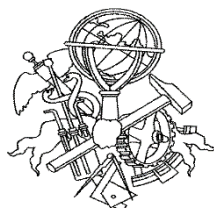


Ligação Adesiva de Polímeros Particularmente Difíceis de Colar

Jorge Ribeiro Martins

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



Outubro 2013

Relatório da Unidade Curricular de Dissertação do 2º ano do Mestrado em Engenharia
Mecânica

Candidato: Jorge Martins, Nº,1900201 @isep.ipp.pt
Orientação Científica: Arnaldo Pinto, agp@isep.ipp.pt
Coorientação: Raul Campilho, rds@isep.ipp.pt

Mestrado em Engenharia Mecânica
Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



Outubro 2013

Agradecimentos

Agradeço, em primeiro lugar, aos Professores Doutores Arnaldo Manuel Guedes Pinto e Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, meu orientador e coorientador, respetivamente. A ambos deixo uma palavra especial, pela disponibilidade e orientação neste trabalho, assim como pela paciência demonstrada e os conhecimentos partilhados durante toda a execução deste trabalho.

À Eng. Fátima do laboratório de Eng. Mecânica do ISEP pela ajuda na realização dos ensaios de tração.

À empresa Sove, S.A. pelo fornecimento dos materiais envolvidos neste trabalho, assim como pela cedência de equipamentos, nomeadamente a máquina de corte e o durómetro tipo A.

Ao meu colega de trabalho da empresa Sove, S.A., Rui Mocho, pela colaboração na obtenção das Normas necessárias e das fichas técnicas dos materiais e também ao meu colega de trabalho na mesma empresa, António Carneiro pela ajuda e disponibilidade no corte dos substratos de PTFE, PP e PVC para a realização de ensaios de tração e de juntas de sobreposição simples pelos métodos *Lap Shear* (LS) e *Block Shear* (BS).

À minha família pela compreensão e apoio demonstrado, em especial à minha esposa Diana Martins pela paciência e apoio incondicional durante todo este trabalho.

Resumo

As ligações adesivas têm sido cada vez mais utilizadas nos últimos anos em detrimento de outros métodos tais como a soldadura, ligações aparafusadas e ligações rebitadas. Os plásticos de Engenharia têm um papel cada vez mais preponderante na indústria, devido às suas excelentes propriedades. Neste trabalho foram considerados três polímeros diferentes, o Policloreto de Vinilo (PVC) e o Polipropileno (PP) dado o seu baixo custo e peso e a superfície quimicamente inerte e o Politetrafluoretileno (PTFE) devido às suas boas propriedades químicas e excelentes propriedades de deslizamento. No entanto, estes materiais possuem uma baixa energia de superfície e, por isso, são muito difíceis de colar com mais relevância para o PTFE. Assim, após um estudo preliminar foi escolhido, para realizar as colagens necessárias, um adesivo da Tamarron Technology “Tam Tech Adhesive”, próprio para este tipo de substratos difíceis de colar. Posteriormente foi efetuada a sua caracterização através de ensaios de provetes maciços à tração.

O principal objetivo deste trabalho foi estudar juntas de sobreposição simples de materiais poliméricos difíceis de colar tais como o PTFE, PP e PVC com recurso a um adesivo que não necessitasse de preparação de superfície. Foram fabricadas juntas de sobreposição simples (JSS) segundo os métodos *Lap Shear* (LS) e *Block Shear* (BS) dos três materiais referidos anteriormente e realizados os respetivos ensaios para avaliar o comportamento mecânico das ligações adesivas. Os materiais utilizados como substratos foram também submetidos a ensaios de tração com a finalidade de obter o módulo de elasticidade e as suas propriedades de resistência. Os substratos envolvidos nas juntas adesivas não sofreram qualquer preparação especial das superfícies. Na maioria dos casos consistiu apenas numa limpeza das superfícies com álcool etílico. Contudo, para o PTFE também se experimentou a preparação por abrasão com lixa e por chama. Foi também efetuado um trabalho de simulação numérica por elementos finitos utilizando um modelo de dano coesivo triangular.

As resistências ao corte obtidas são superiores em BS comparativamente a LS, exceção feita aos substratos de PTFE aonde os resultados são similares. O tratamento por chama melhorou a resistência mecânica das juntas. Verificou-se também que o modelo numérico simulou adequadamente o comportamento das juntas principalmente das LS.

Palavras-Chave

Polímeros, ligações adesivas, juntas de sobreposição simples, modelo de dano coesivo, método de elementos finitos.

Abstract

The use of adhesive bonds has been increasing recently comparatively to other methods such as welding, bolted and riveted joints. Engineering plastics play an important role in the industry due to their excellent properties. In this work we considered three different polymers, the Polyvinyl Chloride (PVC) and Polypropylene (PP) due to their low cost and weight and chemically inert surface and Polytetrafluoroethylene (PTFE) due to its good chemical properties and excellent sliding properties. However, these materials have a low surface energy, which makes them very difficult to bond, especially regarding PTFE. So, after a preliminary study, we used a Tamarron Technology adhesive –“Tam Tech Adhesive”- appropriate for this type of hard-to-bond substrates. Then, its characterization was carried out by testing bulk specimens in tension.

The main purpose of this work was to study single lap joints between polymeric materials that are difficult to bond such as PTFE, PP and PVC using an adhesive that does not require surface preparation. We fabricated single lap adhesive joints using the *Lap-shear* (LS) and *Block-Shear* (BS) methods of those three materials mentioned above and performed tests to evaluate the mechanical behavior of the bonded joints. The materials used as substrates were also submitted to tensile strength tests in order to obtain the Young's modulus and its strength properties. The substrates used in the adhesive bonding didn't have any special preparation of surfaces. On the most of cases only a surface cleaning with ethyl alcohol was performed before bonding. However, for the PTFE surface preparation by sandpaper abrasion and flame treatment were also tested. A numerical simulation by finite elements and using a triangular cohesive zone model was also carried out.

The shear strengths obtained are superior in BS compared to LS, except for the substrates of PTFE where the results are similar. The flame treatment improved the mechanical strength of the joints. It was also found that the numerical model adequately simulated the behavior of the joints, especially with the LS configuration.

Keywords

Polymers, adhesive bonding, single lap adhesive joints, cohesive damage model, finite element method.

Índice

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VII
ABSTRACT	IX
ÍNDICE	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE TABELAS	XIX
NOMENCLATURA	XXI
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	1
1.3 CALENDARIZAÇÃO	2
1.4 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 PRINCÍPIOS DA ADESÃO	5
2.1.1 Forças envolvidas na adesão	5
2.1.2 Molhagem	7
2.1.3 Teorias da adesão	12
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS ADESIVOS	14
2.3 LIGAÇÕES ADESIVAS	15
2.3.1 Geometrias das juntas	16
2.3.2 Esforços típicos	17
2.3.2.1 Tração	17
2.3.2.2 Compressão	18
2.3.2.3 Corte	18
2.3.2.4 Clivagem	18
2.3.2.5 Arrancamento (Peel)	19
2.3.3 Modos de rotura	19
2.3.4 Espessura do adesivo	20
2.3.5 Vantagens e inconvenientes	21
2.3.6 Preparação das superfícies	22
2.3.6.1 Introdução	22
2.3.6.2 Processos passivos químicos	23
2.3.6.3 Processos passivos mecânicos	23
2.3.6.4 Processos ativos químicos	23

2.3.6.5	Processos activos físicos	24
2.3.6.5.1	Descarga de Corona	24
2.3.6.5.2	Tratamento por chama.....	25
2.3.6.5.3	Tratamento por plasma.....	25
2.4	MATERIAIS DOS SUBSTRATOS.....	26
2.4.1	Politetrafluoretileno.....	26
2.4.2	Polipropileno.....	27
2.4.3	Policloreto de vinilo	27
2.5	PREVISÃO DE RESISTÊNCIA EM JUNTAS ADESIVAS	28
2.5.1	Métodos analíticos	28
2.5.2	Métodos numéricos	30
2.5.2.1	Mecânica dos meios contínuos	30
2.5.2.2	Mecânica da fratura	31
2.5.2.3	Mecânica do dano.....	33
2.5.2.3.1	Modelo de dano coesivo.....	33
3	TRABALHO EXPERIMENTAL.....	37
3.1	INTRODUÇÃO.....	37
3.2	SUBSTRATOS	37
3.2.1	Condições de ensaio à tração.....	39
3.2.2	Resultados experimentais.....	41
3.3	ADESIVO	43
3.3.1	Fabrico de provetes maciços	43
3.3.2	Condições de ensaio à tração.....	46
3.3.3	Resultados experimentais	49
3.3.4	Medição de dureza do adesivo	51
3.4	JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES (JSS)- <i>LAP SHEAR</i> (LS).....	53
3.4.1	Fabrico das JSS-LS	53
3.4.2	Condições de ensaio	55
3.4.3	Resultados experimentais.....	56
3.5	JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES (JSS)- <i>BLOCK SHEAR</i> (BS).....	64
3.5.1	Fabrico das JSS-BS	64
3.5.2	Condições de ensaio	66
3.5.3	Resultados experimentais	68
4	TRABALHO NUMÉRICO	73
4.1	CONDIÇÕES DA ANÁLISE NUMÉRICA JSS E BS.....	73
4.2	MODELO DE DANO COESIVO	76
4.2.1	Modelo de dano triangular	76
4.2.2	Determinação das propriedades coesivas	77
4.3	DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NAS JUNTAS ADESIVAS	79
4.3.1	Juntas <i>Lap Shear</i>	79
4.3.2	Juntas <i>Block shear</i>	83
4.4	PREVISÃO DA RESISTÊNCIA DAS JUNTAS.....	87

4.4.1	Juntas <i>Lap Shear</i>	87
4.4.2	Juntas <i>Block shear</i>	90
5	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	95
	REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS	99
	ANEXO A FICHA TÉCNICA PTFE	103
	ANEXO B FICHA TÉCNICA PP	105
	ANEXO C FICHA TÉCNICA PVC	107
	ANEXO D FICHA TÉCNICA DO ADESIVO TAMARRON	109

Índice de Figuras

Fig 1-Comparação das energias e das distâncias de ligação (da Silva, et al., 2007).....	6
Fig 2-Desequilíbrio das forças de atração à superfície de um líquido dá lugar à tensão de superfície e à energia de superfície (da Silva, et al., 2007).....	8
Fig 3-Tensão superficial da água (Lewallen, 1998).....	8
Fig 4-Ângulo de contacto e componentes da tensão superficial atuando numa gota de líquido (Pinto, 2009).....	9
Fig 5-Variação do ângulo de contacto (da Silva, et al., 2007).	9
Fig 6-Espalhamento de um epóxido sobre superfícies sólidas de diferentes tensões superficiais critica (da Silva, et al., 2007).	12
Fig 7-Preenchimento das cavidades pelo adesivo (da Silva, et al., 2007).....	13
Fig 8-Ligação adesiva com representação das interfases e interfaces.....	15
Fig 9-Tipos de juntas mais comuns (da Silva, et al., 2007).	16
Fig 10-Tipo de carregamentos em juntas adesivas (Ebnesajjad, 2008).....	17
Fig 11-Tensões de corte JSS (adaptação de (da Silva, et al., 2007).....	18
Fig 12-Tensões de arrancamento (adaptação de (da Silva, et al., 2007).	19
Fig 13-Modos de rotura (Pinto, 2009).....	20
Fig 14-Possíveis camadas superficiais em polímeros (da Silva, et al., 2007).....	22
Fig 15-Princípio de funcionamento da descarga de corona (da Silva, et al., 2007).	24
Fig 16-Análise de Volkersen (da Silva, et al., 2007).	28
Fig 17-Tensões de arrancamento numa junta de sobreposição simples (da Silva, et al., 2007).....	29
Fig 18-Elementos coesivos para simular o crescimento do dano em ligações adesivas por uma abordagem local (da Silva, et al., 2012).....	34
Fig 19-Abordagem continua numa ligação adesiva (da Silva, et al., 2012).....	34
Fig 20-Serra mecânica de corte (esquadrejadeira).	38
Fig 21-Dimensões dos provetes Bulk utilizados.	38
Fig 22-Substratos utilizados cortados (Bulk).	38
Fig 23-Máquina de ensaios mecânicos Shimadzu.....	39
Fig 24-Provete PP com e sem extensómetro.	40
Fig 25-Provetes Bulk de substratos após ensaio de tração.	40
Fig 26-Curvas tensão-deformação obtidas no ensaio de tração para PTFE, PP e PVC ($v=1$ mm/min).....	41
Fig 27-Curvas força-deslocamento obtidas no ensaio de tração para PTFE, PP e PVC ($v=50$ mm/min).....	42
Fig 28-Adesivo utilizado com misturador mais pistola.....	43

Fig 29-Molde para fabricação de provetes de adesivo.	44
Fig 30-Geometria e dimensões dos provetes de adesivo utilizados no ensaio de tração.	44
Fig 31-Enchimento do molde com adesivo.	44
Fig 32-Molde fechado com provetes de adesivo em cura.	45
Fig 33-Provetes de adesivo para ensaios de tração.	46
Fig 34-Provete de adesivo fixo nas amarras com extensômetro ótico.	46
Fig 35-Provete durante o ensaio com gravação de vídeo.	47
Fig 36-Provetes Bulk de adesivo após ensaios de tração.	48
Fig 37-Print-screen ensaio provete adesivo.	48
Fig 38-Curva tensão-deformação e força-deslocamento para $v= 1$ mm/min.	49
Fig 39-Curva tensão-deformação e força-deslocamento para $v= 4$ mm/min.	50
Fig 40-Medição com durómetro “ Shore A”.	51
Fig 41-Medição com durómetro “ Shore D”.	52
Fig 42-Dimensões dos substratos utilizados nas JSS-LS.	53
Fig 43-Geometria e dimensões da JSS-LS.	53
Fig 44-Fio de pesca em PTFE.	54
Fig 45-JSS-LS com substratos e Tab pressionados com molas.	54
Fig 46-JSS- LS após cura do adesivo.	54
Fig 47-Esforço a que está sujeito a JSS-LS.	55
Fig 48-JSS-LS de PTFE com pouca carga(esq) e pouco antes da rotura (dir).	56
Fig 49-JSS-LS de PP (esq) e de PVC (dir) pouco antes da rotura.	57
Fig 50-Valores médios de força máxima atingida em LS para PTFE, PP e PVC.	58
Fig 51-Tipo de rotura nas JSS-LS de PP para as 6 juntas.	59
Fig 52-Tipo de Rotura nas JSS-LS de PVC para as 6 juntas.	59
Fig 53-Rotura adesiva nas JSS-LS de PTFE.	60
Fig 54-Rotura mista com tendência adesiva nas JSS-LS de PTFE.	60
Fig 55-Maçarico utilizado no tratamento por chama.	61
Fig 56-Valores médios de força máxima em LS para PTFE com e sem chama.	62
Fig 57-JSS-LS de PTFE c/ chama pouco antes da rotura.	62
Fig 58-Tipo de rotura nas JSS-LS de PTFE com tratamento por chama.	63
Fig 59-Rotura mista das JSS-LS de PTFE com tratamento por chama com tendência coesiva.	63
Fig 60-Dimensões dos substratos utilizados nas JSS-BS.	64
Fig 61-Geometria e dimensões da junta JSS-BS.	64
Fig 62-Juntas BS com substratos pressionados por ação de uma mola.	65
Fig 63-Juntas BS com substratos de PP após cura do adesivo.	65
Fig 64-Esforço a que sujeita a JSS-BS.	66
Fig 65-Ferramenta utilizada para as JSS-BS sem provete.	67
Fig 66-Ferramenta utilizada para JSS-BS com provete de PTFE.	67
Fig 67-Valores médios de força máxima em BS para PTFE, PP e PVC.	68

Fig 68-Rotura coesiva para as 4 JSS-BS de PP.....	69
Fig 69-Rotura coesiva para as 4 JSS-BS de PVC.	69
Fig 70-Rotura adesiva para as 4 JSS-BS de PTFE.....	70
Fig 71-Rotura adesiva de PTFE.	70
Fig 72-Quadro comparativo de $F_{m\acute{a}x}$ (média) de juntas BS e LS.....	71
Fig 73-Representação das condições fronteira para as JSS-LS na simulação ABAQUS®.	73
Fig 74-Malha de elementos finitos para as JSS-LS.....	74
Fig 75-Representação das condições fronteira para as JSS-BS na simulação ABAQUS®.	74
Fig 76-Malha de elementos finitos para as JSS-BS.	75
Fig 77-Modelo coesivo de dano triangular disponível no ABAQUS®.....	76
Fig 78-Campo de tensões de von Mises para as juntas LS de PVC (Detalhe numa das extremidades da sobreposição).....	79
Fig 79-Campo de tensões de von Mises para as juntas LS de PVC.....	80
Fig 80-Campo de tensões de corte para as juntas LS de PVC.....	80
Fig 81-Distribuição de tensões de corte para as juntas LS.....	81
Fig 82-Campo de tensões de arrancamento para as juntas LS de PVC (Detalhe numa das extremidades da sobreposição).....	82
Fig 83-Distribuição de tensões de arrancamento para as juntas LS.	82
Fig 84-Campo de tensões de von Mises para as juntas BS de PVC (Detalhe numa das extremidades de sobreposição).....	83
Fig 85-Campo de tensões de von Mises para as juntas BS de PVC.....	84
Fig 86-Campo de tensões de corte para as juntas BS de PVC.	85
Fig 87-Distribuição de tensões de corte para as juntas BS.....	85
Fig 88-Campo de tensões de arrancamento para as juntas BS de PVC.....	86
Fig 89-Distribuição de tensões de arrancamento para as juntas BS.....	87
Fig 90-Comparação entre curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas para as juntas LS de PVC.....	88
Fig 91-Comparação entre curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas para as juntas LS de PP.....	88
Fig 92-Comparação entre curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas para as juntas LS de PTFE.	89
Fig 93-Valores de $\tau_{méd}$ experimentais e numéricos para juntas LS para os diferentes substratos. ...	89
Fig 94-Comparação entre curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas para as juntas BS de PVC.	91
Fig 95-Comparação entre curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas para as juntas BS de PP.....	91
Fig 96-Comparação entre curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas para as juntas BS de PTFE.....	92
Fig 97-Valores de $\tau_{méd}$ experimentais e numéricos para as juntas BS para os diferentes substratos.	92

Índice de Tabelas

Tabela 1-Mapa de planeamento.	2
Tabela 2-Tipos de ligações e energias de ligação (adaptação a partir de (Petrie, 2000).	7
Tabela 3-Tensão de superfície crítica para vários materiais (da Silva, et al., 2007).	12
Tabela 4-Classificação dos adesivos segundo a função (adaptação de (de Moura, et al., 2005)....	14
Tabela 5-Principais propriedades mecânicas (Fornecidas pelo fabricante).	39
Tabela 6-Propriedades mecânicas de PP, PVC e PTFE, valores experimentais.	42
Tabela 7-Propriedades mecânicas do adesivo Tam Tech Adhesive obtidas experimentalmente.....	50
Tabela 8-Durezas medidas” Shore A”.	51
Tabela 9-Durezas medidas” Shore D”.	52
Tabela 10-Propriedades mecânicas do adesivo e dos substratos.....	75
Tabela 11-Propriedades coesivas do adesivo Tam Tech Adhesive.....	78

Nomenclatura

Abreviaturas

BS	<i>Block Shear</i>
DCB	<i>Double Cantilever Beam</i>
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
EPD	Estado plano de deformação
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
JSS	Junta de sobreposição simples
LS	<i>Lap Shear</i>
MDC	Modelo de dano coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
PP	Polipropileno
PTFE	Politetrafluoretileno (Teflon [®])
PVC	Policloreto de vinilo

Símbolos

A_0	Área inicial secção transversal
$\Delta\epsilon$	Diferença de Deformação
$\Delta\sigma$	Diferença de Tensão
E	Módulo de Elasticidade à tração
$\epsilon_{t\text{máx}}$	Deformação máxima à tração
$F_{\text{máx}}$	Carga máxima

G	Módulo de corte
G^c	Valor crítico de resistência à rotura
G_n^c	Energia crítica Modo I
G_s^c	Energia crítica Modo II
L_e	Comprimento inicial do extensómetro
L_m	Distância entre maxilas
$P-\delta$	Força-deslocamento
S	Coefficiente de espalhamento
t_m^0	Tensão máxima modo misto
t_n	Tensão de tração
t_s	Tensão de corte
W_a	Trabalho de adesão
γ_c	Tensão de superfície crítica
γ_{LV}	Tensão superficial do líquido com o vapor
γ_{SL}	Tensão interfacial entre o sólido e o líquido
γ_{SV}	Tensão superficial do sólido
θ	Ângulo de contacto
ν	Coefficiente de Poisson
Π	Pressão de espalhamento
$\sigma_{máx}$	Tensão máxima
σ_r	Tensão de rotura
σ_y	Tensão limite elástica
$\sigma_{0,2}$	Tensão limite elástica (0,2)
σ_y	Tensões de arrancamento (segundo y)
$\tau_{méd}$	Tensão de corte média
τ_{xy}	Tensões de corte
$\delta_{máx}$	Deformação máxima

1 Introdução

1.1 Contextualização

A utilização de plásticos de engenharia tem vindo a aumentar progressivamente nos últimos anos. A sua baixa densidade aliada às suas excelentes propriedades mecânicas, químicas e elétricas e também a um custo bastante controlado, têm levado a uma utilização expansiva destes materiais.

