela onde há maior diferença de propriedades coesivas (Carlberger and Stigh 2010). Todos os valores obtidos para carga máxima nas simulações numéricas são inferiores aos valores dos ensaios (até cerca de 45 % para $t_a=3$ mm).

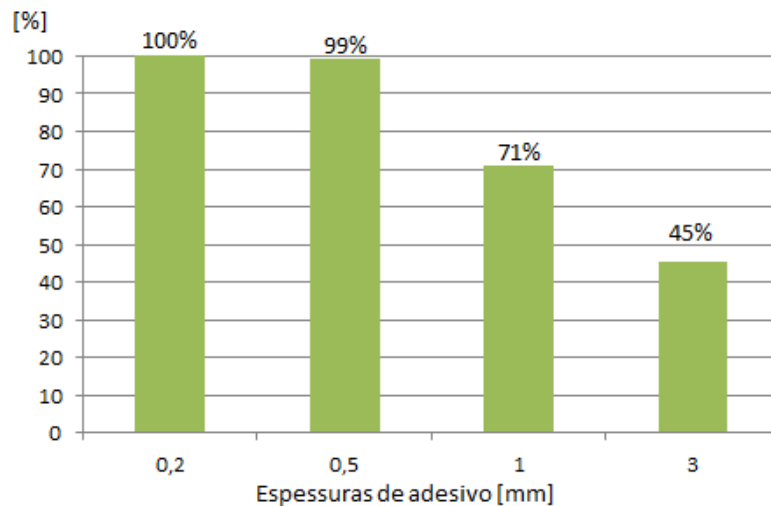


Figura 5.16 - Comparação da capacidade de carga das JSS para os diferentes valores de t_a .

5.3.1.2 - JSS com 60 mm de sobreposição

Tal como feito para secção anterior, é feito um comparativo entre os valores obtidos nos ensaios de tração e os conseguidos nas simulações numéricas (Figura 5.17).

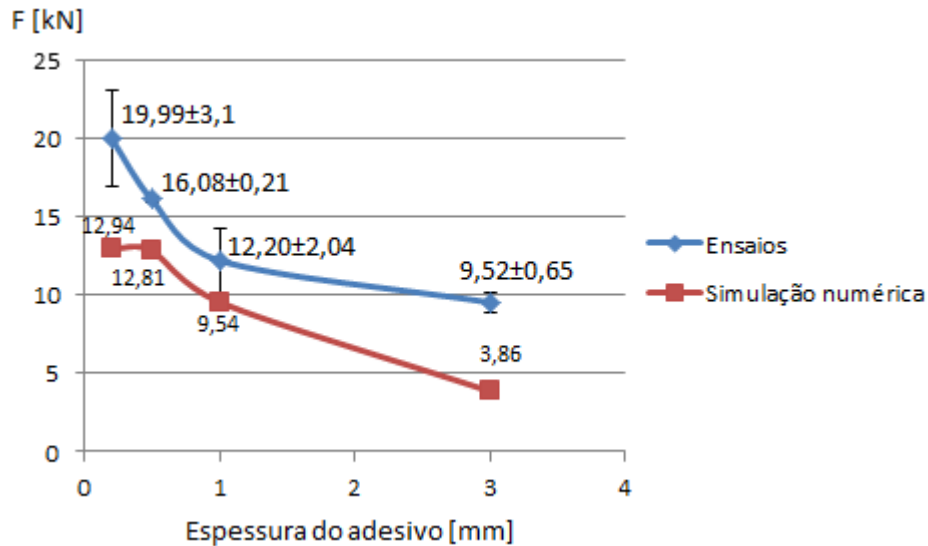


Figura 5.17 - Força de rotura em função de t_a para $l_0=60$ mm obtida por simulação ABAQUS®.

Os resultados obtidos nas simulações são de forma consistentemente inferiores aos conseguidos nos ensaios. No entanto, tal como nas simulações com $l_0=20$ mm, a tendência obtida é uma boa aproximação do comportamento experimental. Por outro lado, os modelos apresentam as limitações já referidas, especialmente para valores de t_a de 0,2 e 0,5 mm, onde mais uma vez se observa claramente que as simulações numéricas não retornam diferenças significativas para estas duas configurações de juntas.

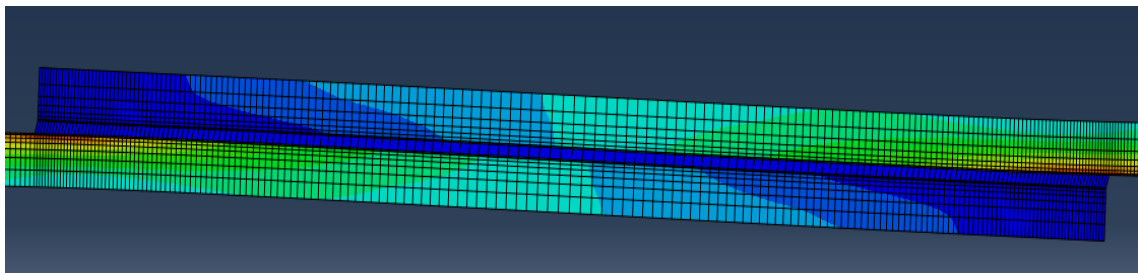


Figura 5.18 - Rotura no adesivo para a JSS com $l_0=60$ mm e $t_a=0,5$ mm.

Numericamente, para valores de t_a de 0,2 e 0,5 mm a rotura foi coesiva (Figura 5.18). Para os restantes valores de t_a , e igualmente às JSS com $l_0=20$ mm, a rotura foi interlaminar no compósito (Figura 5.19). A possível explicação para estes resultados é a mesma que foi apresentada para as simulações com $l_0=20$ mm, ou seja, devido à aproximação efetuada nas propriedades da camada de adesivo. De facto, as propriedades do adesivo em todas as simulações foram as mesmas, o que não acontece na realidade. Por outro lado, a

possibilidade da modelação por elementos coesivos contínuos pode não ser a mais apropriada para t_a elevados.

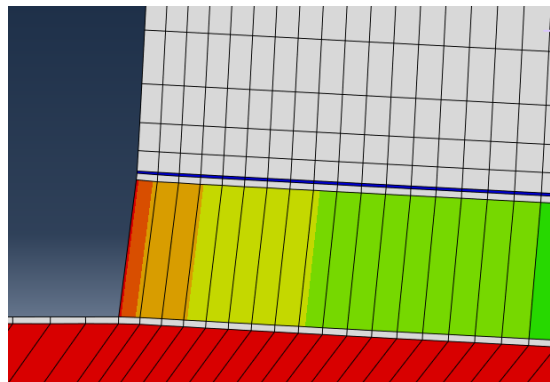


Figura 5.19 - Rotura interlaminar da simulação de JSS com $l_0=60$ mm e $t_a=1$ mm.

Os valores obtidos da força rotura das juntas são menores para grandes espessuras, como os resultados dos ensaios e nas simulações para $l_0=20$ mm. A JSS com $t_a=3$ mm de adesivo suporta apenas 30% da carga de uma junta com $t_a=0,2$ mm (Figura 5.20). Fazendo um comparativo com a simulação numérica de $l_0=20$ e os valores dos ensaios de tração, neste caso apresenta-se uma queda mais acentuada da resistência das juntas com t_a . Uma possível explicação é a existência de maior quantidade de adesivo nas juntas, o que facilita o aparecimento de possíveis microfissuras, poros e imperfeições internas.

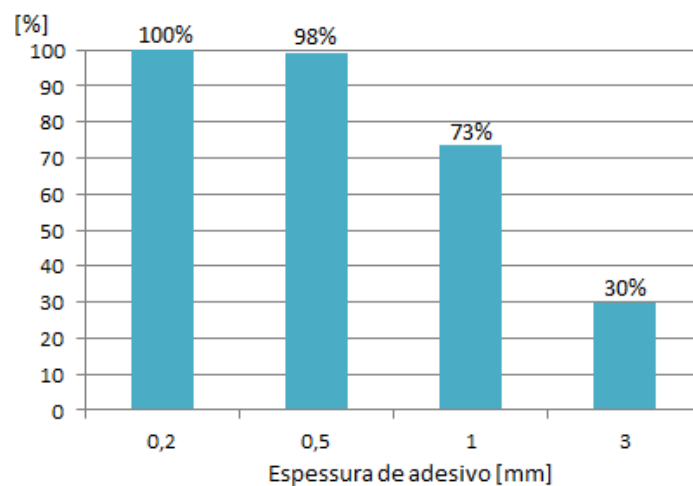


Figura 5.20 - Comparação da capacidade de carga das JSS para simulação numérica com $l_0=60$ mm.

5.3.2 - Simulação das JSS com o adesivo XNR6852

Para este adesivo considerou-se uma espessura de adesivo de $t_a=0,2$ mm para todas as JSS. Esta espessura foi seleccionada por estar na gama de espessuras que permite um melhor desempenho da junta.

Efeito da espessura do adesivo na resistência de juntas de sobreposição simples, na ligação materiais compósitos

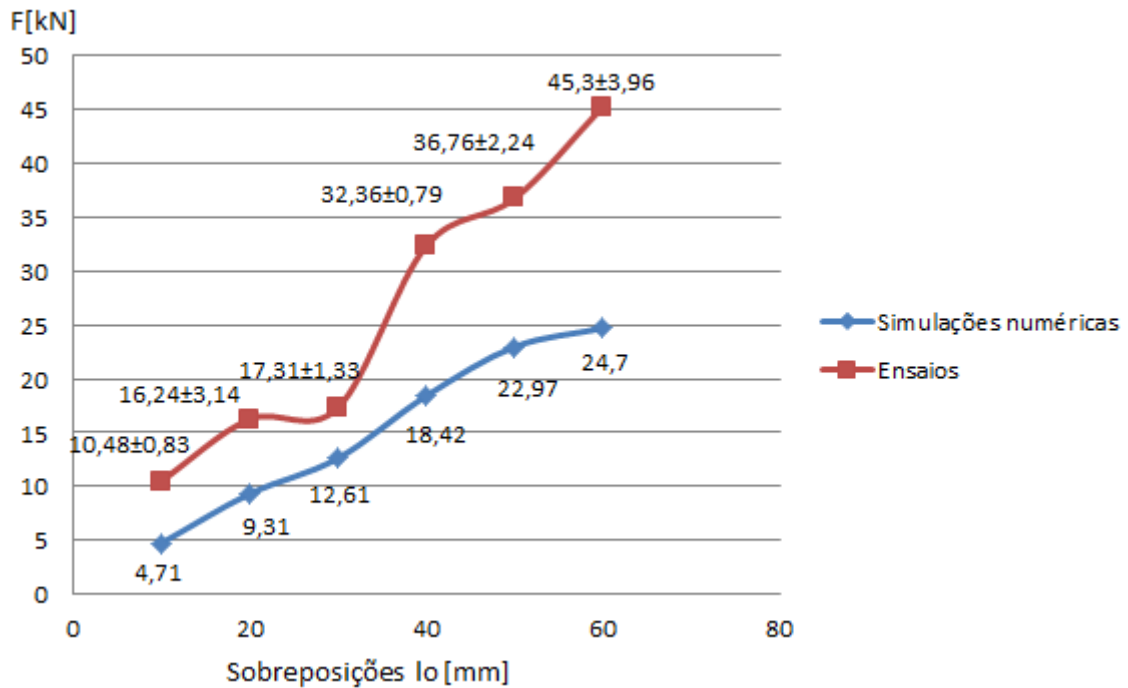


Figura 5.21 - Força de ruptura para valores de t_a de 0,2 mm obtida para simulação ABAQUS®.

Os valores obtidos para a força de ruptura das juntas estão abaixo dos valores conseguidos nos ensaios (Figura 5.21). Mesmo assim, é possível verificar que para sobreposições maiores consegue-se uma força de ruptura superior. Na simulação numérica observa-se que só alterando o valor de l_o consegue-se um ganho de $\approx 42\%$ entre $l_o=10$ e 60 mm. O comparativo entre os ensaios e as simulações em ABAQUS® mostra uma variação máxima de $\approx 50\%$ entre os valores de carga máxima nos ensaio e as simulações.

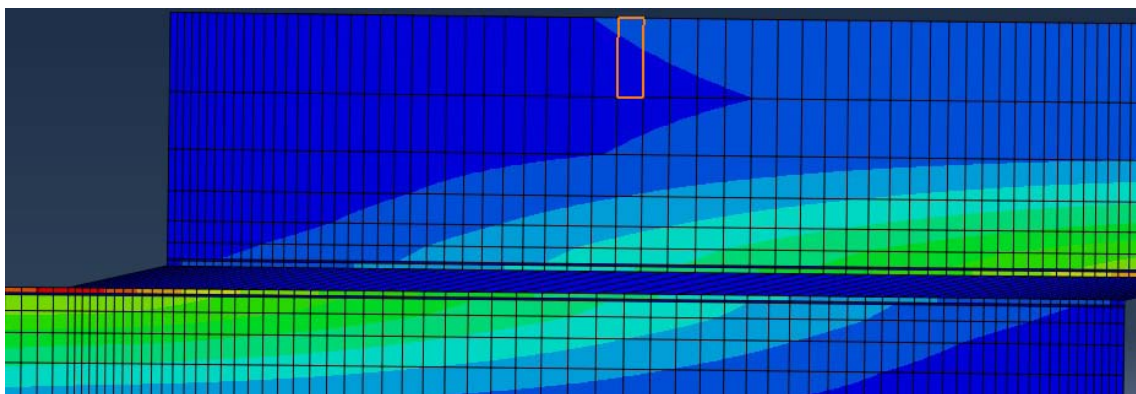


Figura 5.22 - Ruptura coesiva no adesivo para a junta $l_o=40$ mm.

As rupturas nas simulações para $l_o=10, 20, 30, 40, 50$ e 60 mm foram coesivas no adesivo, como mostra a Figura 5.22 para caso de $l_o=40$ mm. As JSS ensaiadas apresentam em alguns casos ruptura no compósito como os provetes para $l_o=30$ mm.

5.4 - Resultados analíticos

5.4.1 - Cedência generalizada

Este critério foi inicialmente proposto por Crocombe (1989). Assume-se, para adesivos dúcteis, que a cedência completa da camada de adesivo possa ocorrer, atingindo-se assim um estado limite que não possibilita o aumento da carga aplicada, até que as condições locais sejam suficientes para induzir a rotura. O referido autor aplicou o critério a diferentes configurações de juntas caracterizadas pela presença de cargas de corte e obteve bons resultados usando adesivos muito dúcteis. Todavia, a maioria dos adesivos epóxicos estruturais não apresenta uma ductilidade suficiente para que a cedência completa da camada de adesivo ocorra antes da rotura. Assim sendo, o critério só é aplicável para uma gama restrita de adesivos. O autor refere ainda que o critério é inadequado para juntas sujeitas a cargas de clivagem.