A utilização de juntas coladas em aplicações industriais também tem vindo a aumentar nos últimos anos. Tal facto deve-se à facilidade de efetuar juntas, de obtenção de uma melhor distribuição de tensões ao longo da área ligada, aos custos inferiores, por permitir a ligação de materiais diferentes, pela fácil automatização e grande capacidade de amortecimento de vibrações, entre outros.

No entanto, a colagem de alguns materiais poliméricos é bastante difícil. Neste campo destacam-se as poliolefinas nas quais podemos encontrar o polipropileno (PP) e os plásticos fluorados como o politetrafluoretileno (PTFE). Neste trabalho também realizamos colagens envolvendo o policloreto de vinilo (PVC). A principal razão para uma má molhagem prende-se com a sua baixa energia superficial e o facto de estes polímeros possuírem uma superfície quimicamente inerte.

1.2 Objetivos

Os principais objetivos deste trabalho são:

- Analisar o comportamento mecânico de juntas adesivas segundo os métodos LS e BS com substratos de PTFE, PP e PVC.

- Determinar as propriedades à tração dos materiais utilizados para os substratos e o adesivo.
- Prever a força de rotura das juntas recorrendo a métodos numéricos.

1.3 Calendarização

Na **Tabela 1** apresenta-se o mapa de planeamento para a realização desta tese que permitiu auxiliar no desenvolvimento deste trabalho, com o intuito de alcançar os objetivos propostos.

Tabela 1-Mapa de planeamento.

Tarefas a executar	Out/12	Nov/12	Dez/12	Jan/13	Fev/13	Mar/13	Abr/13	Mai/13	Jun/13	Jul/13	Ago/13	Set/13	Out/13
Seleção de materiais	█												
Seleção de adesivo		█											
Projecto de junta		█											
Corte Provetes Lap-Shear		█											
Corte Provetes Block-Shear		█											
Fabrico de juntas Lap-Shear			█										
Fabrico de juntas Block-Shear				█									
Ensaio Juntas LS e BS					█								
Fabrico provetes adesivo						█							
Ensaio provetes adesivo							█						
Ensaio de provetes Bulk								█					
Relatório revisão bibliográfica					█	█	█						
Relatório parte experimental							█	█	█				
Análise numérica								█	█	█			
Relatório parte numérica										█	█	█	
Entrega de relatório													█

1.4 Organização do relatório

Esta dissertação desenvolveu-se por cinco capítulos. Neste **primeiro** capítulo são apresentados os principais objetivos deste trabalho e os temas abordados em cada um dos capítulos desta dissertação.

No **capítulo dois** é feita uma introdução à noção de adesão e às teorias que descrevem a mesma, assim como às forças envolvidas na adesão, tais como as ligações primárias, secundárias e as ligações de hidrogénio. É descrito com maior pormenor o conceito de molhagem, tão importante nas superfícies poliméricas e descritos os conceitos de energia de superfície e tensão superficial. Neste capítulo são descritos os adesivos no que respeita à forma como se classificam, tipos de adesivos, vantagens e desvantagens das ligações

adesivas e os esforços mais comuns. Também é efetuada uma abordagem às preparações de superfície e aos materiais de base. Neste capítulo é ainda feita uma breve abordagem teórica aos métodos analíticos de análise de tensões em juntas de sobreposição simples. Por fim, é efetuada uma abordagem teórica aos métodos numéricos.

No **capítulo três** é abordado o trabalho experimental efetuado e apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de juntas de sobreposição simples segundo o método *Lap Shear* (LS) e o método *Block Shear* (BS). Os resultados obtidos nos ensaios à tração de provetes de adesivo maciço e de provetes produzidos com os materiais utilizados como substratos nas JSS estão apresentados neste capítulo. Apresenta-se também os resultados dos ensaios de dureza realizados no adesivo.

No **capítulo quatro** é efetuado o trabalho numérico recorrendo ao Software Abaqus[®] 6.11. Primeiro são apresentadas as condições da análise numérica e também é apresentado o modelo de dano coesivo triangular. São também determinadas as propriedades coesivas. Vamos também verificar como se distribuem as tensões de corte e de arrancamento nas JSS segundo os métodos LS e BS. É também efetuada a previsão de resistência das juntas e a comparação dos resultados numéricos com os experimentais.

No **capítulo cinco** são apresentadas as conclusões deste trabalho assim como sugestões de trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Princípios da adesão

A adesão é um processo de ligação no qual se ligam dois substratos por meio de um adesivo. Nesta existe um conjunto de forças mecânicas, físicas e químicas que se sobrepõem e se influenciam.

2.1.1 Forças envolvidas na adesão

A principal função de uma ligação adesiva, aparafusada, rebitada ou soldada, é ser resistente a forças externas que tendem a quebrar a ligação. Essas solicitações são suportadas por força internas na junta. Existem diversos tipos de forças que contribuem para a resistência dos adesivos e conseqüentemente para a resistência das juntas adesivas. A adesão surge quando as moléculas de uma superfície de um corpo estão suficientemente próximas das moléculas da superfície de outro corpo, para assim permitir a ligação com as respectivas forças de ligação. Em última análise, as únicas forças são as forças fundamentais de ligação química que ligam os materiais. Estas podem ser de diversos tipos:

Ligações químicas primárias (fortes) (da Silva, et al., 2007) (Petrie, 2000).

- Ligações iônicas- Estas ligações são resultantes da atração eletrostática de Coulomb entre íons carregados com cargas opostas (positiva e negativa). As energias de ligação variam na faixa entre 600 e 1000 kJ/mol.
- Ligações covalentes- Estas ligações são caracterizadas pela partilha de pares de elétrons entre partículas sem carga. As energias de ligação variam na faixa entre 60 e 700 kJ/mol.

- Ligações metálicas- Estas ligações, encontradas em metais e suas ligas, são provenientes da partilha dos eletrões mais ou menos livres para se movimentar ao longo de todo o metal. As energias de ligação variam na faixa entre 100 e 350 kJ/mol.

Ligações secundárias ou de van der Waals (fracas) (da Silva, et al., 2007).

- Ligações entre dipolos não permanentes- Forças de dispersão ou de **London** que têm origem na assimetria instantânea da distribuição de carga, em um átomo ou molécula.
- Ligações entre dipolos permanentes e não permanentes- Forças de **Debye** que se devem à distribuição não uniforme das cargas eletrostáticas. Uma molécula polar induz um dipolo numa molécula não polar próxima.
- Ligações entre dipolos permanentes ou forças de **Keesom**- Forças estabelecidas entre moléculas polares. O polo positivo atrai o polo negativo do outro.

Ligações de hidrogénio

Estas ligações apresentam propriedades intermédias entre as ligações primárias e as ligações secundárias e dependem das propriedades únicas do hidrogénio.

As principais características das ligações são apresentadas na Tabela 2 e Fig 1.

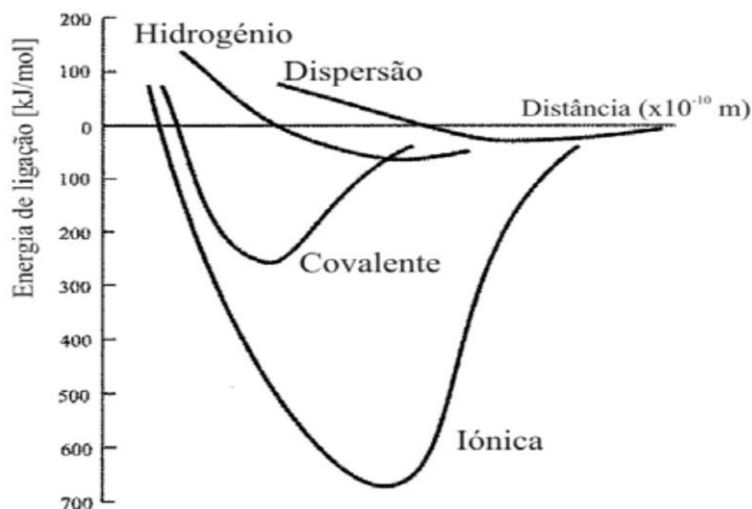


Fig 1-Comparação das energias e das distâncias de ligação (da Silva, et al., 2007).

Tabela 2-Tipos de ligações e energias de ligação (adaptação a partir de (Petrie, 2000)).

Tipo de ligação		Energia[kJ/mole]	Distância[Å]
Ligação primária	Iónica	600 a 1000	1 a 6
	Covalente	60 a 700	
	Metálica	100 a 350	
Ligação secundária	London	0,08 a 40	2 a 6
	Debye	até 2	
	Keesom	4 a 20	
Ligações hidrogénio		até 40	3

As ligações primárias são mais resistentes do que as ligações secundárias. Contudo estas últimas atuam para distâncias maiores, tal como mostra a Fig 1 e a Tabela 2.

2.1.2 Molhagem

Neste sub-capítulo são abordados assuntos essenciais para a ligação adesiva, tais como a molhagem, o espalhamento e a energia livre entre um sólido e um líquido. A fim de se obter uma boa ligação entre o adesivo e a superfície do substrato é necessário que o adesivo se espalhe com facilidade pela superfície do substrato ou seja, é necessário que a superfície possua uma boa molhagem. Deste modo podemos definir a molhagem como sendo a capacidade de um líquido se espalhar numa superfície (Pinto, 2009).

A molhagem está intimamente relacionada com a energia livre de superfície e a tensão de superfície. A energia livre de superfície pode ser vista como a força de atração de uma superfície. “Dentro de um líquido, as forças de atração entre as moléculas estão em equilíbrio em todas as direções” (da Silva, et al., 2007). À superfície este equilíbrio não existe, pois não existem moléculas vizinhas do lado exterior da superfície e as moléculas da superfície são sujeitas a uma força que as puxa para o interior (Fig 2). Para trazer novas moléculas à superfície é necessário fornecer-lhes energia pelo facto de as moléculas da superfície requererem uma maior quantidade de energia relativamente às moléculas que se situam no interior. Esta energia extra das moléculas que se encontram à superfície designa-se por energia de superfície, expressa como energia por unidade de área, mJ.m^{-2} (da Silva, et al., 2007).

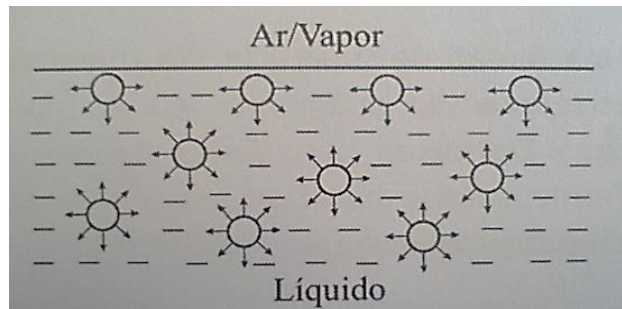


Fig 2-Desequilíbrio das forças de atração à superfície de um líquido dá lugar à tensão de superfície e à energia de superfície (da Silva, et al., 2007).

A tensão superficial pode ser vista como uma “força de contração” que segura as moléculas umas contra as outras, tal como uma membrana elástica (Pinto, 2009).

Um efeito conhecido da tensão superficial da água é o facto de alguns insetos poderem andar em cima da água, tal como se pode observar na Fig 3 (da Silva, et al., 2007).

“A energia de superfície e a tensão de superfície são dimensionalmente equivalentes mas numericamente iguais, e os termos são geralmente usados quase sem distinção. Ambas são representadas pela letra grega γ ” (da Silva, et al., 2007).



Fig 3-Tensão superficial da água (Lewallen, 1998).

A formação de uma gota de líquido numa superfície sólida pode ser descrita pelo ângulo de contacto θ entre a superfície sólida e a tangente à superfície do líquido no ponto de contacto (Fig 4).

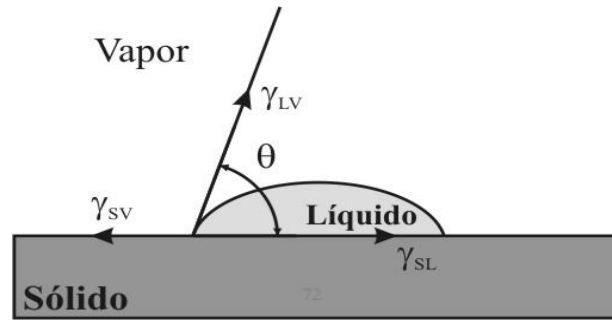


Fig 4-Ângulo de contacto e componentes da tensão superficial atuando numa gota de líquido (Pinto, 2009).

O valor de θ pode variar de zero, o que indica uma molhagem completa pelo líquido, a 180° quando o líquido tem a forma de uma gota esférica e não molha de todo o sólido (Fig 5).

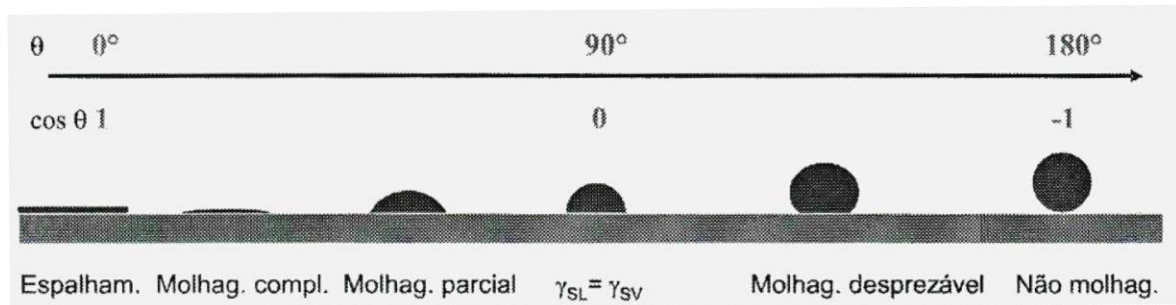


Fig 5-Variação do ângulo de contacto (da Silva, et al., 2007).

A tensão superficial de um líquido em equilíbrio com o vapor, γ_{LV} , e o ângulo de contacto de uma gota de líquido na superfície do sólido, estão relacionados pela equação de Thomas Young (Young, 1805):

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} * \cos \theta \quad \text{Equação 1}$$

onde γ_{LV} representa a tensão superficial do líquido em equilíbrio com o seu vapor e γ_{SV} representa a tensão superficial do sólido. A tensão interfacial entre o sólido e o líquido é γ_{SL} .

Quando $\theta > 0^\circ$, o líquido não se espalha, mas quando $\theta = 0^\circ$ o líquido molha completamente o sólido e espalha-se espontânea e livremente sobre a superfície a uma velocidade que depende de fatores como a viscosidade do líquido e a rugosidade da superfície. Para ocorrer uma molhagem espontânea é necessário que:

$$\gamma_{SV} > \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \quad \text{Equação 2}$$

Este critério também pode ser expresso definindo um parâmetro designado por coeficiente de espalhamento S , dado por:

$$S = \gamma_{SV} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LV}) \quad \text{Equação 3}$$

Quando um líquido se espalha espontaneamente e molha completamente uma superfície sólida, $S > 0$. É possível fazer um líquido espalhar-se sobre uma superfície sólida mesmo quando $\theta > 0$, sendo neste caso necessária a aplicação de uma pressão ou de uma força sobre o líquido para o espalhar na superfície (da Silva, et al., 2007).

Dupré (Dupré, 1869) considerou o trabalho de adesão W_A como sendo a diferença entre a energia de novas superfícies criadas e a energia da interface destruída:

$$W_A = \gamma_S + \gamma_L - \gamma_{SL} \quad \text{Equação 4}$$

Na equação de Young, a superfície sólida está em equilíbrio com o vapor e a energia correspondente γ_{SV} . No caso dos líquidos, a tensão superficial corresponde a um valor de equilíbrio e não varia com o meio, ou seja $\gamma_L = \gamma_{LV}$.” A energia de superfície de um sólido coberto por uma camada de vapor adsorvido é menor do que uma superfície no vazio, sendo a diferença dada por uma quantidade conhecida como a pressão de espalhamento π ”: (da Silva, et al., 2007).

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SO} - \pi \quad \text{Equação 5}$$

A equação de Dupré (Equação 4) pode ser então reescrita da seguinte forma:

$$W_A = \gamma_{SV} + \pi + \gamma_{LV} - \gamma_{SL} \quad \text{Equação 6}$$

Combinando-se as equações 1 e 4 obtém-se:

$$w_A = \gamma_{LV} * (1 + \cos\theta) + \pi \quad \text{Equação 7}$$

Esta equação descreve corretamente e com precisão a situação de uma gota de adesivo líquido numa superfície sólida (da Silva, et al., 2007).