Como os adesivos em estudo são dúcteis este método permite obter valores aceitáveis para a força de rotura (P_m).

$$P_m = \tau_f \times b \times l_o \quad (3)$$

5.4.1.1 - Adesivo XNR6852

De forma a fazer uma avaliação global de todos os métodos que permitem determinar a carga máxima para uma junta adesiva, os resultados obtidos foram agrupados numa única figura (Figura 5.23).

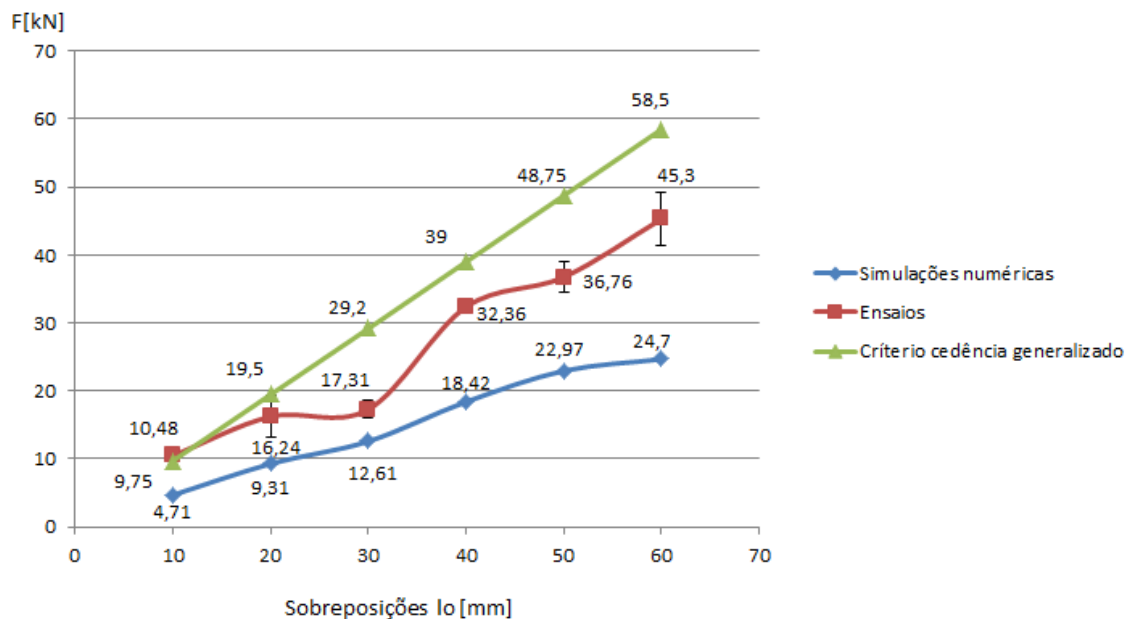


Figura 5.23 - Força de rotura dos vários critérios para o adesivo XNR6852 em função de l_o.

Os valores obtidos pelo critério de cedência generalizada para o caso do adesivo XNR6852 (Figura 5.23) estão muito próximos dos valores dos ensaios das JSS para pequenas sobreposições. Para $l_o=10$ mm, o critério apresenta um valor de 9,75 kN comparado com o valor dos ensaios de 10,48 kN. Já quando a sobreposição do adesivo é de $l_o=40$ mm, o valor de rotura obtido com o critério de cedência generalizada é de 39 kN, comparado com o obtido do ensaio de 32,32 kN. Um dos fatores que pode estar na origem desta diferença é a consideração apenas das tensões de corte no adesivo, embora as tensões de arrancamento também tenham um papel preponderante no processo de rotura. A simulação em ABAQUS® apresenta valores para força de rotura mais baixos que os ensaios de tração, tal como nas simulações com o adesivo SikaForce® 7888.

A variação entre os ensaios e o critério de cedência generalizado varia entre 7% (para $l_o=10$ mm) e 41% (para $l_o=30$ mm). Mostra-se assim que este método analítico é uma boa aproximação (embora por excesso) da força de rotura das JSS que se obteve nos ensaios de tração.

5.4.1.2 - Adesivo SikaForce® 7888

O critério de cedência generalizada é uma boa aproximação para determinar as forças de rotura para as juntas como do adesivo SikaForce® 7888. O critério não inclui a variação da espessura do adesivo, e sendo assim os resultados obtidos são os seguintes:

<i>l_o=20</i>		<i>l_o=60</i>	
Unidades	Resultados	Unidades	Resultados
<i>b</i> [mm]	15	<i>b</i> [mm]	15
<i>l_o</i> [mm]	20	<i>l_o</i> [mm]	60
τ_f [MPa]	20	τ_f [MPa]	20
<i>P_m</i> [kN]	6	<i>P_m</i> [kN]	18

Tabela 5-1 - Resultados do método de cedência generalizados para as JSS com SikaForce® 7888.

Em comparação com os resultados dos ensaios experimentais, o valor de 6 kN é semelhante a uma espessura de adesivo de 1 mm. No caso de $l_o=60$ mm, o valor 18 kN está entre a espessura do adesivo $t_a=0,2$ e 0,5 mm (19,99 kN - 16,08 kN).

Podemos concluir que no caso do adesivo SikaForce® 7888, o método de cedência generalizada é uma excelente aproximação ao melhor desempenho que cada JSS pode produzir para uma determinada sobreposição.

Capítulo 6

Conclusões e trabalhos futuros

O trabalho realizado consistiu no estudo de JSS utilizando dois adesivos, o SikaForce® 7888 e o XNR6852, com substratos em CFRP. Estudou-se JSS com diferentes espessuras de adesivo ($ta=0,2, 0,5, 1$ e 3 mm) e comprimentos de sobreposição ($lo=20$ e 60 mm) para o adesivo SikaForce® 7888, e apenas com diferentes comprimentos de sobreposição para o adesivo XNR6852 ($lo=10, 20, 30, 40, 50$ e 60 mm), utilizando-se um valor de ta de $0,2$ mm. Todas as JSS foram ensaiadas à tração e registadas as curvas $P-\delta$. De forma a testar diferentes técnicas de previsão, considerou-se uma análise numérica por EF e MDC, bem como uma análise teórica pelo critério da cedência generalizada.

Os resultados obtidos nos ensaios das JSS com diferentes espessuras usando o adesivo SikaForce® 7888 mostram que grandes espessuras de adesivo ($ta=3$ mm) suportam apenas cerca de 50% da força de rotura que a mesma JSS com espessura de adesivo menor ($ta=0,2$ mm). Esta conclusão está em linha com investigações já publicadas sobre o efeito da variação de ta . Da comparação entre o método de simulação e o método analítico de determinar a força de rotura das JSS, conclui-se que o critério de cedência generalizado é uma aproximação mais correta que as simulações em ABAQUS®, especialmente para valores maiores de lo . No entanto, o critério de cedência generalizado não entra em consideração com a espessura do adesivo, fazendo uma previsão correta apenas para pequenas espessuras de adesivo. As simulações em ABAQUS® mostram um padrão de diminuição da força de rotura para espessuras de adesivo maiores, de forma semelhante aos ensaios realizados. Apesar disto, os valores apresentam variações até cerca de 45% referente à força de rotura (para o caso de $lo=20$ mm). Isto pode ser explicado pela forma da lei coesiva não ser a mais adequada (os adesivos são extremamente dúcteis isto não é refletido na lei triangular). Com o aumento de lo de 20 para 60 mm, observou-se um aumento de capacidade de carga das juntas, e uma tendência relativamente aos valores de ta .

Relativamente ao estudo das JSS com vários valores de lo com o adesivo XNR6852, os resultados mostram um aumento da força de rotura com o comprimento da sobreposição. Tal padrão é também evidenciado nas simulações em ABAQUS® e pelo método de cedência

generalizado. Os valores obtidos pelas simulações são inferiores aos conseguidos pelos ensaios. O critério de cedência generalizada até à sobreposição de $l_0=40$ mm produz valores superiores por uma pequena margem de 10% aos obtidos nos ensaios, no entanto a precisão do método para valores de l_0 superiores desvia-se gradualmente dos resultados dos ensaios, até uma diferença de 24%. Sendo assim, mesmo com algumas discrepâncias, o critério da cedência generaliza é uma boa aproximação dos resultados obtidos em ensaios.

De uma maneira geral, a espessura do adesivo tem uma importante influência na força máxima que a JSS pode suportar. Uma pequena variação de $\approx 0,3$ mm na espessura do adesivo pode reduzir a capacidade da junta suportar carga em cerca de 15% (para $l_0=20$ mm). Este resultado mostra que é essencial projetar bons métodos de controlo dimensional e de produção para as juntas, porque pequenas variações do posicionamento da máquina ou da espessura do substrato pode aumentar ou diminuir a espessura do adesivo, afetando o seu desempenho. A mesma conclusão é obtida para a variação do comprimento da sobreposição.

Refere-se que a utilização de substratos em CFRP apresentou um desafio extra no estudo das juntas adesivas. As JSS em compósitos apresentam limitações na capacidade de absorver forças de arrancamento, existindo a possibilidade de aparecer rotura interlaminar e nas fibras do compósito, como ocorreu em alguns ensaios. Ao analisar JSS com roturas coesivas obteve-se resultados com o comportamento esperado para, a influência da espessura do adesivo e do comprimento de sobreposição. Através da análise e comparação de outros trabalhos científicos que usaram substratos diferentes, obtivermos os mesmos padrões nos resultados.

Concluído este trabalho, foi possível compreender e avaliar com precisão o comportamento das juntas adesivas em materiais compósitos, tornado mais seguro e aplicável este tipo de juntas na indústria.

Como sugestões de trabalhos a realizar no futuro, de forma a aprofundar e melhorar o trabalho, apresentam-se os seguintes:

- Escolher um adesivo frágil para produzir JSS com espessuras elevadas, de forma a obter a comparar os resultados.
- Produzir provetes de DCB e ENF em compósito de espessuras diferentes de adesivo SikaForce® 7888 de forma a aferir as propriedades do adesivo a diferentes espessuras.
- Realizar as simulações numéricas com as propriedades do adesivo mais adequadas para cada espessura de adesivo.

Referências

- (Abaqus 2009) Abaqus Documentation (2009 Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay)
- (Adams e Peppiatt 1974) Adams R.D., Peppiatt N., "J Strain Anal, 9, 185, 1974.
- (Amaro et al. 2008) Amaro A.M., Reis P.N.B., Moura M.F.S.F. "Delamination Effect on Bending Behaviour in Carbon-Epoxy Composites"; Blackwell Publishing Ltd 2008.
- (Ashby 2006) <http://www.ctb.com.pt/?page_id=442>, "Materials Selection in Mechanical Design, Prof. Michael Ashby, Lectures 2006, pág. 2" visto 18/01/13.
- (Aydin 2005) Aydin M.D., Ozel A., Temiz S." The effect of adherend thickness on the failure of adhesively-bonded single-lap joints", *J. Adhesion Sci. Technol.*, Vol. 19, No. 8, pp. 705-718 (2005).
- (Banea et al. 2009) Banea M.D., da Silva L.F.M., "Adhesively bonded joints in composite materials: an overview" Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications 223: 1, 2009.
- (Barenblatt 1959) Barenblatt G.I., "The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypothesis. Axisymmetrical cracks." *J. Appl. Math. Mech.* 23, 622-636, 1959.
- (Barenblatt 1962) Barenblatt G.I., "The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture". *Adv. Appl. Mech.* 7, 55-129, 1962.
- (Campilho et al. 2005) Campilho R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, J.J.M.S. Domingues, "Modelling single and double-lap repairs on composite materials". *Compos. Sci. Technol.* 65, 1948-1958, 2005.
- (Campilho et al. 2008) Campilho R.D.S.G., Moura de M.F.S.F., Pinto A.M.G., Morais J.J.L, Domingues J.J.M.S "Modelling the tensile fracture behavior of CFRP scarf repairs", *journal of materials processing technology*.

- **(Campilho et al. 2009)** Campilho R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, J.J.M.S. Domingues, "Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes." *Int. J. Adhes. Adhes.* 29, 195-205, 2009.
- **(Campilho et al. 2012)** Campilho R.D.S.G., Banea M.D., Neto J.A.B.P., da Silva L.F.M. "Modelling of single-lap joints using cohesive zone models: effect of the cohesive parameters on the output of the simulations". *J. Adhesion* 88 513-533, 2012.
- **(Cardarelli 2008)** Cardarelli F. "Materials Handbook" (2ª Edição); Springer, 2008.
- **(Carlberger e Stigh 2010)** Carlberger T., Stigh U., "Influence of layer thickness on cohesive properties of an epoxy-based adhesive—an experimental study". *J. Adhesion* 86, 814-833, 2010.
- **(Chung 2010)** Chung D.D.L. "Composite Materials" (2ª Edição); Springer, 2010.
- **(Crocombe 1989)** Crocombe A.D., *Int j adhes Adhes*, 9, 145 1989.
- **(da Silva et al. 2006)** da Silva L.F.M., Rodrigues T.N.S.S, Figueiredo M.A.V., de Moura M.F.S.F. e Chousal J.A.G., "J. Adhesion 82 1091, 2006.
- **(da Silva et al. 2006)** da Silva L.F.M, Adams R.D., "Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2006
- **(da Silva et al. 2007)** da Silva, L.F.M.. e Magalhães, A. e Moura, M. "Juntas Adesivas Estruturais" (1ª Edição); Publindústria, 2007.
- **(da Silva et al. 2012)** da Silva L.F.M. e Campilho R.D.S.G.. "Advances in Numerical Modelling of Adhesive Joints" Springer Briefs in Computational Mechanics, 2012.
- **(Dugdale 1960)** Dugdale D.S., "Yielding of steel sheets containing" slits. *J. Mech. Phys. Solids* 8, 100-104, 1960.
- **(Gere et al. 2004)** Gere J. e Goodno B. "Mechanics of Materials" (7ª Edição); CENGAGE Learning, 2004.
- **(Gleich et al. 2001)** Gleich D.M., Van Tooren M.J.L. e Beukers A., "J.adhesion Sci Technol", 15 1091, 2001.
- **(Goland e Reissner 1944)** Goland M. e Reissner E., "J Appl Mech", 66 A17, 1944.
- **(Habenicht 2009)** Habenicht, G. "Applied Adhesive Bonding" (1ª Edição); WILEY-VCH, 2009.
- **(Hu 2006)** Hu, N. "Composites and their properties" (1ª Edição); InTech, 2006.