No entanto, é assumido que a adsorção do vapor em sólidos de baixa energia de superfície tais como os polímeros é muito pequena e desprezível levando a que as energias de superfície sejam iguais. Devido a este facto o valor de $\pi = 0$, logo a equação de Young-Dupré pode ser escrita:

$$w_A = \gamma_{LV} * (1 + \cos\theta) \quad \text{Equação 8}$$

Para uma molhagem perfeita, $\theta=0$ e $\cos\theta=1$ logo,

$$w_A = 2 * \gamma_{LV} \quad \text{Equação 9}$$

Esta nova quantidade $2\gamma_{LV}$ designa-se por trabalho de coesão.

Quando $\theta=180$, temos $\cos\theta= -1$, logo o trabalho de adesão $=0$. Este é o caso limite, em que não existe adesão entre as duas faces.

Zisman (Fox H.W e Zisman, 1950) conseguiu desenvolver um método simples de estimar a energia superficial de um sólido. Ao estudar a relação entre energias de superfícies líquidas e ângulos de contacto usando líquidos e energias de superfície baixas, verificou a existência de uma relação linear entre o coseno do ângulo de contacto e a energia de superfície do líquido. Foi possível definir uma energia/ tensão de energia crítica γ_c , como sendo o valor da tensão superficial do líquido para que este quase, e somente quase, se espalhe sobre o sólido.

A partir da Fig 6 pode-se observar que quanto maior for a tensão superficial do substrato (γ_c), relativamente à energia superficial do adesivo epóxico, mais facilmente este se espalha pelo substrato, ou seja melhor é a molhagem. A tabela 3 apresenta os valores de tensão de superfície crítica para vários materiais.

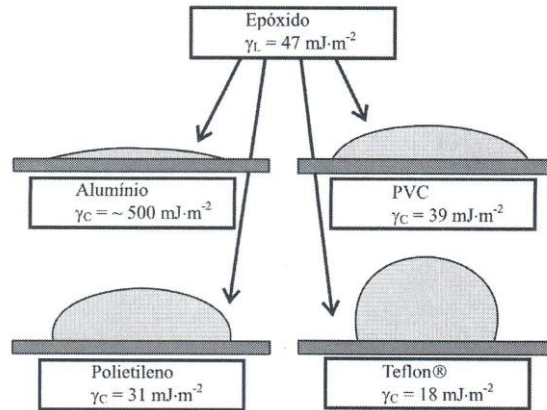


Fig 6-Espalhamento de um epóxico sobre superfícies sólidas de diferentes tensões superficiais crítica (da Silva, et al., 2007).

Tabela 3-Tensão de superfície crítica para vários materiais (da Silva, et al., 2007).

Sólidos	γ_c (mJ/m²)
Cobre	1000
Alumínio	500
Aço	100
Grafite	924
CFRP (Abrasão)	58
Epóxico	47
Policarbonato	46
PMMA	39
PVC	39
PE	31
PTFE	18
Silicone	24
Líquidos	γ_L (mJ/m²)
Epóxico	47
Óleo lubrificante	29
Água	73

2.1.3 Teorias da adesão

A ligação de um adesivo a uma determinada superfície é a soma de um conjunto de forças mecânicas, físicas e químicas que se sobrepõem e se influenciam (da Silva, et al., 2007).

Com a finalidade de descrever o mecanismo de adesão desenvolveram-se ao longo do tempo diversas teorias, tais como a teoria mecânica, adsorção, difusão e eletrostática.

A teoria mecânica da adesão é a mais antiga. Segundo esta teoria uma boa adesão acontece quando o adesivo penetra nos poros, e/ou irregularidades da superfície do substrato, ficando assim encravado no próprio substrato (Fig 7). O adesivo deve molhar convenientemente o substrato para evitar o aparecimento de vazios na interface. Para isso o adesivo deve possuir uma viscosidade tal que lhe permita preencher totalmente os poros e os detalhes da superfície (da Silva, et al., 2007).

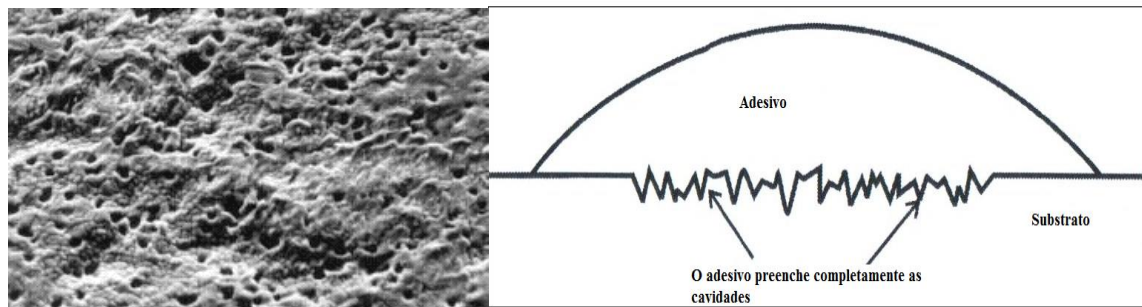


Fig 7-Preenchimento das cavidades pelo adesivo (da Silva, et al., 2007).

A teoria da adsorção depende essencialmente das forças interatômicas e intermoleculares desenvolvidas na superfície do adesivo e do substrato quando se estabelece um contacto interatômico entre os dois materiais (Pinto, 2009). Este tipo de contacto existe caso ocorra uma boa molhagem. Como já foi referido, as forças químicas podem ser de dois tipos, primárias ou secundárias. Em muitos mecanismos de adesão apenas estão envolvidas forças secundárias interfaciais, tais como ligações de van der Waals e pontes de hidrogénio. Também se podem formar ligações primárias na interface, tais como ligações covalentes ou iónicas. Estas ligações são fortes e em alguns casos contribuem significativamente para a adesão intrínseca.

A teoria da difusão necessita que os substratos e o adesivo sejam poliméricos, que tenham capacidade de movimento e que sejam compatíveis e miscíveis. Nesta teoria a extremidade de uma cadeia de uma molécula de polímero de uma superfície difunde-se na estrutura de uma segunda superfície formando uma ponte ou ligação através da interface (da Silva, et al., 2007).

A teoria eletrostática implica a transferência de eletrões entre duas superfícies, substrato e adesivo, existindo uma diferença de eletronegatividade entre elas. A interação de cargas positivas e negativas, cada uma dela associada a uma das superfícies, promove a transferência de eletrões.

2.2 Classificação dos adesivos

Os adesivos podem ser classificados de acordo com diferentes critérios, nomeadamente: pela função, composição química, método de reação, modo de endurecimento, custo, forma física e aplicação.

A classificação segundo a função é uma das mais interessantes para o utilizador e baseia-se no desempenho do adesivo. Esta classificação divide os adesivos em dois grupos: adesivos estruturais e adesivos não estruturais (Tabela 4).

Tabela 4-Classificação dos adesivos segundo a função (adaptação de (de Moura, et al., 2005).

Adesivos	
Estruturais	Não estruturais
Fenólicos Acrílicos Poliuretano Poliesteres Poliimida Epóxido	Híbrido Nitrilo Vinilo Neopreno Anaeróbicos Cianocrilatos modificados Nitrilo Híbrido Nylon Fenólico Vinilo Polissulfeto
	Borrachas sintéticas Silicone Policloropreno Nitrilo Termofusíveis

Os adesivos estruturais são materiais de elevada resistência capazes de conferir à ligação adesiva uma resistência ao corte superior a 5-10 MPa. A principal função dos adesivos estruturais é manter ligadas as estruturas e serem capazes de resistir a cargas elevadas sem grande deformação nos mais variados ambientes necessitando, no entanto, de uma cuidada preparação superficial (Petrie, 2000). Neste tipo de adesivos estruturais temos: epóxidos,

fenólicos, anaeróbicos, poliuretanos, cianocrilatos, acrílicos modificados, poliésteres, poliimidadas e bismaleimidadas.

Os adesivos não estruturais não são adaptados ao suporte de cargas substanciais, servindo apenas para manter em posição materiais leves e não sujeitos a cargas. Aqui englobam-se as borrachas sintéticas, termofusíveis, entre outros (Petrie, 2000).

2.3 Ligações adesivas

Uma ligação efetuada com recurso a um adesivo denomina-se ligação adesiva. Para se realizar uma junta adesiva são necessárias duas superfícies que serão ligadas recorrendo a um adesivo (Fig 8). Estas duas superfícies designam-se por substratos ou aderentes. Um adesivo é um material que quando aplicado em superfícies deve possuir a capacidade de as ligar através de forças de adesão. Adesão é a afinidade entre os substratos e o adesivo, resultante das forças intermoleculares que se estabelecem entre eles. A coesão envolve as forças intermoleculares dentro do adesivo, quando sujeito a esforços. A região entre o adesivo e o substrato denomina-se interfase. Esta é uma fina região na zona de contacto adesivo-substrato (da Silva, et al., 2007). A interface é o plano de contacto entre as superfícies de dois materiais e está contida na interfase.

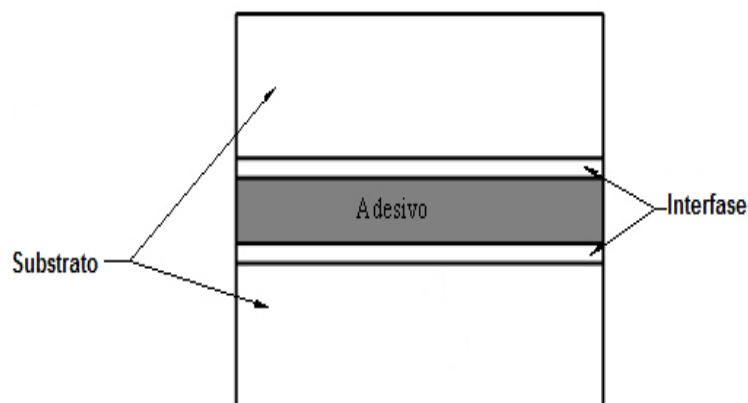


Fig 8-Ligação adesiva com representação das interfases e interfaces.

2.3.1 Geometrias das juntas

Na Fig 9 estão representados os tipos de juntas mais comuns.

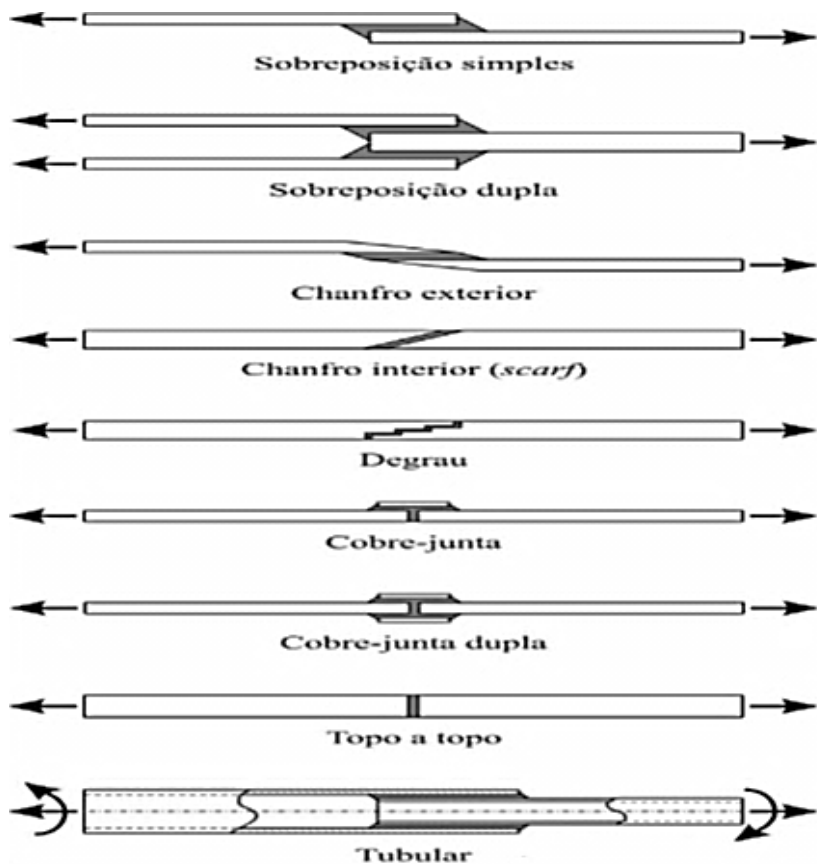


Fig 9-Tipos de juntas mais comuns (da Silva, et al., 2007).

As juntas de topo são as mais simples de produzir mas não apresentam uma grande eficácia devido à grande concentração de tensões de arrancamento e de corte nas extremidades. A utilização de juntas em degrau ou com chanfro interior permite a diminuição do efeito de concentração de tensões ao longo do adesivo, conduzindo ao aumento da resistência da junta. No entanto, este tipo de junta apresenta uma grande desvantagem que reside na dificuldade em se maquinar os respectivos substratos em rampa ou degrau.

As JSS são as mais utilizadas devido à facilidade da sua fabricação; porém, neste tipo de junta pode existir um descentramento na aplicação da carga o que leva a que haja flexão dos substratos. Devido a este fator o adesivo fica sujeito a corte e a efeitos de arrancamento na extremidade das juntas, levando a que haja uma diminuição da resistência da junta

(Petrie, 2000). Para minimizar este problema utilizam-se juntas de sobreposição dupla, para aumentar a resistência à flexão da junta (da Silva, et al., 2007).

As juntas com chanfro e com degrau são projetadas especialmente para reduzir as tensões de arrancamento. Por sua vez, as juntas de reforço simples ou duplo apresentam uma resistência superior às de sobreposição simples.

2.3.2 Esforços típicos

Numa junta adesiva, na maior parte das situações, a distribuição de tensões não é uniforme. As forças aplicadas provocam tensões, que não sendo de todo modo esperadas podem levar a uma variação da resistência máxima da junta (da Silva, et al., 2007) (Petrie, 2000).

Os esforços mais comuns que podem estar presentes numa ligação adesiva são os apresentados na Fig 10.

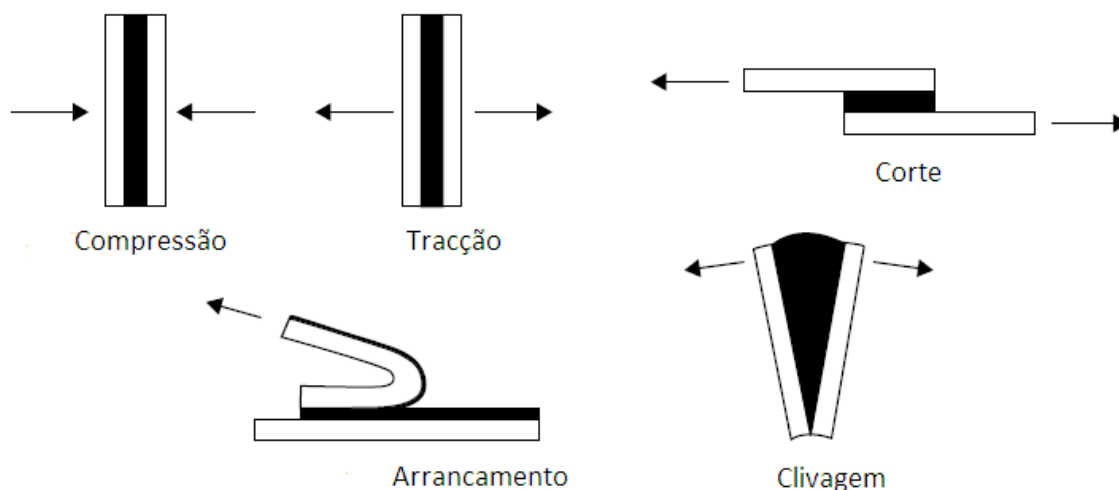


Fig 10-Tipo de carregamentos em juntas adesivas (Ebnesajjad, 2008).

2.3.2.1 Tração

Este tipo de esforço desenvolve-se quando as forças que atuam na perpendicular ao plano da junta e são uniformemente distribuídas ao longo da área colada. Normalmente a espessura do adesivo é difícil de controlar e as forças raramente são axiais, levando ao aparecimento de tensões de clivagem e de arrancamento (da Silva, et al., 2007).

2.3.2.2 Compressão

Este tipo de forças leva a que os substratos se comprimam uns contra os outros. As forças de compressão devem ser mantidas alinhadas de modo a que o adesivo esteja em compressão pura. A distribuição de tensões pelo adesivo é constante. Uma junta em compressão pura quase não precisa de adesivo (da Silva, et al., 2007).

2.3.2.3 Corte

Este tipo de carregamento ocorre quando as forças que atuam no plano do adesivo levam à separação dos substratos. As juntas dependentes da resistência ao corte do adesivo são de fabrico fácil, sendo por isso muito utilizadas. As JSS são o tipo de juntas mais utilizadas (Petrie, 2000).

Na Fig 11 é possível verificar a distribuição das tensões de corte numa JSS.

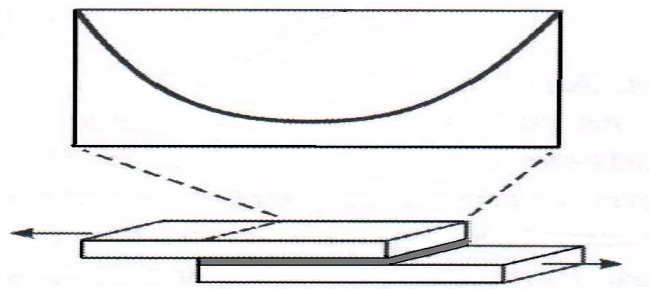


Fig 11-Tensões de corte JSS (adaptação de (da Silva, et al., 2007).

De notar que as extremidades estão sujeitas a um nível de tensões superior quando comparado com a parte central. Isto deve-se ao efeito da deformação diferencial de cada um dos aderentes ao longo do comprimento de sobreposição, pois cada aderente deforma-se longitudinalmente a uma taxa crescente desde a sua extremidade até à extremidade oposta (Volkersen, 1938). Por este facto, a largura de sobreposição é mais importante que o seu comprimento.

2.3.2.4 Clivagem

A clivagem é provocada por forças atuantes nas extremidades de uma junta rígida, levando à separação dos substratos (Petrie, 2000). Assim, existe uma forte concentração de tensões na extremidade sujeita às forças atuantes de clivagem.

2.3.2.5 Arrancamento (Peel)

É um fenómeno semelhante ao de clivagem, no entanto este aplica-se nos casos em que um ou ambos os substratos são flexíveis, conduzindo a uma deformação plástica (Petrie, 2000). Neste caso, a concentração de tensões é muito mais localizada numa das extremidades (Fig 12).

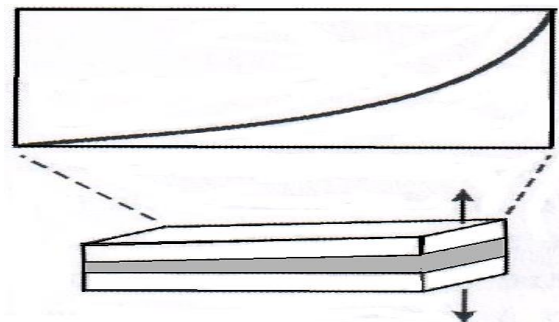


Fig 12-Tensões de arrancamento (adaptação de (da Silva, et al., 2007).