- **(Ji et al. 2010)** Ji G., Ouyang z., Li G., Ibekwe S. , Pang S.S., "Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints." *Int. J. Solids Struct.* 47, 2445-2458, 2010.
- **(Kafkalidis et al. 2002)** Kafkalidis M.S., Thouless M.D., "The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints". *Int. J. Solids Struct.* 39, 4367-4383, 2002.
- **(Kahraman et al. 2008)** Kahraman R., Sunar M., Yilbas B. "Influence of adhesive thickness and filler content on themechanical performance of aluminum single-lap joints bonded with aluminum powder filled epoxy adhesive" ,*journal of materials processing technology* 205 183-189, 2008.
- **(Karač 2008)** Karač A.." Testing adhesives and adhesively bonded joints", Universidade de Zagreb, 2008.
- **(Liljedahl 2006)** Liljedahi C.D.M., Crocombe A.D., Wahab M.A., Ashcroft I.A., "Damage modelling of adhesively bonded joints. *Int. J. Fract.* 141, 147-161, 2006.
- **(Logan 2010)** Logan Daryl L.." A first course in the Finite Element Method"(1º Edição); Cengage Learning, 2010.
- **(Mahdi et al. 2003)** Mahdi S, Kinloch AJ, Matthews, Crisfield MA. "The static mechanical performance of repaired composite sandwich beams: part I"; experimental characterization. *Journal of Sandwich Structures and Materials* 5:179-202, 2003.
- **(Nassar et al. 2012)** Nassar S.A., Mao J., Yang X. "A damage model for adhesively bonded single-lap thick composite joints"; *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2012.
- **(Naito et al. 2012)** Naito K., Onta M., Kogo Y."The effect of adhesive thickness on tensile and shear strength of polyimide adhesive", *International Journal of Adhesion & Adhesives* 36 77-85, 2012.
- **(Neto et al. 2012)** Neto J.A.B.P; Campilho R.D.S.G.; da Silva L.F.M.."Parametric study of adhesive joints with composites"; *International Journal of adhesion & adhesives*; 37 96-101, 2012.
- **(Oliveira 2011)** Oliveira, L. "Dissertação e Tese em Ciência e Tecnologia" (1º Edição); LIDEL, 2011.
- **(Pardoën et al. 2005)** Pardoën T., Ferracin T., Landis C.M., Delannay F., "Constraint effects in adhesive joint fracture". *J. Mech. Phys. Solids* 53, 1951-1983, 2005.
- **(Pizzi et al. 2003)** Pizzi, A. e Mittal, K.L. ."Handbook of Adhesive Technology" (2º Edição); Marcel Dekker Inc, 2003.
- **(Rao 2004)** Rao Singiresu S.." The Finite Element Method in Engineering" (4º Edição); Elsevier Science & Technology Books, 2004.

Efeito da espessura do adesivo na resistência de juntas de sobreposição simples, na ligação materiais compósitos

- (Saldanha 2012) Saldanha D.F.S, da Silva L.F.M., Carbas R.J.C., Chaves F.J.P., Nomura K., Ueda T. "Mechanical characterization of a novel epoxy adhesive"; FEUP, 2012.
- (Sika 2012) <<http://prt.sika.com/>>, Dados técnicos SikaForce-7888 L10 (VP); visto 10/10/12.
- (Staab 1999) Staab, George H.. "Laminar Composites" (1º Edição); Butterworth Heinemann, 1999.
- (Turon et al. 2007) Turon A., Costa J., Camanho P.P., Dávila C.G., "Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue". Compos. Part A 38, 2270-2282, 2007.

Efeito da espessura do adesivo na resistência de juntas de sobreposição simples, na ligação materiais compósitos

Anexo A

Valor dos ensaios de tração para várias JSS com $l_0=20\text{mm}$.

<i>Espessura do adesivo [mm]</i>	<i>Número provete</i>	<i>Carga Máxima [N]</i>	<i>Deslocamento na carga máxima [mm]</i>	<i>Carga Máxima Média [N]</i>	<i>Tipo de rotura</i>
0,2	"Teste"	7.561,49	2,15	8445,81±569,89	coesiva
	3	4.528,58	1,24		substrato
	2	9.017,32	2,29		coesiva
	1	8.827,39	2,36		coesiva
	4	8.557,21	2,50		coesiva
	5	8.265,67	2,10		coesiva
0.5	1	7.387,54	2,42	7640,30 ± 992,84	coesiva
	2	8.434,37	2,39		coesiva
	5	7.036,74	2,07		coesiva
	3	8.871,89	2,71		coesiva
	4	6.470,94	1,85		coesiva
1	1	8.050,43	2,73	6557,80 ± 1160,93	coesiva
	2	7.030,72	2,62		coesiva
	4	5.058,15	2,59		coesiva
	3	5.785,44	2,49		coesiva
	5	6.864,23	2,85		coesiva
3	5	5.825,69	4,48	4633,56 ± 1330,35	coesiva
	4	4.854,32	3,07		coesiva
	3	3.961,67	3,67		coesiva
	1	2.700,47	0,79		substrato
	2	5.825,65	3,32		coesiva

Tabela 1 - Valores dos ensaios JSS SikaForce® 7888 $l_0=20\text{ mm}$.

Efeito da espessura do adesivo na resistência de juntas de sobreposição simples, na ligação materiais compósitos

Anexo B

Valor dos ensaios de tração para várias JSS com $l_0=60\text{mm}$.

<i>Espessura do adesivo [mm]</i>	<i>Nº Provete</i>	<i>Carga Máxima [kN]</i>	<i>Deslocamento na carga máxima [mm]</i>	<i>Carga Máxima Média [kN]</i>	<i>Tipo de Rotura</i>
0,2	2	20,63	7,53	19,99±3,1	coesiva
	1	18,71	5,41		coesiva
	3	18,00	5,04		coesiva
	4	25,13	7,36		coesiva
	5	17,51	5,92		coesiva
0,5	1	15,80	5,35	16,08±0,21	coesiva
	2	16,03	5,22		coesiva
	4	5,02	1,26		substrato
	5	16,28	4,93		coesiva
	3	16,20	6,29		coesiva
1	1	12,58	5,55	12,20±2,04	coesiva
	2	10,12	3,24		substrato
	4	11,25	3,45		coesiva
	3	14,87	3,73		coesiva
3	1	9,59	3,62	9,52±0,65	coesiva
	2	8,93	2,94		substrato
	4	9,16	3,17		coesiva
	5	10,42	3,05		coesiva

Tabela 2 - Valores dos ensaios JSS SikaForce® 7888 $l_0=60\text{ mm}$.

Efeito da espessura do adesivo na resistência de juntas de sobreposição simples, na ligação materiais compósitos

Anexo C

JSS de XNR6852 com vários comprimentos de sobreposição.

<i>Nº Provete</i>	<i>Sobreposição [mm]</i>	<i>Carga Máxima [kN]</i>	<i>Deslocamento na carga máxima [mm]</i>	<i>Carga Máxima Média [kN]</i>	<i>Tipo de Rotura</i>
1	10	9,40	1,52	10,48±0,83	coesiva
2	10	10,60	1,78		coesiva
3	10	11,32	2,18		coesiva
1	20	14,15	2,48	16,24±3,14	coesiva
2	20	13,50	3,65		substrato
3	20	21,47	4,46		coesiva
4	20	15,84	4,1		coesiva
1	30	16,37	3	17,31±1,33	substrato
2	30	4,62	0,7		substrato
3	30	18,25	3,5		substrato
1	40	12,78	1,9	32,36±0,79	coesiva
2	40	9,31	2		substrato
3	40	31,57	6,13		coesiva
4	40	33,15	6,38		coesiva
1	50	32,27	6,55	36,76±2,24	coesiva
2	50	12,22	1,9		substrato
3	50	36,76	6,59		coesiva
1	60	42,24	6,16	45,30±3,96	coesiva
2	60	33,94	4,94		substrato
3	60	50,90	6,99		coesiva
4	60	42,76	5,99		coesiva

Tabela 3 - Valores dos ensaios JSS de XNR6852 com vários l_0 e $t_a=0,2$ mm.

Anexo D

Curvas $P-\delta$.

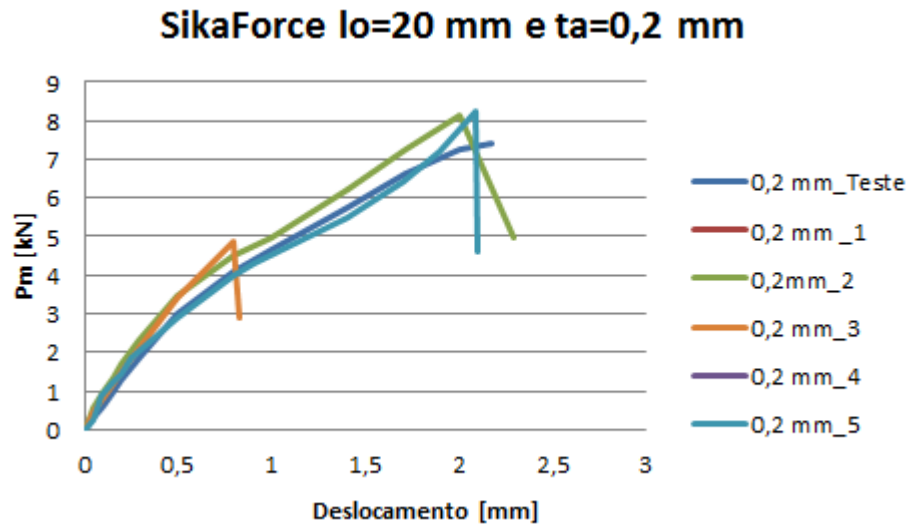


Ilustração 1 - Curvas $P-\delta$ para o $l_0=20$ mm e $t_a=0,2$ mm.

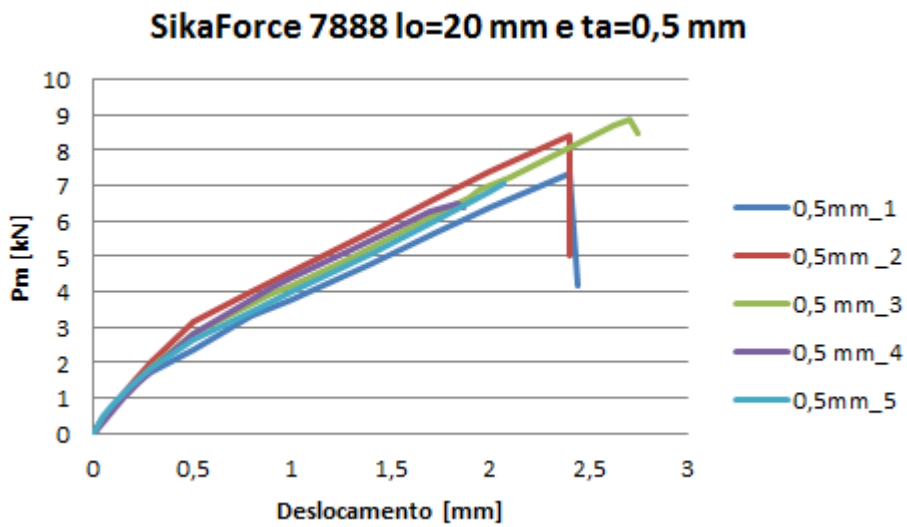
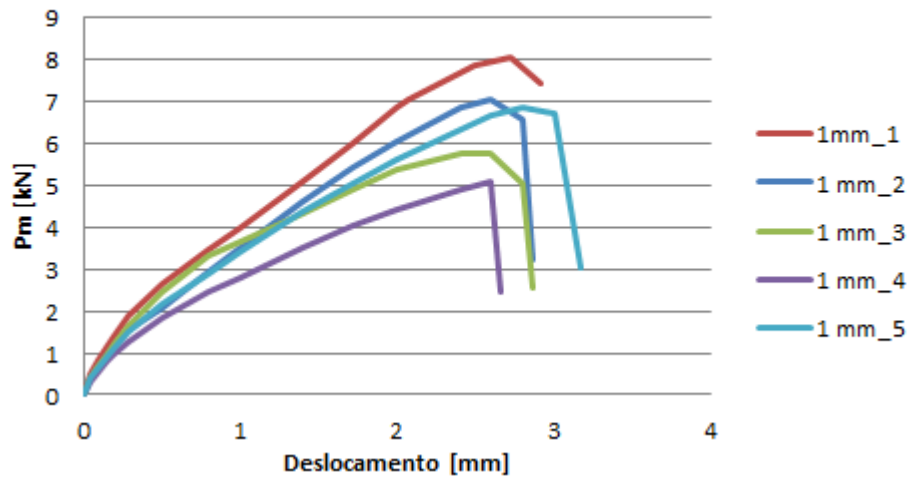
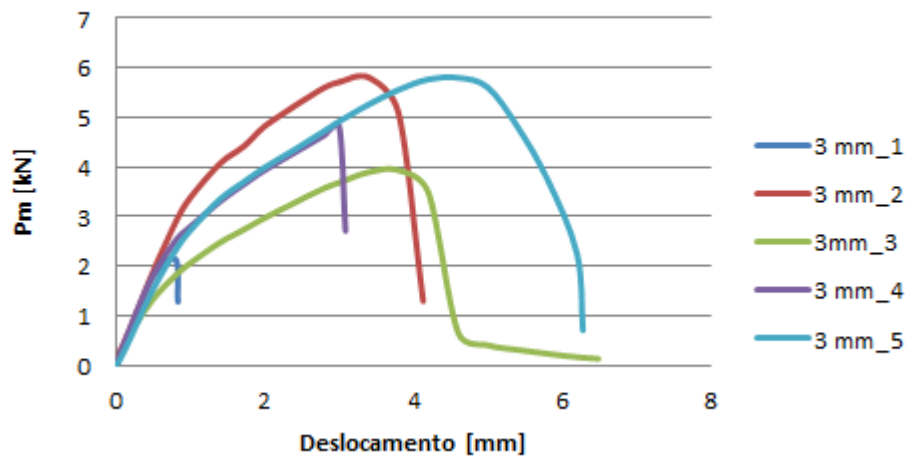


Ilustração 2 - - Curvas $P-\delta$ para o $l_0=20$ mm e $t_a=0,5$ mm.