Visto que as tensões de clivagem e de arrancamento se concentram em zonas mais localizadas, normalmente numa das extremidades da ligação, as juntas submetidas a clivagem ou arrancamento possuem uma resistência bastante inferior, quando comparadas com as juntas sujeitas ao corte (Petrie, 2000). Por este facto os esforços de clivagem e de arrancamento devem ser evitados utilizando-se configurações em que predominam, preferencialmente, os esforços de corte.

2.3.3 Modos de rotura

A principal missão para uma boa ligação 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 (da Silva, et al., 2007). A norma ASTM D 5573-99 (ASTM D 5573, 1999) classifica os modos de rotura em juntas de plástico reforçado com fibras (FRP). Esta norma prevê oito formas de rotura. No entanto, as mais frequentes em juntas com substratos não reforçados estão representados na Fig 13.

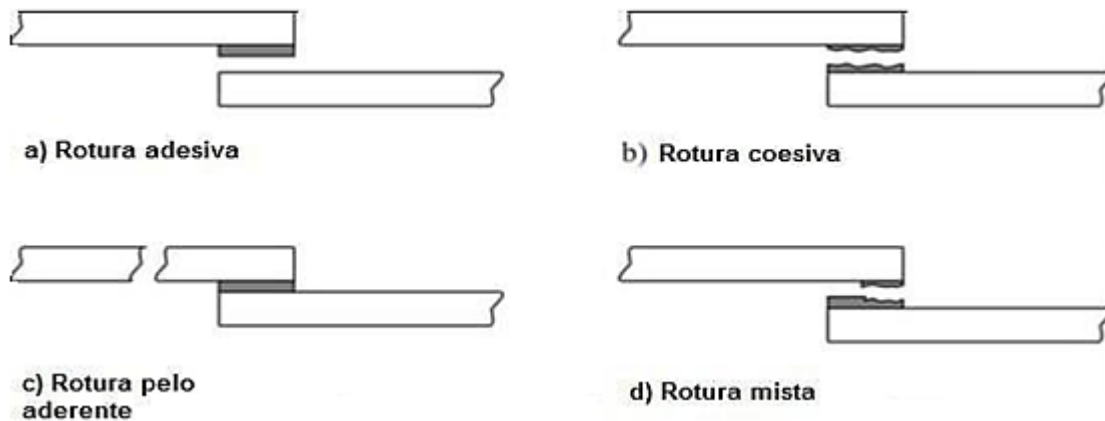


Fig 13-Modos de rotura (Pinto, 2009).

A rotura adesiva ocorre na interface entre o substrato e o adesivo. Após a rotura, a superfície de um dos substratos não apresenta adesivo. Este facto deve-se geralmente a uma má preparação das superfícies.

A rotura coesiva ocorre no interior do adesivo, ou seja, ocorre quando os substratos e a ligação entre o adesivo e o substrato são mais fortes do que a resistência interna do próprio adesivo. Neste caso, ambas as superfícies dos substratos estão cobertas de adesivo.

A rotura coesiva no adesivo ou a rotura pelo aderente são os modos de rotura preferenciais, pois é utilizada a totalidade da resistência dos materiais constituintes da junta. Por vezes a rotura ocorre por uma combinação de rotura adesiva e rotura coesiva, designando-se por rotura mista. Pode dever-se, neste caso, a uma má limpeza de uma dada região das superfícies a ligar ou até mesmo do próprio adesivo.

2.3.4 Espessura do adesivo

A espessura do adesivo é uma das características geométricas a considerar no projeto de uma junta. Deve-se garantir uma espessura ótima para o adesivo necessária à obtenção do melhor desempenho da junta. Na grande maioria das aplicações das juntas coladas que utilizam adesivos estruturais, os fabricantes recomendam uma espessura de 0,1 a 0,2 mm para a obtenção da resistência máxima (Gleich, et al., 2001).

2.3.5 Vantagens e inconvenientes

Comparativamente a outros métodos de ligação, os adesivos apresentam várias vantagens (da Silva, et al., 2007):

- Distribuição mais uniforme das tensões ao longo da área ligada, permitindo à partida uma maior transmissão de carga e uma maior rigidez. Na junta colada, a distribuição de tensões é mais uniforme comparativamente a um fixador mecânico, que requer sempre um furo ou mais. Permite uma maior resistência à fadiga.
- Permite a junção de materiais diferentes tais como metais, plásticos, etc. sendo possível assim ligar materiais com diferentes coeficientes de expansão.
- São permitidas estruturas com contornos mais regulares porque evitam furos.
- A ligação adesiva pode ligar e selar simultaneamente.
- É um processo de fácil automatização.
- Pode servir como isolante elétrico, protegendo o metal mais ativo do menos ativo.
- Caso a ligação seja entre dois metais e haja uma fixação mecânica, existe a hipótese de ocorrer corrosão, o que, com ligação adesiva, não ocorre.
- Serve como amortecimento de vibrações, permitindo assim que as tensões sejam absorvidas, melhorando assim a resistência à fadiga.
- Permite a redução de peso quando comparado com os metais, pois a maioria dos adesivos tem densidades menores quando comparados com os metais, levando assim a uma redução de custos.

As principais desvantagens de uma ligação adesiva são (da Silva, et al., 2007):

- A necessidade de um projeto de ligação com a finalidade de eliminar as forças de arrancamento, clivagem e impacto. Ao mesmo tempo, se as tensões não estiverem perfeitamente perpendiculares ao adesivo, podem surgir forças de arrancamento ou de clivagem.
- Uso de geometrias para evitar tensões localizadas e que garantam uma distribuição uniforme de tensões.
- Limitada resistência a condições extremas, tais como o calor e a humidade, devido à natureza polimérica do adesivo.
- Necessidade de utilizar ferramentas de fixação para manter as peças em posição, pois a ligação não é realizada instantaneamente.

- Geralmente é necessário uma cuidada preparação das superfícies para se obter bons resultados.

2.3.6 Preparação das superfícies

2.3.6.1 Introdução

Uma grande parte dos polímeros usados industrialmente além de apresentarem uma energia de superfície bastante baixa, quimicamente não se encontram no estado puro, podendo apresentar moléculas orientadas, produtos de oxidação, plastificantes, lubrificantes, água adsorvida, contaminantes orgânicos e outros produtos. Estas camadas podem influenciar muito a resistência da junta (Fig 14).

Pó
Agentes desmoldantes
Substâncias de produção que migraram
Camadas orientadas
Polímero base

Fig 14-Possíveis camadas superficiais em polímeros (da Silva, et al., 2007).

As superfícies poliméricas originam regiões muito dinâmicas que estabelecem continuamente novos equilíbrios internos com a parte interior do polímero e externos com o meio ambiente (da Silva, et al., 2007).

Os principais objetivos de uma preparação superficial são:

- Aumentar a energia de superfície com consequente melhoria na molhagem.
- Garantir que a adesão seja tal que o ponto mais fraco da junta seja o adesivo ou o aderente.

Os tratamentos das superfícies dos aderentes realizados antes da aplicação do adesivo, geralmente designados por pré tratamentos, podem passar por uma combinação dos seguintes efeitos:

- **Remoção de material da superfície do aderente.** Este material pode proporcionar uma camada fracamente ligada e afetar a ligação adesiva. As substâncias a eliminar

nos polímeros são pó e outros agentes contaminantes, aditivos, agentes desmoldantes, entre outros. Estes materiais devem ser eliminados com o objetivo de obter uma camada o mais limpa possível (da Silva, et al., 2007).

- **Modificação química da superfície** com o objetivo de aumentar a energia de superfície dos polímeros e a sua componente polar. Para que as forças polares possam operar é necessário que as superfícies do substrato e do adesivo possuam grupos químicos polares. Os grupos polares podem ser introduzidos recorrendo a alguns tratamentos tais como: tratamento por chama, plasma ou descarga de corona (da Silva, et al., 2007).
- **Alteração da topografia da superfície** com o fim de lhe conferir uma determinada rugosidade que permita a respetiva ancoragem do adesivo.

2.3.6.2 Processos passivos químicos

O principal objetivo deste processo é retirar a camada contaminante tais como: pó, aditivos, agentes desmoldantes. Para isso, utilizam-se detergentes e solventes tais como: acetona, álcool e MEK (da Silva, et al., 2007).

2.3.6.3 Processos passivos mecânicos

Este método é bastante efetivo para remover camadas de óxidos e camadas fracas aumentando assim a rugosidade da superfície. É efetuada uma limpeza antes e depois da preparação mecânica. Os substratos devem ser desengordurados antes do tratamento para evitar que os contaminantes sejam esfregados sobre a superfície. As partículas sólidas que ficam à superfície depois do tratamento, devem ser retiradas por ar comprimido ou solvente. Normalmente, nos plásticos são utilizadas lixas finas e médias (da Silva, et al., 2007).

2.3.6.4 Processos ativos químicos

Os polímeros, devido à sua baixa energia de superfície e à sua grande inércia química, constituem um grupo de materiais difíceis de colar. Existe por isso a necessidade de ativar as superfícies destes materiais, com a finalidade de garantir que se estabeleçam ligações fortes com o adesivo. O tratamento químico dos polímeros é geralmente mais difícil comparativamente aos metais pois, dada a sua grande inércia química, será necessário efetuar um ataque muito severo para alterar a natureza dos agrupamentos terminais e tentar obter agrupamentos mais favoráveis à formação de ligações mais fortes. Alguns produtos

químicos utilizados para estes ataques são as soluções de hidróxido de sódio, ácido crómico, ácido dricromato-sulfúrico de sódio, H₂SO₄ concentrado (da Silva, et al., 2007).

2.3.6.5 Processos activos físicos

Para as superfícies poliméricas, os processos mais utilizados são a descarga de corona, o tratamento por chama e o tratamento por plasma.

2.3.6.5.1 Descarga de Corona

É um processo bastante utilizado nas preparações de superfícies poliméricas. Neste tratamento é aplicada uma descarga eléctrica na superfície do material provocando uma ionização das moléculas do gás.

O equipamento, representado na Fig 15, consiste numa combinação de um gerador de alta frequência, um transformador de alta tensão, um eléctrodo fixo e de outro eléctrodo formado geralmente por um rolo cuja camada periférica é formada por um material dieléctrico. A variação a muito alta frequência da tensão gera o efeito de corona, ou seja, o ar compreendido entre os dois eléctrodos é ionizado e torna-se condutor, originando as respectivas descargas de corona. As partículas ionizadas bombardeiam e penetram na estrutura molecular do substrato. São assim criados radicais livres na superfície do filme que reagem rapidamente com o oxigénio para formar grupos químicos polares, que aumentam a energia superficial e favorecem a molhagem.

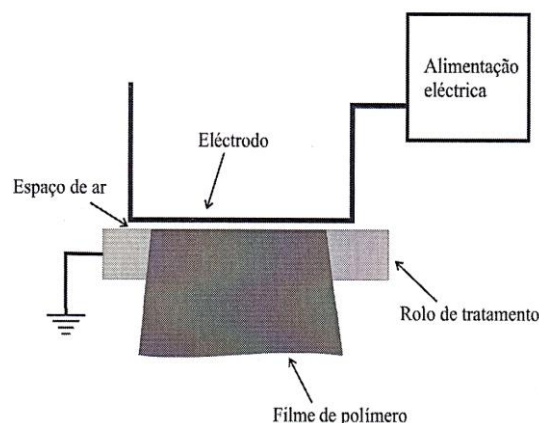


Fig 15-Princípio de funcionamento da descarga de corona (da Silva, et al., 2007).

Este tipo de tratamento é geralmente utilizado na indústria de conversão de filmes plásticos e apresenta alguns problemas tais como a falta de uniformidade e a necessidade de alta voltagem para iniciar a descarga (da Silva, et al., 2007).

2.3.6.5.2 Tratamento por chama

Este processo consiste em expor a superfície do respectivo polímero a uma chama, produto da combustão entre um combustível (metano, propano ou butano) e um elemento oxidante (Ar). O principal objetivo é a oxidação da superfície do polímero a fim de obter complexos favoráveis ao estabelecimento das ligações desejadas. Na combustão as moléculas de oxigénio são dissociadas em átomos de oxigénio livres que bombardeiam a superfície do material introduzindo grupos funcionais que contém oxigénio.

Normalmente os parâmetros de exposição são os seguintes:

A distância superfície-chama varia geralmente entre 6 a 10 mm e o tempo de exposição aproximadamente entre 1 a 2/100 de segundo. No entanto, determinar a distância ótima entre a superfície e a chama e o respectivo tempo de exposição são dois parâmetros críticos.

Este tipo de tratamento pode ser utilizado tanto em filmes plásticos como em materiais mais espessos. Não causa tratamento do outro lado (lado oposto do material) e não provoca micro-furos.

Um dos principais problemas associados a este tipo de tratamento é a alta temperatura da chama, que pode danificar a superfície (da Silva, et al., 2007).

2.3.6.5.3 Tratamento por plasma

Processo no qual a descarga do plasma gera uma nuvem de gás ionizado sem a presença de descargas elétricas visíveis. O nível de voltagem utilizado é inferior ao utilizado na descarga de corona.

É criado por um campo eletromagnético, estando a câmara sob vácuo parcial e pode ser obtido a partir de vários gases. Cada gás produz um plasma distinto, por isso daí resultarão propriedades superficiais diferentes nos polímeros tratados. Os modificadores de superfície podem ir no sentido de uma melhor molhagem ou, pelo contrário, no sentido de uma pior molhagem consoante os gases utilizados. O Oxigénio, o Hélio, o Azoto e o gás carbónico aumentam a energia de superfície dos polímeros, enquanto o CF₄ a diminui.

É um tratamento muito eficaz, usado quando se pretende a máxima resistência. Este tratamento aumenta a adesão bombardeando os substratos com iões dos gases a baixa pressão. Promove a reticulação da superfície dos substratos tornando a superfície mais

resistente, impedindo o arrancamento da camada superficial e introduz grupos reativos que aumentam a reatividade da superfície e a sua molhagem. Aumenta também a difusão interfacial por quebra das cadeias moleculares à superfície.

As superfícies poliméricas tratadas por plasma não são estáveis por longos períodos de tempo e a molhabilidade diminui durante o armazenamento após tratamento.

É o processo mais vantajoso para utilização em grandes séries, pela diversidade dos polímeros tratados e mais vantajoso pela diversidade dos volumes ou superfícies tratadas (da Silva, et al., 2007).

2.4 Materiais dos substratos

2.4.1 Politetrafluoretileno

O politetrafluoretileno (PTFE), pertence ao grupo quimicamente altamente resistente dos fluor termoplásticos. Estas resinas, em função do seu elevado peso molecular, não podem ser processadas por extrusão nem moldagem, por isso estas resinas apenas podem ser processadas por prensagem e sinterização (Ensinger, 2000).

As principais propriedades do PTFE são a sua excepcional resistência a produtos químicos, estabilidade a baixas temperaturas, excelentes propriedades dielétricas mesmo em aplicações sujeitas a altas frequências e baixo coeficiente de atrito (átomo de fluor), levando a que estas possuam muito boas propriedades de deslizamento, elevada resistência a rutura por fadiga e boa resistência aos UV. A temperatura de utilização varia entre - 200° C a 260° C apresentando uma elevada densidade (2,15 g/cm³). Fácil de reciclar pois não necessita de nenhuma reacção química, no entanto neste processo o seu peso molecular é reduzido (Ensinger, 2000).

Estas resinas são relativamente moles e a sua resistência ao desgaste e às deformações é baixa. Esta característica pode ser melhorada pela adição de resinas com fibras inorgânicas ou materiais em partículas. Por sua vez, a resistência ao desgaste pode ser melhorada através da adição de fibras de vidro, carbono, bronze ou óxidos metálicos.

As resinas PTFE possuem um custo elevado e são utilizadas preferencialmente nas tecnologias de processamento de produtos químicos, tecnologia de movimentação de cargas, na indústria elétrica e eletrónica e em tecnologia para a medicina e área alimentar.

É maioritariamente aplicado em anéis de vedação, guias, placas de deslizamento, chumaceiras, vedantes, retentores, revestimentos de cilindros, diafragmas, películas antiaderentes ou peças técnicas específicas.

2.4.2 Polipropileno

O polipropileno (PP) é um polímero do grupo das poliolefinas. A sua cadeia macromolecular é aparentemente desequilibrada uma vez que, em átomos alternados da cadeia principal, aparecem grupos laterais de metilo de grande peso molecular em comparação com átomos de hidrogénio. A temperatura de processamento ronda os 200°C, tornando-o um dos mais acessíveis ao processamento por técnicas tradicionais. Foi produzido pela primeira vez em 1957 (de Moura, et al., 2005). É um termoplástico branco e opaco com cristalinidade em torno de 60 a 70 %, (de Moura, et al., 2005) possuindo densidade de 0,91 g/cm³ e a sua temperatura de utilização varia entre os 0° C e os 100° C. Polímero de fácil reciclagem (Simona, 2008).

De entre as principais propriedades pode destacar-se a elevada resistência química e a solventes, a fácil moldagem e coloração, a elevada resistência à flexão e à fadiga, boa resistência ao impacto acima dos 15°C, boa estabilidade térmica, baixa absorção de humidade, sendo também um bom isolante elétrico e apresenta um baixo custo.

Este polímero, sendo de baixo custo e dadas as suas boas propriedades mecânicas, tem vindo a ser muito utilizado em peças sujeitas a grandes esforços moldadas por injeção. É utilizado em várias indústrias tal como a indústria alimentar, automóvel, farmacêutica e construção civil. Na área automóvel, pode encontrar-se o PP em peças tais como: para-choques e diversas peças do habitáculo. Pode-se também encontrar-se em carcaças para eletrodomésticos, material hospitalar esterizável, brinquedos, assim como na construção de instalações e aparelhos e sistemas de distribuição de água fria (Simona, 2008).

2.4.3 Policloreto de vinilo

O policloreto de vinilo, mais conhecido por PVC, é o único material plástico que não é 100% originário do petróleo. O PVC é um termoplástico obtido através de uma combinação de Etileno (43%), sendo que este é um derivado do petróleo, e Cloro (57%), derivado do cloreto de sódio, vulgarmente designado “sal de cozinha”. As principais propriedades do PVC são a sua leveza, que facilita o seu manuseamento e aplicação, grande resistência ao impacto, resistência à ação de fungos, elevada resistência a produtos

químicos orgânicos e inorgânicos, bom isolante térmico, elétrico e acústico, possui boa resistência às intempéries (ex: Sol e chuva) e estabilidade aos UV, possui vida útil bastante elevada, auto-extinguível e reciclável. Possui uma densidade de 1.5 g/cm³ e uma temperatura de utilização que pode variar entre os - 40° C e os 95° C (Simona, 2008).

Os principais campos de aplicação são a construção de aparelhos e recipientes para a indústria química/farmacêutica, construção de máquinas, no setor da construção civil para o fabrico de portas e janelas, calhas, revestimentos de piscinas, tubos e conexões. O PVC é também utilizado em embalagens para acondicionar alimentos, brinquedos e artigos insufláveis, garrafas para água, móveis de jardim, entre outros (Simona, 2008).