SikaForce 7888 $l_0=20$ mm e $t_a=1$ mm



SikaForce 7888 $l_0=20$ mm e $t_a=3$ mm



Anexo E

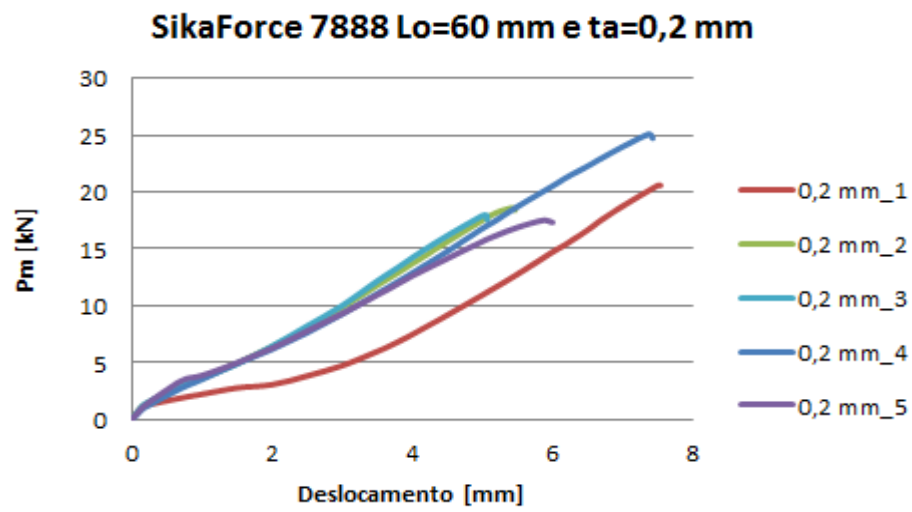


Ilustração 5- Curvas $P-\delta$ para o $l_o=60$ mm e $t_a=0,2$ mm.

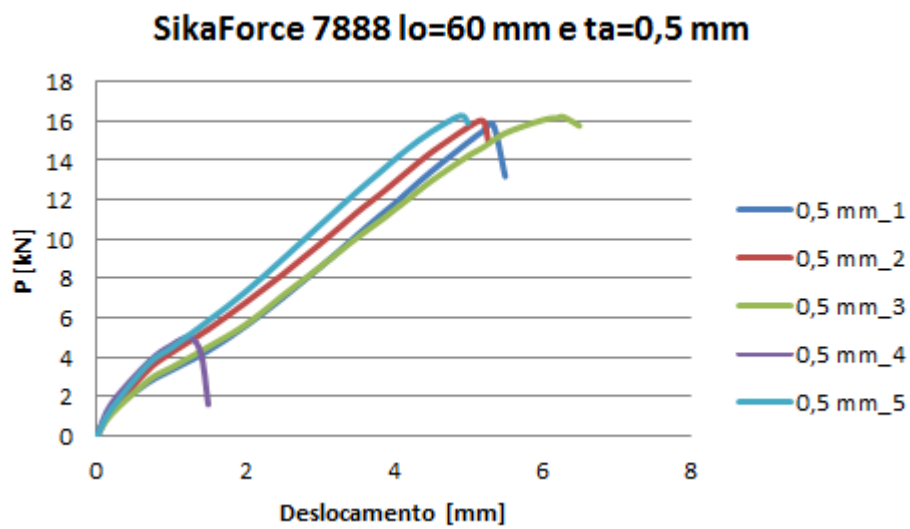


Ilustração 6 - Curvas $P-\delta$ para o $l_o=60$ mm e $t_a=0,5$ mm.

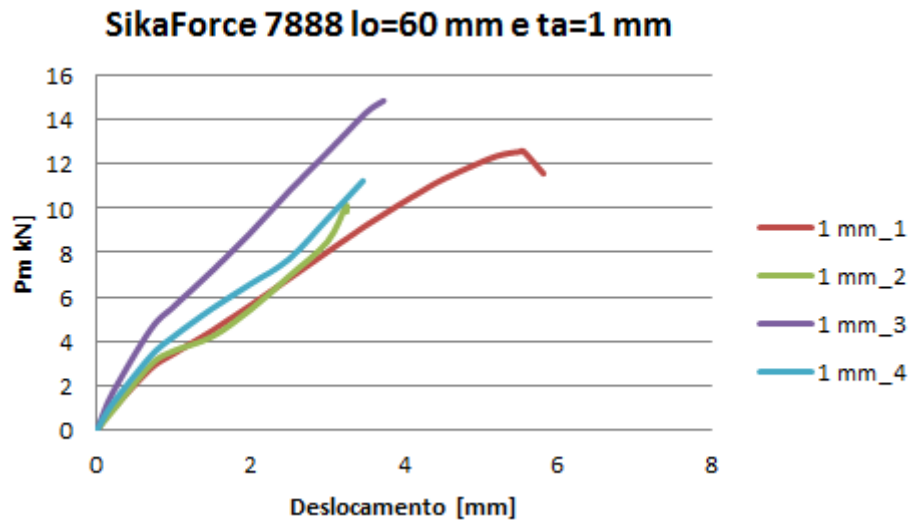


Ilustração 7 - Curvas $P-\delta$ para o $l_0=60$ mm e $t_a=1$ mm.

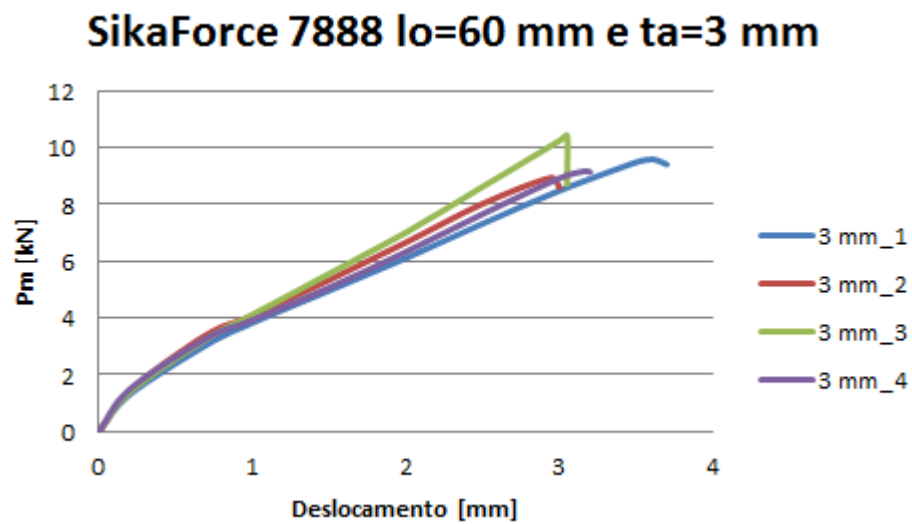


Figura 6.1 - Curvas $P-\delta$ para o $l_0=60$ mm e $t_a=3$ mm.

Anexo F

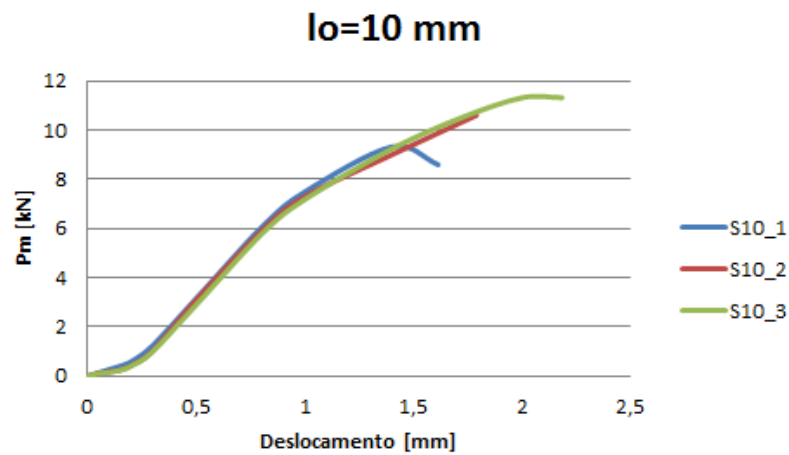


Ilustração 8 - Curvas $P-\delta$ para o $l_o=10$ mm e $t_a=0.2$ mm adesivo XNR6852.