2.5 Previsão de resistência em juntas adesivas

2.5.1 Métodos analíticos

A utilização de métodos analíticos na análise de juntas adesivas tem como principal vantagem a rapidez na análise. O modo mais simples para obter as tensões numa JSS baseia-se na suposição de que os substratos são rígidos e o adesivo se deforma apenas em corte. No entanto, Volkersen (Volkersen, 1938) introduziu na análise o que se designa por “deformação diferencial”. Assim, se os substratos forem elásticos e houver continuidade na interface adesivo/substrato, os paralelogramas mostrados na junta não solicitada ficam distorcidos. A tensão de corte é máxima nas extremidades da junta e mínima no meio (Fig 16).

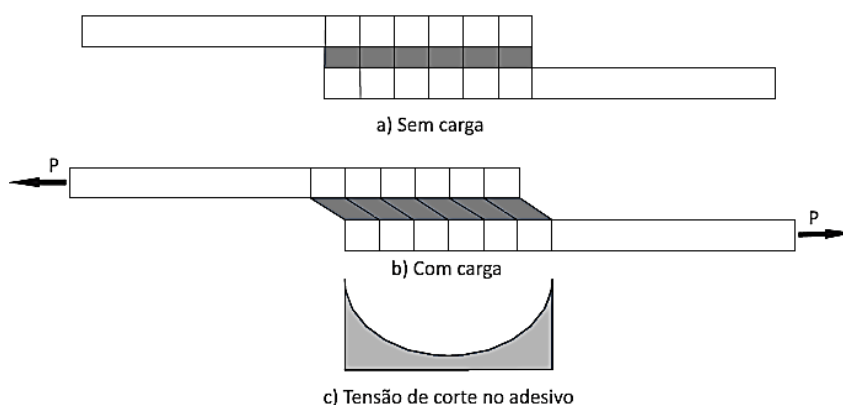


Fig 16-Análise de Volkersen (da Silva, et al., 2007).

Goland e Reissner (Goland M e Reissner, 1944) foram os primeiros a considerar o efeito da rotação da junta, em que os substratos fletem e a direção da linha de carregamento se altera devido à rotação da junta (Fig 17). Os deslocamentos deixam de ser proporcionais à força aplicada e passa a não se verificar uma linearidade geométrica. Para além de obterem tensões de corte semelhantes aos de Volkersen, (Volkersen, 1965) também obtiveram as tensões transversais de arrancamento no adesivo.

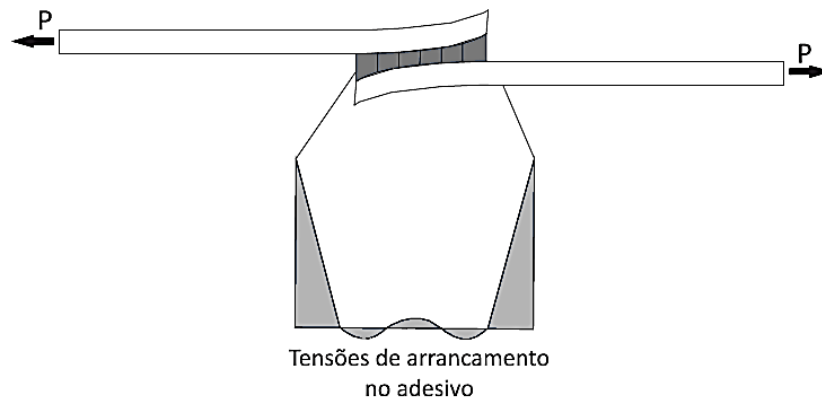


Fig 17-Tensões de arrancamento numa junta de sobreposição simples (da Silva, et al., 2007).

Harth Smith (Hart-Smith, 1973) desenvolveu os dois modelos anteriores, o de Volkersen e o de Goland e Reissner, tendo em conta o comportamento plástico do adesivo. Harth-Smith propôs um modelo analítico simples ao considerar que a camada adesiva tem um comportamento elasto-plástico perfeito. A partir dessas considerações conseguiu demonstrar que a carga máxima que uma junta colada pode transferir depende da energia de deformação de corte da camada adesiva, independentemente da curva tensão deformação. Esta abordagem permite uma melhor previsão do comportamento mecânico de camadas adesivas dúcteis.

Oplinger, (Oplinger, 1994) por sua vez, adicionou o efeito de grande deformação geométrica na zona de sobreposição ao modelo de Harth-Smith.

Then, Tsai e Al (Tsai, et al., 1998) mostraram que a solução fornecida por Oplinger apenas é válida se considerarmos adesivos finos e flexíveis.

Considerando as variações lineares no arrancamento e tensões de corte através da camada adesiva, Gilibert e Rigolot (Gilibert Y e Rigolot, 1979) desenvolveram uma teoria elástica obtendo resultados com base numa formulação analítica do campo de tensão sobre a totalidade da sobreposição, por utilização do método de expansão assintótica na vizinhança das extremidades do conjunto. Esta formulação constitui uma melhoria na

modelação do campo de tensões perto das juntas finais, no entanto, não é válida junto das extremidades livres da sobreposição (Esteves J.L e Aivazzadeh, 1996).

Ojalvo e Edinoff (Ojalvo, et al., 1978) foram os primeiros a considerar a existência de um gradiente de tensões na camada do adesivo, admitindo distribuições lineares de arrancamento e tensões de corte através da espessura da camada do adesivo.

Tong (Tong L e Steven, 1999) desenvolveu uma formulação para tensões de corte e de arrancamento para juntas adesivas, na qual conseguiu mostrar que as cargas de rotura previstas pelo modelo não linear estavam de acordo com as cargas de rotura medidas, enquanto as fornecidas pelo modelo linear foram apenas cerca de metade das cargas de rotura medidas.

2.5.2 Métodos numéricos

Uma das ferramentas mais utilizadas na análise de juntas adesivas é o método de elementos finitos. Esta análise permite calcular o deslocamento em cada nó da estrutura em função da força aplicada e as componentes de tensão e deformação de qualquer elemento para uma determinada força ou deslocamento. Permite ainda estudar qualquer geometria, o que inclui possíveis variações na forma dos substratos ou filetes de adesivo, e permite fazer uma análise linear e não linear tanto em material como em geometria.

É fundamental uma previsão antecipada da resistência das juntas adesivas para diminuir o número de testes e/ou experiências. Para prever a resistência das juntas existem alguns tipos de critérios a utilizar em conjunto com o MEF, como aqueles englobados na “*mecânica dos meios contínuos*”, na “*mecânica da fratura*” e na “*mecânica do dano*”.

2.5.2.1 Mecânica dos meios contínuos

Nesta abordagem, o adesivo e o substrato são modelados usando elementos contínuos e assume-se que o adesivo se encontra completamente ligado ao substrato. Na mecânica dos meios contínuos, o valor máximo de tensão previsto pela análise dos elementos finitos é normalmente usado no critério de rotura. Inicialmente, as tensões principais máximas foram propostas para materiais muito frágeis cujo modo de rotura é perpendicular à direção da tensão máxima principal. Ao estabelecer os modos de rotura em juntas de sobreposição coladas com adesivos frágeis, Adams, et al. (1997) usou este critério para prever com sucesso a resistência das juntas. Todavia, (Bogy, 1968) mostrou que uma transição entre dois materiais em quina viva apresenta uma distribuição singular. Existe sempre uma

singularidade nas extremidades das juntas adesivas e o valor da tensão junto ao ponto da singularidade depende do refinamento da malha utilizada. Uma possibilidade é remover as singularidades através do arredondamento do aderente ou do adesivo (Adams R.D e Harris, 1987) o que facilita a aplicação de um critério limite de tensão. Estes autores demonstraram que a força de uma junta de sobreposição simples com aderentes com cantos arredondados e com um adesivo endurecido aumenta consideravelmente quando comparada com as juntas de aderentes em quina viva. von Mises propôs um critério em que o material sob uma tensão multi-axial, e quando a sua energia de distorção atinge um valor crítico, que é:

$$\sigma_{VM}^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \quad \text{Equação 10}$$

Quando σ_i ($i=1,2,3$) que são as principais tensões. As tensões de corte foram extensivamente usadas para prever a resistência das juntas LS. John et al. (1991) usou as tensões de corte juntamente com uma distância crítica para prever a resistência das juntas de sobreposição dupla (John, et al., 1991). Quando são utilizados adesivos dúcteis os critérios baseados em tensões não são aconselháveis porque as juntas podem ainda suportar grandes cargas após o início da cedência do adesivo. Para este tipo de adesivo, Adams et al. (1984) usaram a tensão máxima principal como critério de rotura para prever a resistência da junta, critério que também foi usado para o modo de rotura. É importante reter que os critérios acima referidos são apenas aplicáveis a estruturas contínuas e deparam-se com dificuldades quando os defeitos ocorrem quando mais do que um material está presente na estrutura, uma vez que as tensões não estão bem definidas nos pontos singulares. Como resultado, novos critérios ou versões modificadas dos anteriores precisam de ser desenvolvidos.

2.5.2.2 Mecânica da fratura

A mecânica dos meios contínuos assume que a estrutura e o seu material são contínuos. A mecânica da fratura assume que a estrutura da junta não é um meio contínuo podendo conter defeitos provocados quer pelo método de fabrico quer pelo seu real funcionamento. Esta teoria visa então compreender se os defeitos existentes na estrutura do material levam a uma rotura catastrófica do mesmo ou se durante o período de vida útil da estrutura as suas dimensões se mantêm inferiores às críticas. Nesta teoria não é feita uma análise local

ao valor do pico de tensões mas avalia se as condições na estrutura são suscetíveis de induzir a rotura. A abordagem da mecânica da fratura foi sucessivamente aplicada em vários problemas de Engenharia nos últimos anos. Muitos estudos com juntas adesivas usam a taxa de libertação de energia, G , e o respetivo valor crítico, G^c (Sept J.K e Fernlund, 1991). Todavia a rotura da junta adesiva ocorre em modo misto devido à variação de propriedades entre os diferentes materiais e também devido ao complexo sistema de tensões. Para ajustar os resultados experimentais foram propostas várias funções matemáticas de superfície, tal como o critério 3D (Dillard, et al., 2009):

$$\left(\frac{G_n}{G_n^c}\right)^\alpha + \left(\frac{G_s}{G_s^c}\right)^\beta + \left(\frac{G_t}{G_t^c}\right)^\gamma = 1 \quad \text{Equação 11}$$

Com G_n , G_s e G_t , são os valores de G sob tensão pura, corte e modos de rotura, respetivamente e G_n^c , G_s^c e G_t^c , respetivos valores de G^c . Os critérios de energia linear ($\alpha=\beta=\gamma=1$) e o quadrático ($\alpha=\beta=\gamma=2$) são o mais usado. Para os critérios de rotura foram também propostos novas formas (Hashemi, et al., 1989) (kinloch, 1987)). Em todos os casos, a superfície de rotura pode ser efetuada para coincidir com os resultados experimentais, ao incluir constantes adicionais.

O uso generalizado de um fator de intensidade de tensão análogo ao fator de intensidade de tensão na mecânica de fratura clássica para prever o início da rotura para juntas adesivas nos cantos de interface também foram estudados (Xu, et al., 1999). Groth (1988) assumiu que o início da rotura ocorre quando o fator de intensidade de tensão atinge o seu valor crítico, inicialmente ajustado experimentalmente. Gleich et al. (2001) realizou um estudo semelhante ao calcular a resistência das singularidades para uma gama de valores t_A . Estas abordagens funcionam bem para as juntas que são usadas para determinar o fator de intensidade de tensão crítico.

Um outro parâmetro alternativo usado na Mecânica da fratura é o integral J , proposto por (Rice J.R e Rosengren, 1968). Este é um integral de contorno deduzido para um comportamento não-linear elástico do material e evita as dificuldades inerentes à caracterização do estado de tensão na extremidade da fenda. É dado por:

$$J = \int_c W dx_2 - T_j \frac{\partial u_j}{\partial x_1} dS. \quad \text{Equação 12}$$

Sendo W a densidade de energia de deformação em pontos do contorno, T_j o vetor de tração no contorno, u o vetor deslocamento e dS o elemento infinitesimal de contorno. Para

materiais com comportamento linear elástico a definição J coincide com G , logo J é uma extensão do conceito de G ao comportamento não linear elástico.

2.5.2.3 Mecânica do dano

Este tipo de critério possibilita a análise completa de estruturas até ao ponto final da sua rotura. A mecânica do dano permite a simulação do dano e da rotura passo a passo num caminho pré definido da rotura ou arbitrariamente dentro de uma região finita até se atingir a rotura completa da estrutura (Duan, et al., 2004). Todavia, este é ainda um campo inovador em constante desenvolvimento, no que respeita a técnicas de modelação mais precisas, 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 distinguir-se em abordagens locais ou contínuas. Na abordagem local, o dano está confinado a uma linha de volume zero ou a uma superfície, permitindo a simulação de uma rotura interfacial entre materiais, e entre a ligação adesiva e o aderente (Yang, et al., 2001). Na abordagem contínua, o dano é modelado sobre uma região finita, contendo elementos finitos sólidos para modelação dos substratos (Song, et al., 2006), ou ao longo de uma ligação adesiva para modelar a rotura coesiva da ligação adesiva (Kafkalidis, et al., 2002).

A utilização de modelos de Dano coesivos (MDC) acoplado à análise por elementos finitos convencionais é o método mais comum para prever o dano por fadiga ocorrido em estruturas (Tvergaard V e Hutchinson, 1992), (Campilho, et al., 2005). As camadas finas de adesivo para união de membros estruturais são um grande campo de aplicação dos MDC (Campilho, et al., 2005) (Tvergaard V e Hutchinson, 1992) considerando a abordagem contínua. Porém, 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 (de Magalhães, et al., 2005), proporcionando um comportamento equivalente da ligação.

2.5.2.3.1 Modelo de dano coesivo

O conceito de zona coesiva foi proposto por Barenblatt,(1962) e Dugdale,(1960) para descrever o dano sob carga estática na zona coesiva à frente da ponta da fenda. Os MDC foram amplamente refinados e testados desde então para simular o início da propagação da fenda em zonas coesivas e em problemas de roturas interfaciais. Uma característica

importante dos MDC é que podem ser facilmente incorporados em *Softwares* de elementos finitos convencionais para modelar a propagação do dano em vários materiais, incluindo juntas adesivas (Ji, et al., 2010). Os MDC baseiam-se no pressuposto que uma ou várias interfaces de fratura podem ser artificialmente introduzidas nas estruturas e onde o crescimento dos danos é conseguido pela introdução de uma possível descontinuidade no campo de deslocamento. A técnica consiste no estabelecimento de leis de tração-separação (leis coesivas) para modelar interfaces ou regiões finitas.

As leis dos MDC são estabelecidas entre nós homólogos de elementos coesivos, podendo ser usadas para ligar os nós de elementos sobrepostos representando diferentes materiais, para simular uma interface de espessura nula (Fig 18); (Pardoen, et al., 2005), ou ser aplicadas diretamente entre dois materiais que não estão em contacto para simular uma camada de espessura fina entre eles ou para simular uma ligação adesiva (Fig 19); (Xie D e Waas, 2006).

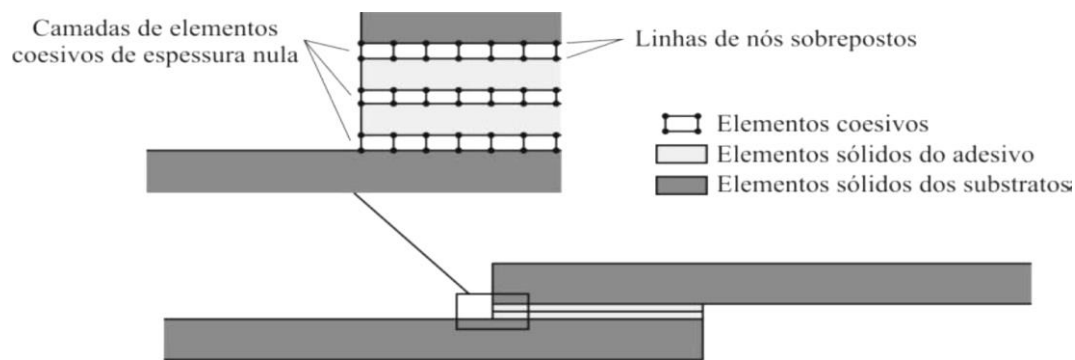


Fig 18-Elementos coesivos para simular o crescimento do dano em ligações adesivas por uma abordagem local (da Silva, et al., 2012).

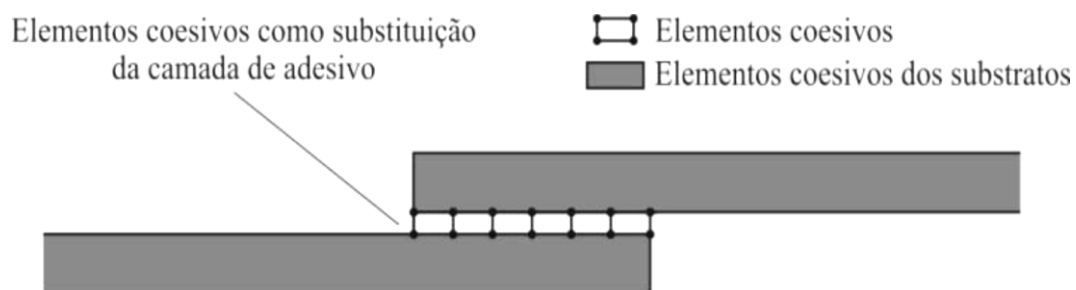


Fig 19-Abordagem contínua numa ligação adesiva (da Silva, et al., 2012).

Alguns trabalhos usam a abordagem local (Campilho, et al., 2005). Com esta metodologia, as dissipações plásticas na junta adesiva são simuladas pelos elementos finitos sólidos,

ficando a utilização dos elementos coesivos restrita à simulação do crescimento do dano (Fig 18). As leis coesivas apresentam geralmente uma rigidez inicial extremamente elevada, para não alterar a rigidez global da estrutura. A colocação dos elementos coesivos, em diferentes planos de crescimento na direção transversal das ligações adesivas, também é viável (Campilho, et al., 2005). Na abordagem local e para a simulação das ligações adesivas, o adesivo é modelado como um material elasto-plástico contínuo por elementos finitos sólidos (Pardoen, et al., 2005). A “energia de rotura intrínseca” é considerada pelas leis coesivas em vez do valor crítico da resistência à rotura G^c , devido à dissipação de energia necessária para criar uma nova superfície, ocorrendo a dissipação plástica dos materiais dúcteis nos elementos sólidos representativos da ligação adesiva (Liljedahl, et al., 2006). Assim, G^c é a soma destas duas componentes de energia, aumentando pela inclusão da dissipação plástica dos materiais no modelo. Sob estes pressupostos, o crescimento do dano é governado pelo trabalho da separação das superfícies de fratura em vez do 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 na abordagem local.

Os MDC também têm sido utilizados para simular o comportamento de ligações por uma abordagem continua (Fig 19), através da substituição de toda a ligação adesiva por uma única linha de elementos coesivos com um comportamento representativo da ligação adesiva (Kafkalidis, et al., 2002), (Campilho, et al., 2008a). A rigidez inicial dos elementos coesivos, ao contrário da abordagem local, representa a rigidez da ligação adesiva em cada um dos modos de carregamento. Devido à simplicidade desta abordagem, tem sido amplamente utilizada na simulação do crescimento do dano em juntas adesivas, fornecendo resultados precisos.

De um modo geral, os MDC baseiam-se numa relação entre as tensões e os deslocamentos relativos (tração ou corte) entre os nós homólogos dos elementos coesivos, para simular o comportamento elástico até a resistência máxima (t_n^0 em tração ou t_s^0 em corte) e o amaciamento subsequente que permite reproduzir a degradação gradual das propriedades dos materiais até à rotura final.

3 Trabalho experimental

3.1 Introdução

Neste trabalho são utilizados três tipos de substratos: PTFE, PP e PVC, sendo os dois primeiros particularmente difíceis de colar devido à sua baixa energia de superfície. O adesivo utilizado é o adesivo da Tamarron Tehcnology -“Tam Tech Adhesive”, próprio para materiais poliméricos de difícil colagem sem grandes preparações de superfície. No subcapítulo 3.3 será dada uma breve explicação da razão da escolha deste adesivo.

Neste capítulo vamos efetuar provetes Bulk dos substratos utilizados para retirar os módulos de elasticidade dos mesmos e as suas propriedades de resistência. Vamos também caracterizar o adesivo utilizado nas colagens efetuando provetes de adesivo maciço (provetes Bulk) para assim obter as suas principais propriedades, o módulo de elasticidade, a tensão limite elástica e a tensão máxima. Efetuamos também JSS-LS e BS dos substratos referidos utilizando o mesmo adesivo da Tamarron com o objetivo de avaliar a resistência mecânica e o tipo de rotura.

3.2 Substratos

Foram fabricados 3 provetes de cada tipo de material utilizado. Estes foram cortados utilizando uma serra mecânica de corte existente na empresa SOVE, S.A. (Fig 20) a partir de placas com 6 mm de espessura. As dimensões finais dos provetes utilizados nos ensaios de tração estão representadas na Fig 21. Na Fig 22 pode-se visualizar os substratos cortados nas dimensões finais, aptos à realização do ensaio de tração.

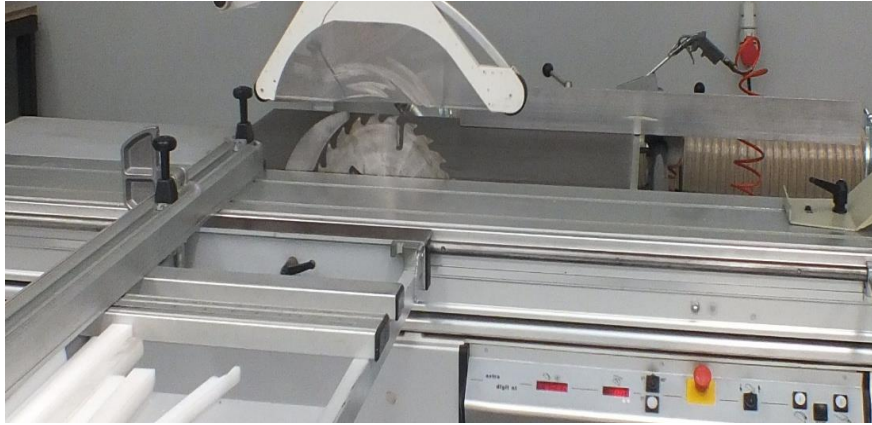


Fig 20-Serra mecânica de corte (esquadrejadeira).

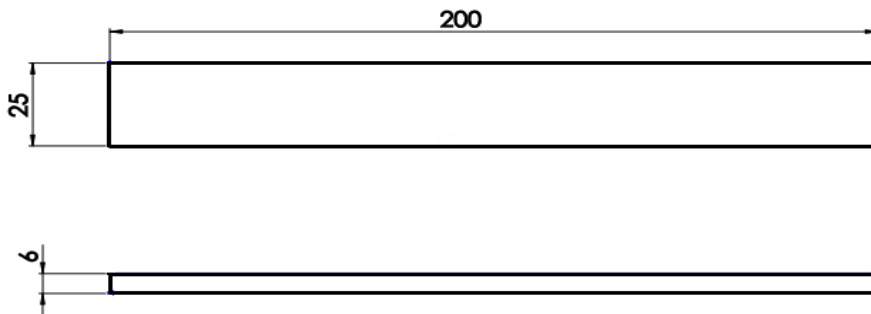


Fig 21-Dimensões dos provetes Bulk utilizados.



Fig 22-Substratos utilizados cortados (Bulk).

As propriedades dos materiais utilizados são apresentadas em anexo. Na Tabela 5 apresentam-se apenas algumas propriedades mecânicas. É de salientar que os valores apresentados na ficha técnica podem variar de lote para lote.

Tabela 5-Principais propriedades mecânicas (fornecidas pelo fabricante).

Propriedades	PTFE	PP	PVC
Tensão limite elástica σ_y [MPa]	-	33	60
Tensão de rotura σ_r [MPa]	20-40	--	--
Módulo de elasticidade E [MPa]	750	1700	2500
Deformação máxima à tração $\epsilon_{t\max}$ (%)	250/500	--	--

3.2.1 Condições de ensaio à tração

Dado que a resistência de uma junta depende também dos substratos utilizados decidiu-se determinar experimentalmente algumas propriedades mecânicas destes materiais. Assim, foram realizados ensaios de tração segundo a norma ISO 527-3 (ISO 527-3, 2003) destes provetes Bulk, à temperatura ambiente, utilizando uma máquina de ensaios de tração disponível no Laboratório de ensaios Mecânicos do ISEP, Shimadzu AGX (Fig 23). Foram utilizadas duas velocidades de ensaio. No início, 1 mm/min com o objetivo de retirar o módulo de elasticidade, utilizando neste caso um extensómetro com um comprimento inicial de 50 mm. Após retirarmos o extensómetro utilizamos uma velocidade de 50 mm/min com a finalidade de obter as propriedades de resistência. A célula de carga utilizada foi de 100 kN e a distância entre maxilas de 130 mm.



Fig 23-Máquina de ensaios mecânicos Shimadzu.

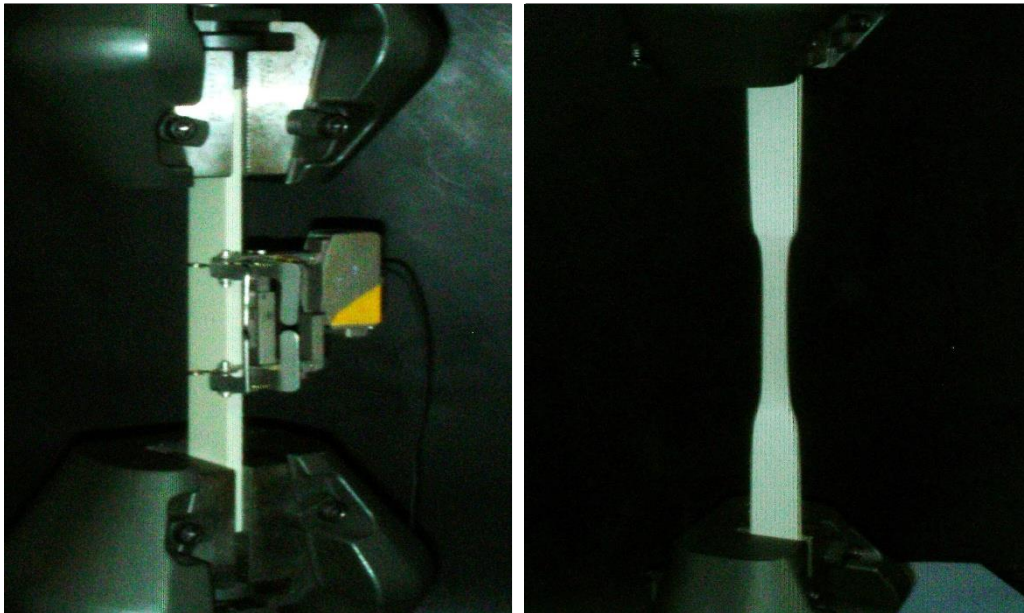


Fig 24-Provete PP com e sem extensómetro.

Na Fig 24 apresenta-se um provete de PP com e sem extensómetro. Na Fig 25 observa-se o tipo de rotura e alongamento sofrido pelos provetes Bulk após ensaio de tração. Os provetes de PTFE são capazes de suportar uma grande deformação plástica sem fraturar. O PP também possui uma boa ductibilidade, mas inferior ao do PTFE. Dos três materiais, o PVC é aquele que possui o maior módulo de elasticidade e o que possui a menor deformação máxima de tração sendo, assim, o material com maior rigidez mas menor ductibilidade.



Fig 25-Provete Bulk de substratos após ensaio de tração.

3.2.2 Resultados experimentais

O módulo de elasticidade foi obtido através da seguinte expressão:

$$E = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon \quad \text{Equação 13}$$

Em que $\Delta\sigma$, corresponde à diferença de tensão aplicada entres os pontos 0,0005 mm/mm e 0,0025 mm/mm; $\Delta\varepsilon$ corresponde à diferença de deformação entre os pontos 500 $\mu\varepsilon$ e 2500 $\mu\varepsilon$, com um valor nominal de 2000 $\mu\varepsilon$.

A tensão limite elástico foi obtida pelo quociente entre a força correspondente ao primeiro pico da curva $P-\delta$ e área inicial da seção transversal inicial do provete.

A tensão máxima foi obtida através do quociente entre a carga máxima obtida no ensaio e a área inicial da seção transversal do provete, dada pela seguinte expressão:

$$\sigma_{\text{máx}} = F_{\text{máx}} / A_0 \quad \text{Equação 14}$$

A deformação máxima à tração foi obtida através do quociente entre a deformação máxima e a distância inicial entre maxilas multiplicado por 100, dada pela expressão:

$$\varepsilon t_{\text{máx}} = \frac{\delta_{\text{máx}}}{L_m} \times 100 \quad \text{Equação 15}$$

De seguida apresentam-se as curvas tensão-deformação considerando apenas a parte inicial da zona elástica (Fig 26) e força-deslocamento (Fig 27) para os três materiais utilizados. As curvas apresentadas serviram para retirar o módulo de elasticidade e as propriedades de resistência. A primeira parte das curvas apresentadas foi utilizada para obter o módulo de elasticidade e para tal utilizou-se uma velocidade de 1mm/min (Fig 26). Após retirar o extensómetro utilizou-se uma velocidade de 50 mm/min para determinar as restantes propriedades de resistência (Fig 27).

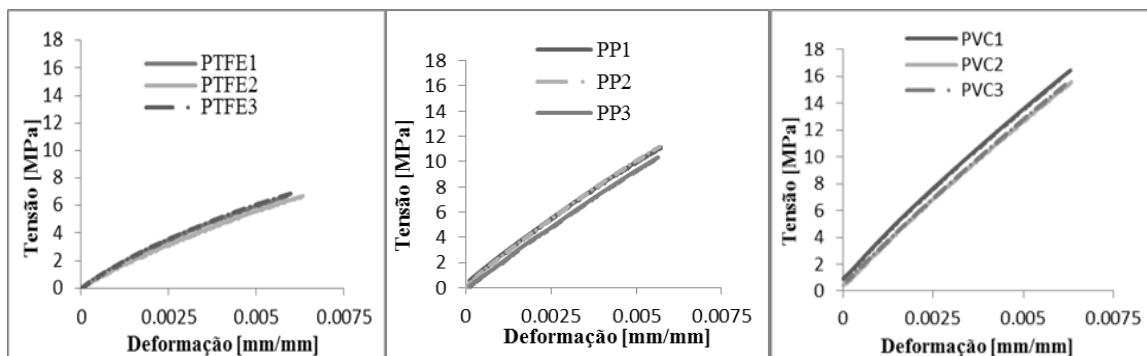


Fig 26-Curvas tensão-deformação obtidas no ensaio de tração para PTFE, PP e PVC ($v=1$ mm/min).

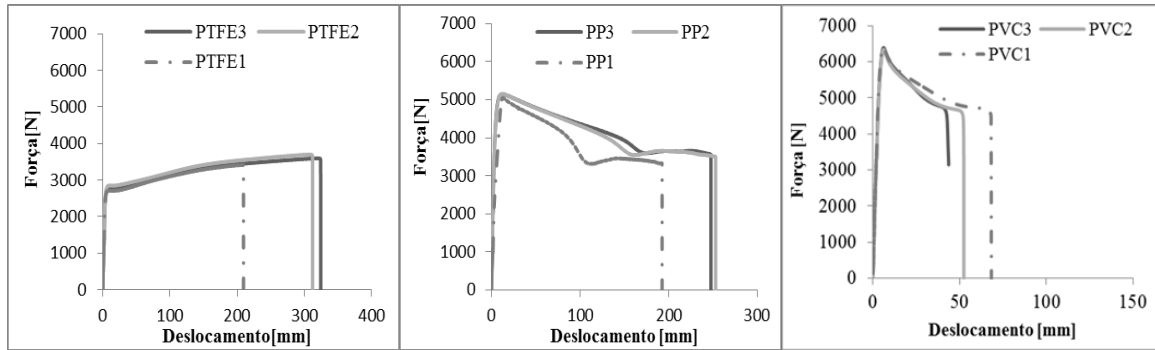


Fig 27-Curvas força-deslocamento obtidas no ensaio de tração para PTFE, PP e PVC (v=50 mm/min).

A Tabela 6, apresenta os valores da tensão limite elástica para o PP e o PVC, a tensão de rotura para o PTFE, o módulo de elasticidade e a extensão máxima à tração para os três materiais testados. Ao comparar os valores teóricos presentes na Tabela 5 com os valores experimentais observados na Tabela 6 é possível verificar que os valores obtidos para a tensão limite elástica com o substrato PP correspondem ao esperado, apenas o módulo de elasticidade experimental deu um valor superior ao teórico. Nos substratos de PVC os valores de tensão limite elástico diferem, sendo que o valor teórico é superior ao experimental. Neste caso, o módulo de elasticidade experimental obtido é ligeiramente superior ao teórico. Para o substrato de PTFE, o valor de tensão máxima está dentro do esperado e o valor do módulo de elasticidade experimental é superior ao teórico. Neste substrato o valor experimental para a deformação máxima à tração é inferior ao valor teórico.

Tabela 6-Propriedades mecânicas de PTFE, PP e PVC, valores experimentais.

	PTFE			PP			PVC		
	$\sigma_{máx}$ [MPa]	E [MPa]	$\epsilon t_{máx}$ (%)	σ_y [MPa]	E [MPa]	$\epsilon t_{máx}$ (%)	σ_y [MPa]	E [MPa]	$\epsilon t_{máx}$ (%)
Média	23,76	1289,1	216,4	34,11	2012,01	177,6	42,54	2605,12	42,05
Desvio padrão	0,95	81,79	49,07	0,36	56,2	26,05	0,26	71,61	9,05

O valor de σ_y para o substrato de PTFE é de 18,17 MPa.

3.3 Adesivo

Utilizou-se um adesivo da Tamarron - “ Tam Tech Adhesive” fornecido em cartuchos de 35 ml, conforme está representado na Fig 28. Este adesivo foi utilizado pois uma das suas principais características é a excelente capacidade de adesão em superfícies poliméricas sem grandes preparações de superfície incluindo o PTFE. Para a escolha acertada do adesivo foi necessário efetuar um estudo prévio de adesivos de diversos fabricantes tais como Loctite, Araldite, 3M. Todos estes fabricantes possuem adesivos com boa adesão em superfícies poliméricas, mas geralmente não fazem referência à capacidade em colar PTFE.



Fig 28-Adesivo utilizado com misturador mais pistola.

3.3.1 Fabrico de provetes maciços

Para o fabrico dos provetes de adesivo foi utilizado um molde em aço CK 45 conforme é possível observar na Fig 29. Este é constituído por duas placas exteriores que irão fazer o fecho do molde, uma placa central que servirá para separar internamente os provetes e na qual se vai colocar o adesivo. Este molde está preparado para realizar seis provetes.

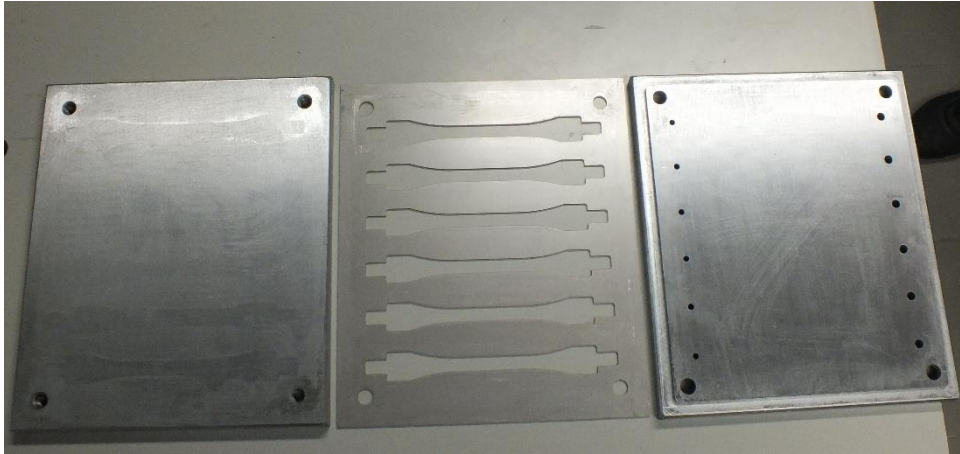


Fig 29-Molde para fabricação de provetes de adesivo.

A espessura da placa central é de 2 mm e as 6 cavidades possuem a geometria e dimensões pretendidas para os provetes e que se encontram na Fig 30.

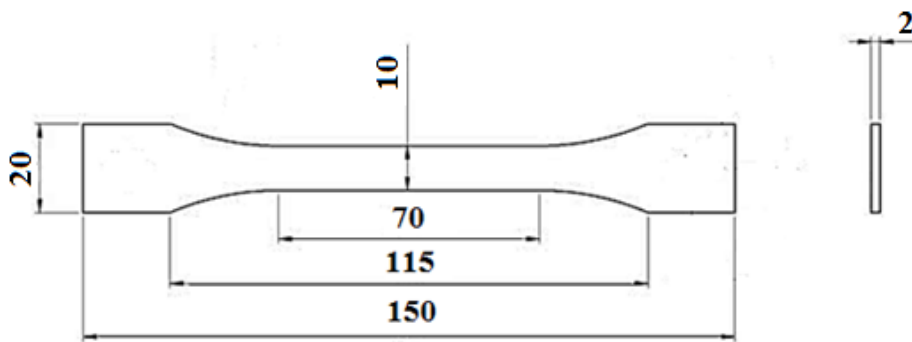


Fig 30-Geometria e dimensões dos provetes de adesivo utilizados no ensaio de tração.