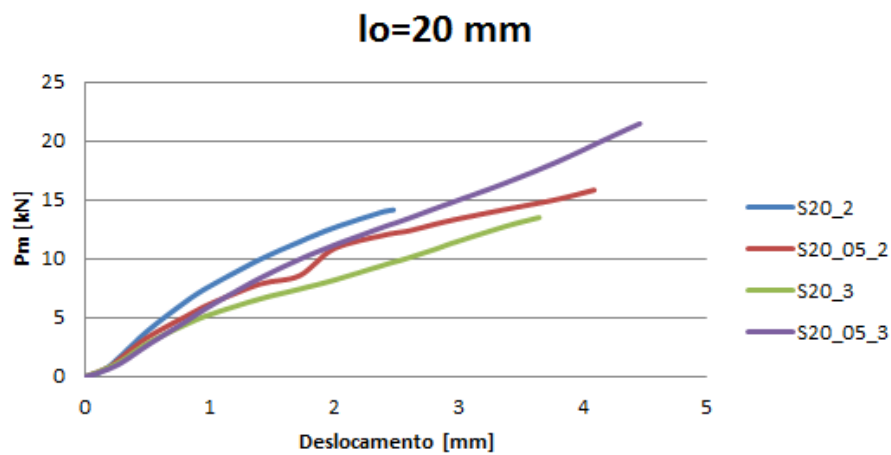


Ilustração 9 - Curvas $P-\delta$ para o $l_o=20$ mm e $t_a=0.2$ mm adesivo XNR6852.

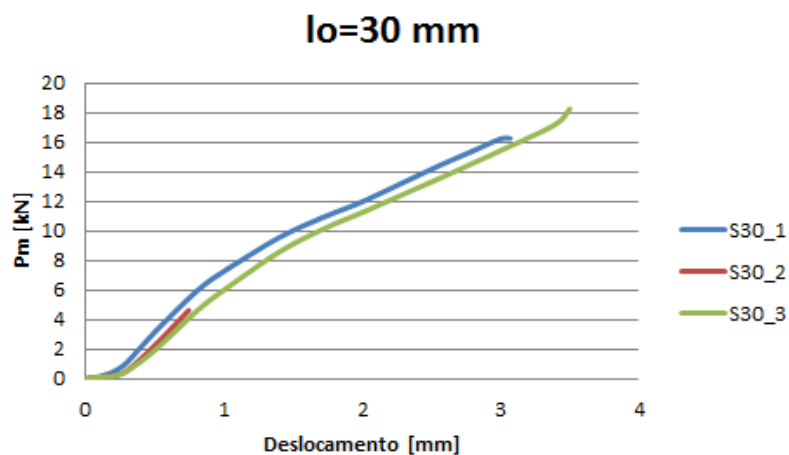


Ilustração 10 - Curvas $P-\delta$ para o $l_o=30$ mm e $t_a=0.2$ mm adesivo XNR6852.

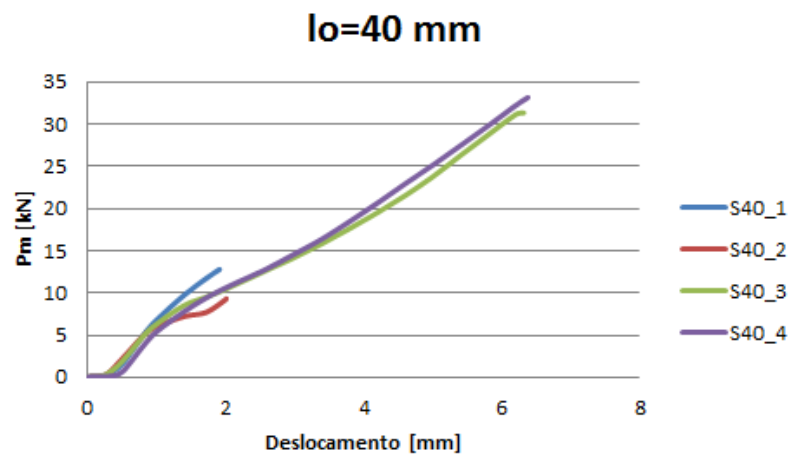


Ilustração 11 - Curvas $P-\delta$ para o $l_o=40$ mm e $t_a=0.2$ mm adesivo XNR6852.

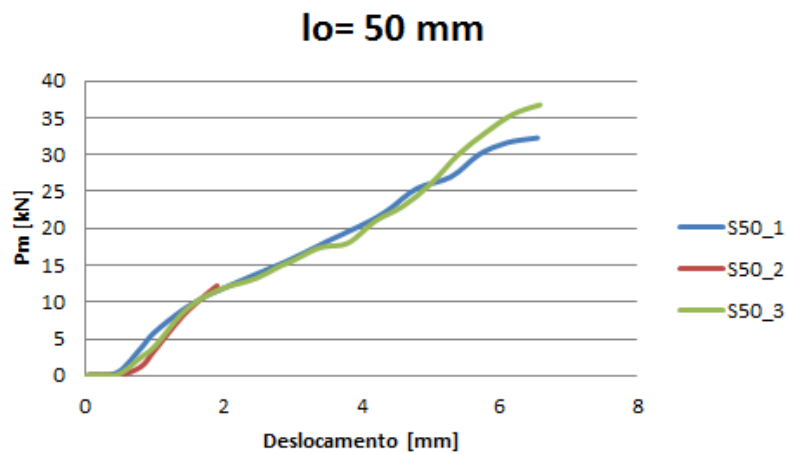


Ilustração 12 - Curvas $P-\delta$ para o $l_o=60$ mm e $t_a=0.2$ mm adesivo XNR6852.

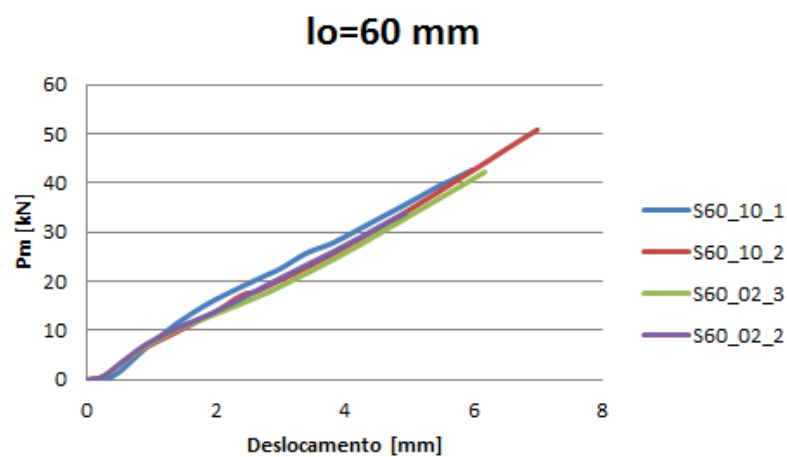


Ilustração 13 - Curvas $P-\delta$ para o $l_o=60$ mm e $t_a=0.2$ mm adesivo XNR6852.