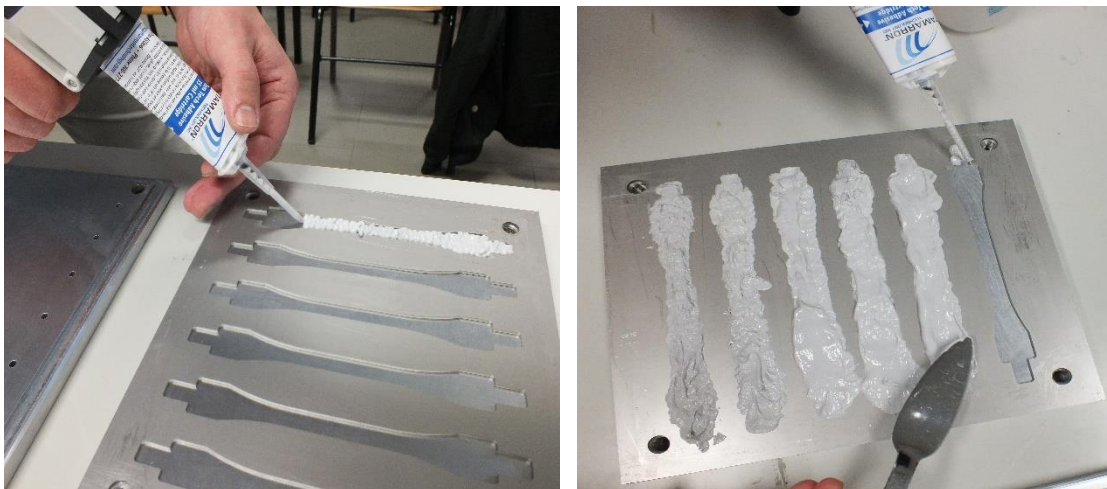


Fig 31-Enchimento do molde com adesivo.

As placas do molde metálico cujas superfícies estejam em contacto com o adesivo têm que ser preparadas com o objetivo de garantir uma boa qualidade superficial do provete de adesivo, retirando assim as partículas contaminantes existentes nas superfícies. Esta limpeza foi efetuada utilizando acetona. Seguidamente foi aplicado um desmoldante com o objetivo de facilitar a remoção dos provetes após a cura do adesivo.

A placa inferior é colocada em posição e depois alinha-se a placa central por cima da anterior (placa inferior). Aplica-se o cordão de adesivo conforme se assinala na Fig 31 em sistema tipo alternado para o melhor preenchimento da cavidade. Um dos principais problemas com que nos deparamos foi a cura bastante rápida deste adesivo, o que reduziu em larga escala o tempo de manuseamento. Com a ajuda de uma espátula conseguimos preencher todas as cavidades do molde a fim de evitar as bolhas de ar no provete. Após o preenchimento do molde estar terminado, colocou-se a placa superior que faz o fecho do molde fixando-a à placa inferior por intermédio de 4 parafusos que servem para efetuar assim a devida compressão. Conforme é possível observar na Fig 32 este molde possui uma série de orifícios através dos quais sai o excesso de adesivo. A cura do adesivo decorre à temperatura ambiente e os ensaios dos provetes foram realizados uma semana após o fabrico dos provetes.

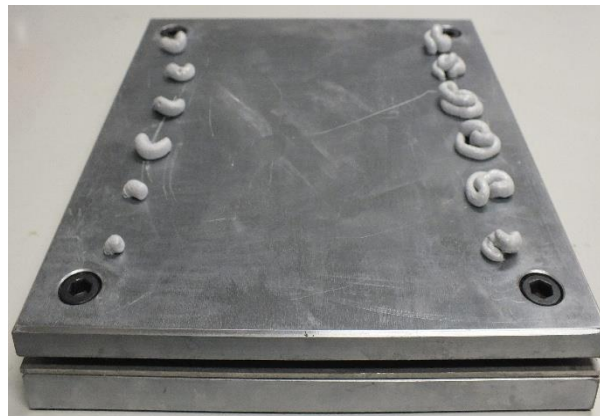


Fig 32-Molde fechado com provetes de adesivo em cura.

Após a cura do adesivo estar completa, efetuamos cuidadosamente a abertura do molde e retiraram-se os provetes que se encontravam a preencher as cavidades da placa central. O principal problema que poderia ocorrer nesta etapa seria a quebra de algum provete de adesivo caso houvesse algum movimento brusco. Seguidamente e com muito cuidado retirou-se o excesso de adesivo que existia nos mesmos provetes, obtendo-se deste modo os provetes finais para efetuar os respetivos ensaios de tração (Fig 33).



Fig 33-Provetes de adesivo para ensaios de tração.

3.3.2 Condições de ensaio à tração

Foram realizados ensaios de tração destes provetes segundo a norma ISO 527-3 (ISO 527-3, 2003) à velocidade de 1 mm/min e a 4 mm/min. Estes ensaios foram realizados à temperatura ambiente no Laboratório de ensaios mecânicos do ISEP utilizando uma máquina de ensaios de tração Shimadzu AG X equipada com uma célula de carga de 100 kN (Fig 23). A distância inicial entre maxilas foi de 115 mm e para a medição do alongamento do provete utilizou-se o extensômetro ótico TRViewx 500 D da Shimadzu (Fig 34).

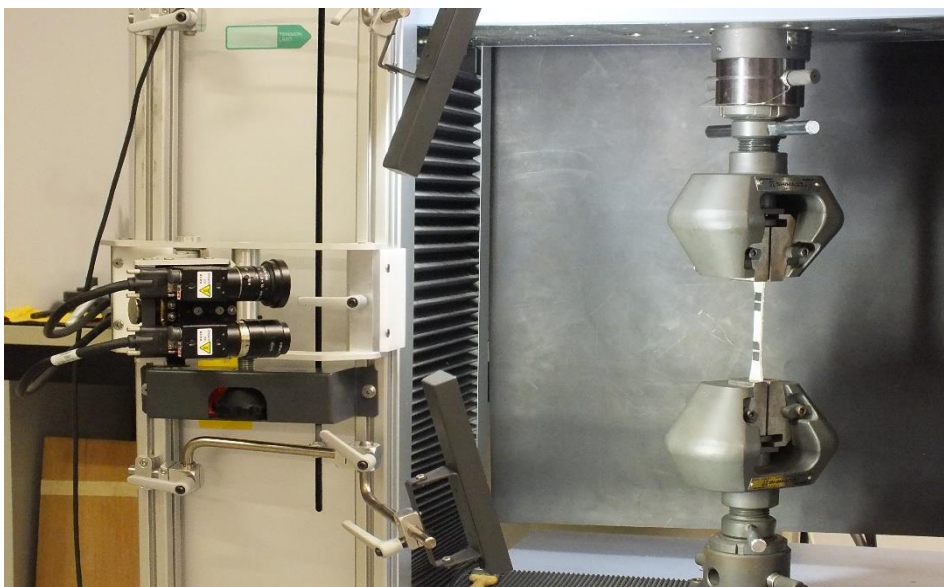


Fig 34-Provete de adesivo fixo nas amarras com extensômetro ótico.

Para o extensómetro ótico, constituído por duas câmaras de vídeo, registar o alongamento longitudinal do provete necessita de duas etiquetas coladas no corpo do provete como mostra a Fig 35. O extensómetro também avalia o deslocamento transversal através do sensor de largura (retângulo situado entre as etiquetas apresentadas na Fig 35). A distância entre as marcas brancas das etiquetas define o comprimento inicial do extensómetro (L_c). Esta distância é avaliada pelo extensómetro ótico e foi de aproximadamente 50 mm.

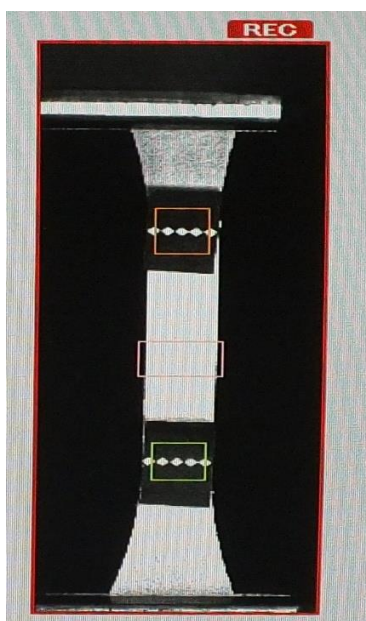


Fig 35-Provete durante o ensaio com gravação de vídeo.

Durante os ensaios de tração dos provetes de adesivo foi possível realizar gravação de vídeo dos respetivos ensaios. A vantagem de se utilizar o extensómetro ótico reside no fato de não estar em contacto com o adesivo e assim não condiciona a obtenção das propriedades do mesmo (da Silva, et al., 2007). Na Fig 36 podemos verificar que a rotura de todos os provetes foi obtida na zona útil do corpo do provete.

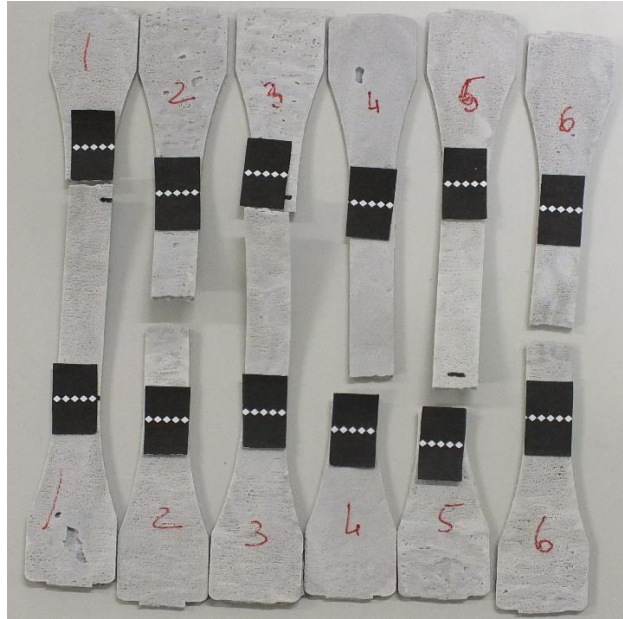


Fig 36-Provetes Bulk de adesivo após ensaios de tração.

Na Fig 37 podemos visualizar o painel do *Software* Trapezium que controla a máquina de ensaios e o extensómetro ótico. Podemos ver a curva força-deslocamento, o deslocamento do extensómetro, o sensor de largura assim como a imagem do provete em ensaio, onde se pode visualizar as marcas colocadas que servem para marcar o comprimento do extensómetro.

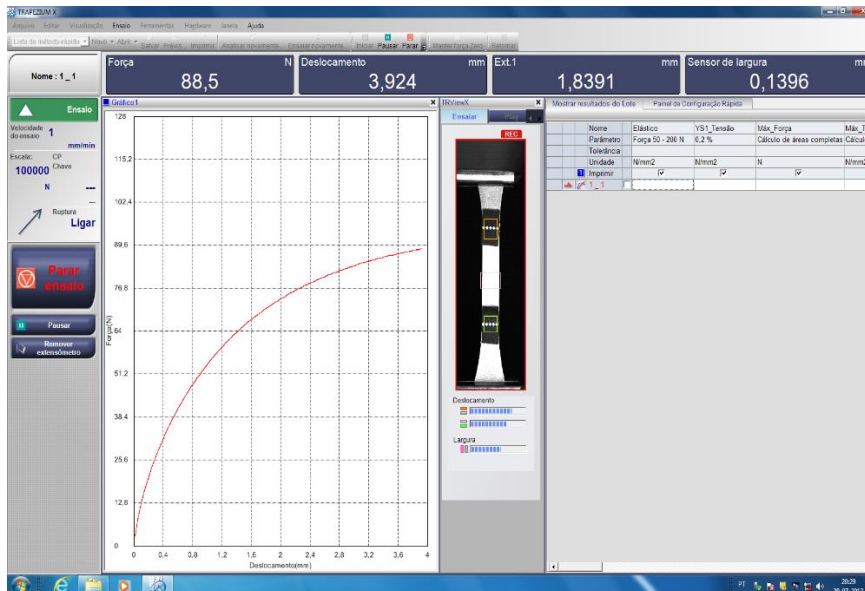


Fig 37-Print-screen ensaio provete adesivo.

3.3.3 Resultados experimentais

O módulo de elasticidade, a tensão máxima e a deformação máxima à tração foram obtidas pelas expressões já apresentadas no subcapítulo 3.2.2.

De seguida apresenta-se as curvas tensão-deformação e força-deslocamento para velocidades de 1 mm/min e 4 mm/min. As curvas apresentadas nas Fig 38 e Fig 39 serviram para retirar o módulo de elasticidade, tensão limite elástico (0,2%), tensão máxima e a deformação máxima à tração. Para os provetes 1, 2 e 3 foi utilizada uma velocidade de 1mm/min (Fig 38) e para os provetes 4, 5 e 6 utilizou-se uma velocidade de 4 mm/min (Fig 39).

Pela análise das curvas força-deslocamento (Fig 38 e Fig 39) verifica-se que este é um adesivo dúctil, pois é capaz de suportar uma considerável deformação plástica sem se romper (da Silva, et al., 2007). Durante as colagens de JSS-LS e BS assim como no fabrico destes provetes Bulk, constatamos que este adesivo possuía um forte odor, característica dos adesivos pertencentes à família dos acrílicos (Petrie, 2000).

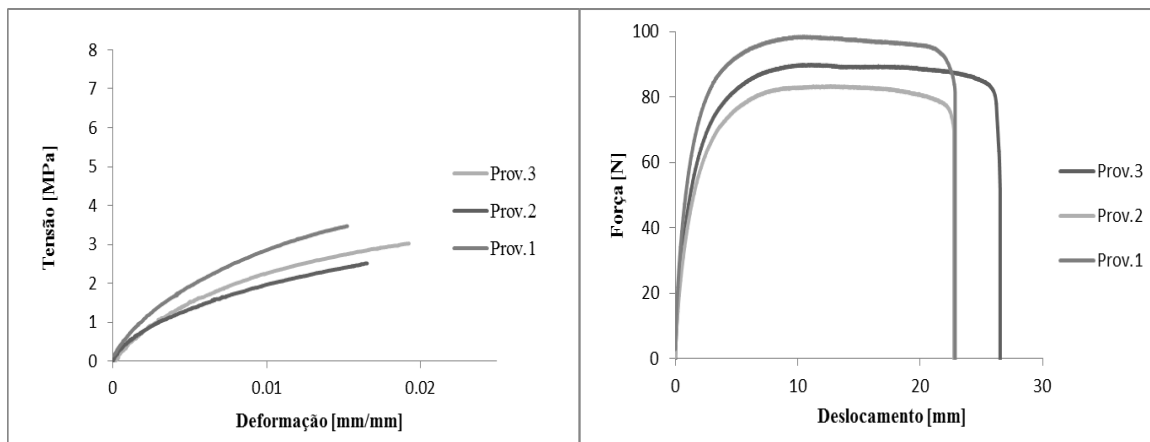


Fig 38-Curva tensão-deformação e força-deslocamento para $v= 1$ mm/min.

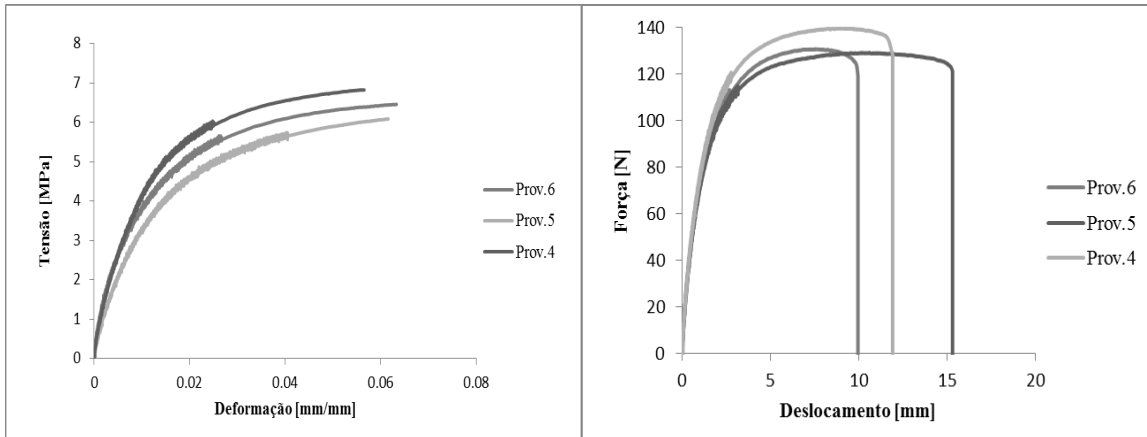


Fig 39-Curva tensão-deformação e força-deslocamento para v= 4 mm/min.

A Tabela 7 apresenta os valores de resistência à tração, o módulo de elasticidade e o valor de deformação máxima à tração para o adesivo da Tam Tech Adhesive. Conforme se pode analisar a partir da Tabela 7 o valor do módulo de elasticidade é superior para a velocidade de 4 mm/min, assim como a tensão limite elástico e a tensão máxima. A deformação máxima à tração é inferior para a velocidade de 4mm/min. O desvio padrão é relativamente baixo para ambas situações. Como seria de esperar o aumento da velocidade provocou um aumento da rigidez e da resistência mecânica mas diminui a ductibilidade.

Tabela 7-Propriedades mecânicas do adesivo Tam Tech Adhesive obtidas experimentalmente.

	Adesivo (V=1mm/min)				Adesivo (V=4mm/min)			
	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$\sigma_{0,2}$ [MPa]	E [MPa]	$\epsilon_{t\acute{m}a}x$ (%)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$\sigma_{0,2}$ [MPa]	E [MPa]	$\epsilon_{t\acute{m}a}x$ (%)
Média	4,52	1,81	385,44	20,89	6,65	2,91	527,17	10,81
Desvio padrão	0,38	0,35	29,59	1,85	0,28	0,34	29,23	2,32

Não foi possível comparar os resultados obtidos experimentalmente com os do fabricante pois este não os cedeu para análise.

3.3.4 Medição de dureza do adesivo

A medição de dureza é utilizada para verificar o grau de cura de um adesivo. Uma dureza baixa pode ser sinónimo da presença de defeitos. No entanto, caso a dureza seja muito elevada pode significar uma cura exagerada (da Silva, et al., 2007; Duan, et al., 2004).

Segundo a norma ISO 868-2003 (ISO 868, 2003), existem dois tipos de escalas para medir a dureza de borrachas e plásticos - A e D. Inicialmente, utilizou-se a escala A que é particularmente aconselhada para materiais macios, tais como elastómeros e polímeros macios. Os resultados obtidos com o durómetro Teclock GS-709 tipo A (Fig 40) estão apresentados na Tabela 8 e foram realizados após os ensaios de tração.

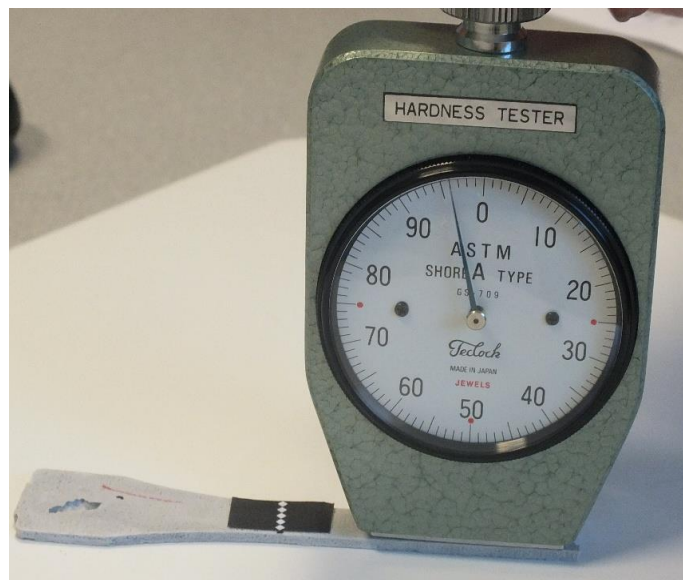


Fig 40-Medição com durómetro “ Shore A”.

Tabela 8-Durezas medidas” Shore A”.

Shore A Type	
Nº Provete	Dureza medida
Provete 1	97 +/-1
Provete 2	96 +/-1
Provete 3	96 +/-1
Provete 4	97 +/-1
Provete 5	97 +/-1
Provete 6	97 +/-1

Os resultados obtidos indicam um valor de dureza bastante elevado no tipo A, praticamente iguais em todos os provetes. Contudo, para valores superiores a 90 obtidos com o

durómetro tipo A, é recomendado avaliar a dureza utilizando o durómetro tipo D. Os resultados obtidos com o durómetro Hildebrand Model OS-2 tipo D (Fig 41) estão apresentados na Tabela 9. Os valores obtidos experimentalmente em Tipo D são similares ao valor teórico.



Fig 41-Medição com durómetro “ Shore D”.

Tabela 9-Durezas medidas” Shore D”.

Shore D Type	
Nº Provete	Dureza medida
Provete 1	59+/-1
Provete 2	58+/-1
Provete 3	60+/-1
Provete 4	60+/-1
Provete 5	61+/-1
Provete 6	60+/-1

3.4 Juntas de sobreposição simples (JSS)-*Lap Shear* (LS)

3.4.1 Fabrico das JSS-LS

Para estas juntas LS, foram cortados, a partir de placas de 6 mm de espessura, substratos de PTFE, PP e PVC. O corte foi efetuado recorrendo a uma serra mecânica existente na empresa Sove, SA (Fig 20). As dimensões finais dos substratos estão apresentadas na Fig 42.



Fig 42-Dimensões dos substratos utilizados nas JSS-LS.

A geometria e as dimensões destas JSS-LS estão representadas na Fig 43.

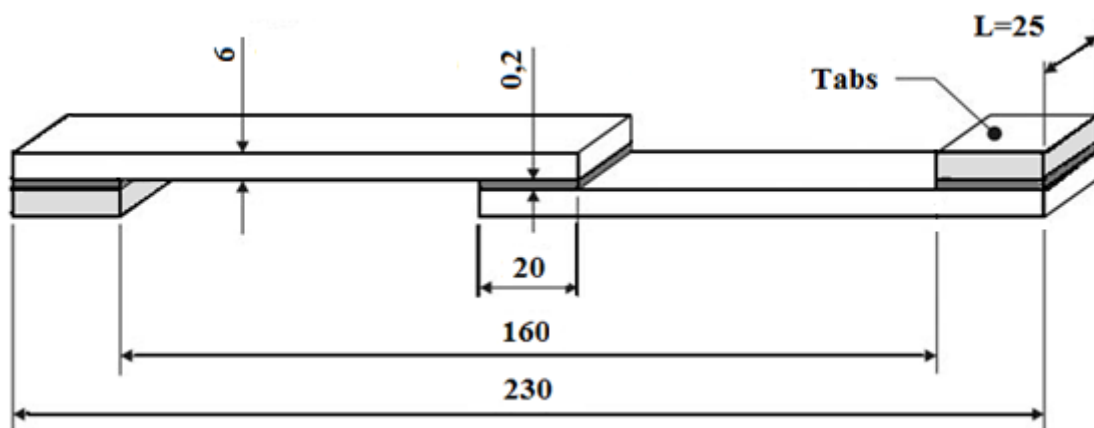


Fig 43-Geometria e dimensões da JSS-LS.

Todos os provetes foram limpos e desengordurados com álcool etílico e não foi efetuada nenhuma preparação de superfície exceto nos substratos de PTFE. Nestes substratos foi

efetuada uma preparação de superfície recorrendo a abrasão com lixa de granulometria 120. Posteriormente estes provetes foram novamente limpos com álcool etílico para retirar as impurezas resultantes da abrasão.

Foi efetuada a marcação do comprimento de sobreposição de 20 mm nos dois substratos com a ajuda de um marcador para facilitar o seu posicionamento e, assim, a obtenção do comprimento de sobreposição pretendido. Para garantir na zona de sobreposição da junta a espessura de adesivo de 0,2 mm foram colocados 2 fios de pesca (Fig 44) paralelos entre si e orientados longitudinalmente ao longo de um dos substratos. Aplicou-se o adesivo no substrato inferior que já se encontrava fixo e devidamente alinhado com a régua por uma mola. De seguida posicionou-se o substrato superior com todo o cuidado. No final foi colocada uma mola na zona de sobreposição para garantir uma boa compressão na junta (Fig 45). Foram também colados os tabs nos substratos inferior e superior com a finalidade de diminuir o desalinhamento das juntas LS no ensaio de tração. A Fig 46 apresenta uma junta LS após a cura do adesivo.



Fig 44-Fio de pesca em PTFE.



Fig 45-JSS-LS com substratos e Tab pressionados com molas.



Fig 46-JSS- LS após cura do adesivo.

Após o processo de cura foi controlada a espessura do adesivo com a medição da altura total dos substratos mais o adesivo. O valor médio obtido para a espessura do adesivo para as 18 juntas fabricadas foi de 0,25 mm.

A limpeza do excesso de adesivo e os ensaios de tração foram realizados uma semana após o fabrico das juntas. Para o processo de limpeza foi utilizada uma mó, acoplada a uma máquina de furar existente nas oficinas mecânicas do DEM, para desbastar o excesso de adesivo junto ao comprimento de sobreposição.

3.4.2 Condições de ensaio

Foi realizado o *Lap Shear Test method* segundo a norma ASTM D-3163-01 (ASTM D 3163, 2001) a uma velocidade de 1 mm/min. Estes ensaios foram realizados à temperatura ambiente numa máquina de ensaios de tração disponível no Laboratório de ensaios Mecânicos do ISEP, "Shimadzu AG X" equipada com amarras de fixação e utilizando uma célula de carga de 100 kN (Fig 23). A resistência ao corte foi calculada pelo quociente entre a força máxima e a área de colagem $25 \times 20 \text{ mm}^2$. Os modos de rotura foram determinados pela observação visual das superfícies de rotura.

A geometria e dimensões desta junta estão assinaladas na Fig 43. A Fig 47 indica o esforço a que a JSS-LS vai estar sujeita durante o ensaio.

Neste tipo de ensaio submete-se um corpo de prova a uma força continuamente crescente até obter a sua rotura. Através dos registos das cargas aplicadas e dos deslocamentos sofridos pelo corpo é possível obter a curva característica de cada ensaio realizado.

Devido à geometria desta junta os substratos estão sujeitos a um esforço de tração e o adesivo a um esforço de corte. Contudo, devido ao desalinhamento dos substratos, a junta tem tendência para sofrer flexão introduzindo, no adesivo esforços de arrancamento.

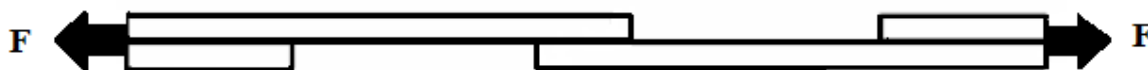


Fig 47-Esforço a que está sujeito a JSS-LS.

Foram realizados 6 ensaios para cada tipo substrato mais 3 ensaios para as JSS de PTFE sujeitas a um tratamento por chama, totalizando 21 ensaios de tração de JSS-LS.

3.4.3 Resultados experimentais

De seguida, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de tração das JSS-LS de cada substrato.

Na Fig 48, verifica-se que quando a carga aplicada ainda é pequena a rotação da junta não é muito significativa. Na mesma Fig 48, é possível visualizar o momento fletor devido à rotação da JSS-LS de PTFE pouco antes de ocorrer a a rotura. Os substratos fletem e a direção da linha de carregamento altera-se devido à rotação da junta (Goland M e Reissner, 1944). Dado o baixo módulo de elasticidade do PTFE, este facto é bastante evidente neste tipo de substrato.

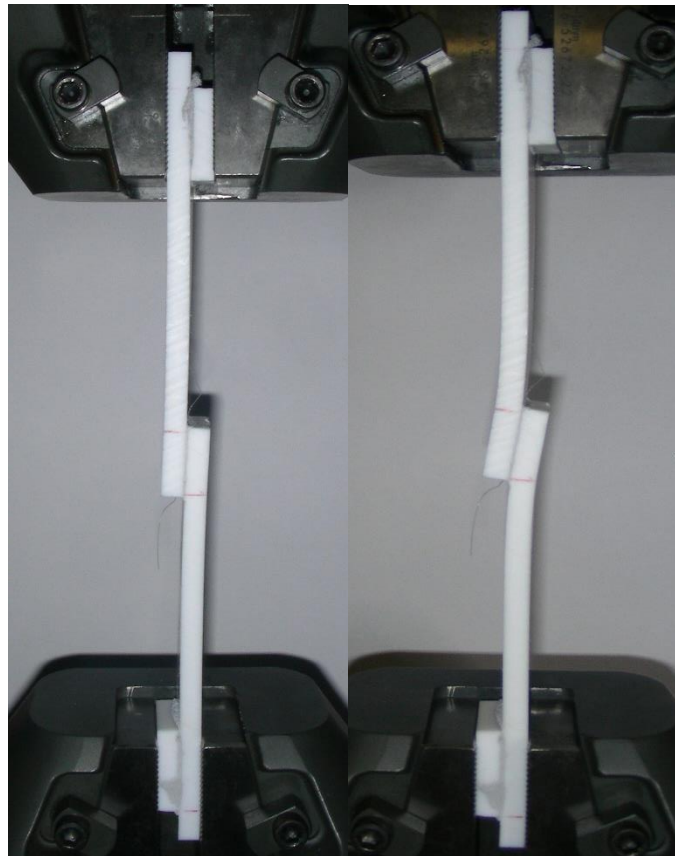


Fig 48-JSS-LS de PTFE com pouca carga(esq) e pouco antes da rotura (dir).

Na Fig 49 verifica-se que o momento fletor existente nesta JSS-LS de PP e de PVC, pouco antes da rotura, são inferiores ao produzido na JSS-LS de PTFE (Fig 48), devendo-se este facto ao módulo de elasticidade ser superior no PP e no PVC comparativamente com o PTFE. Como podemos verificar na Fig 49 o momento fletor existente nesta junta LS de

PVC é inferior ao da junta LS de PP. Para este facto contribui o módulo de elasticidade do PVC ser superior ao do PP.

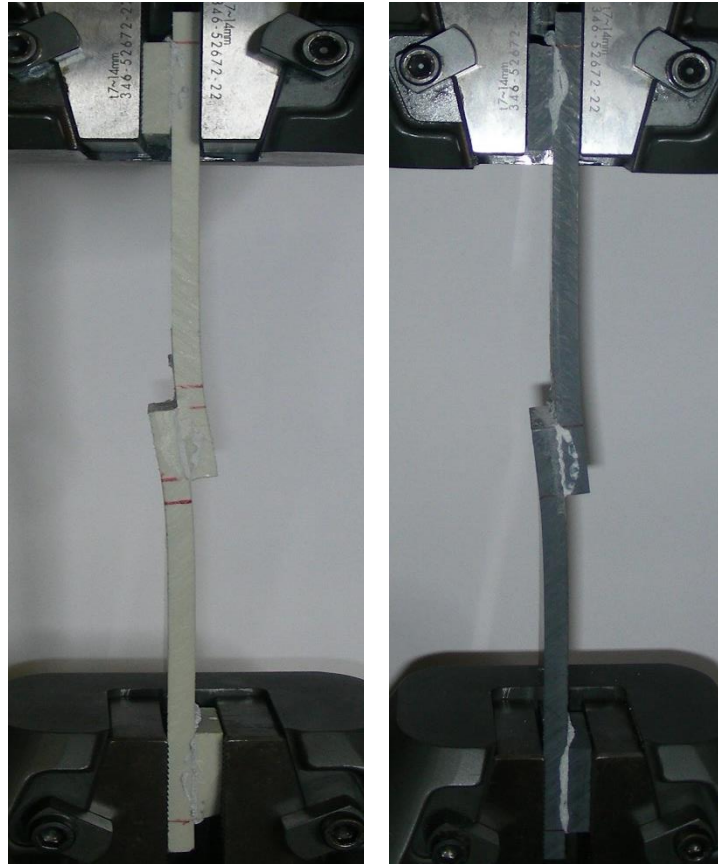


Fig 49-JSS-LS de PP (esq) e de PVC (dir) pouco antes da rotura.

Após a realização dos ensaios de tração podemos verificar no gráfico da Fig 50 os valores médios de força máxima das JSS-LS de PTFE, PP e PVC assim como o respetivo valor do desvio padrão. Verifica-se pela análise destes gráficos que os valores médios de força máxima para uma JSS-LS com substratos de PVC é consideravelmente superior ao valor obtido para substratos de PP (cerca de 400 N) e muito superior ao obtido para substratos de PTFE (cerca de 1700 N). As curvas $P-\delta$ serão apresentadas no capítulo 4.

Estes valores correspondem ao esperado pois os substratos que possuem uma maior rigidez não sofrem tanta flexão da junta. Assim, as tensões de arrancamento são inferiores, conduzindo a valores superiores de força máxima.

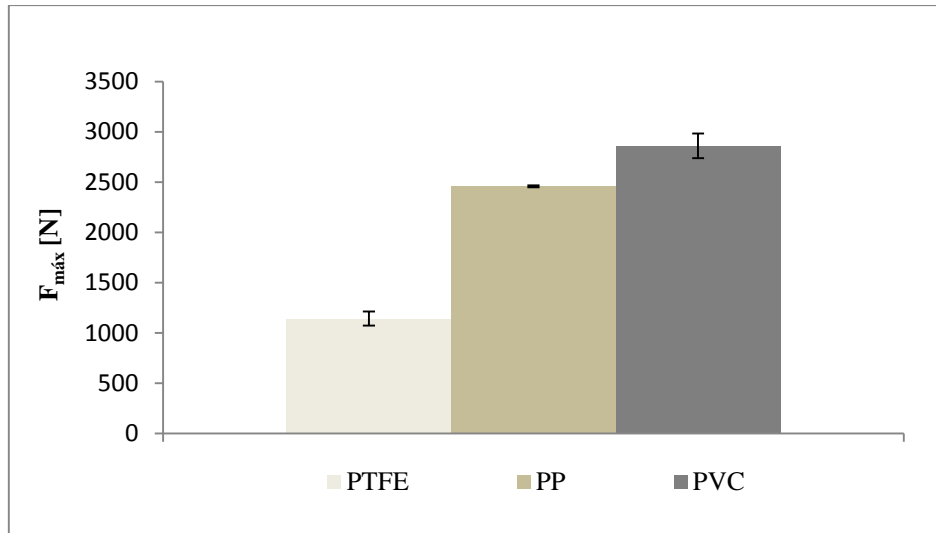


Fig 50-Valores médios de força máxima atingida em LS para PTFE, PP e PVC.

Pela visualização das roturas obtidas no ensaio de tração efetuados às JSS-LS podemos verificar o seguinte:

- Para todas as JSS-LS de PP obtiveram-se roturas coesivas (Fig 51).
- Para todas as JSS-LS de PVC obtiveram-se roturas coesivas (Fig 52).
- Para as JSS-LS de PTFE as roturas foram adesivas. Contudo, em três juntas foi possível observar pequeníssimas zonas de rotura coesiva. Podemos considerar que neste caso a rotura foi mista mas sendo a zona coesiva muitíssimo menor que a zona adesiva (Fig 53 e Fig 54).

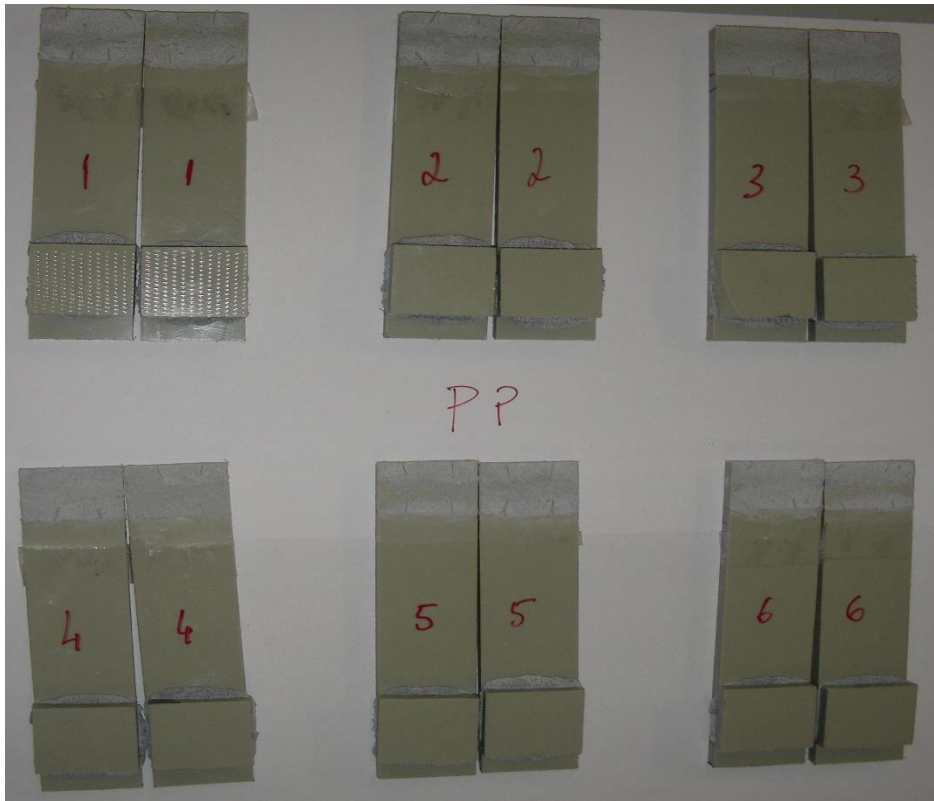


Fig 51-Tipo de rotura nas JSS-LS de PP para as 6 juntas.



Fig 52-Tipo de Rotura nas JSS-LS de PVC para as 6 juntas.



Fig 53-Rotura adesiva nas JSS-LS de PTFE.

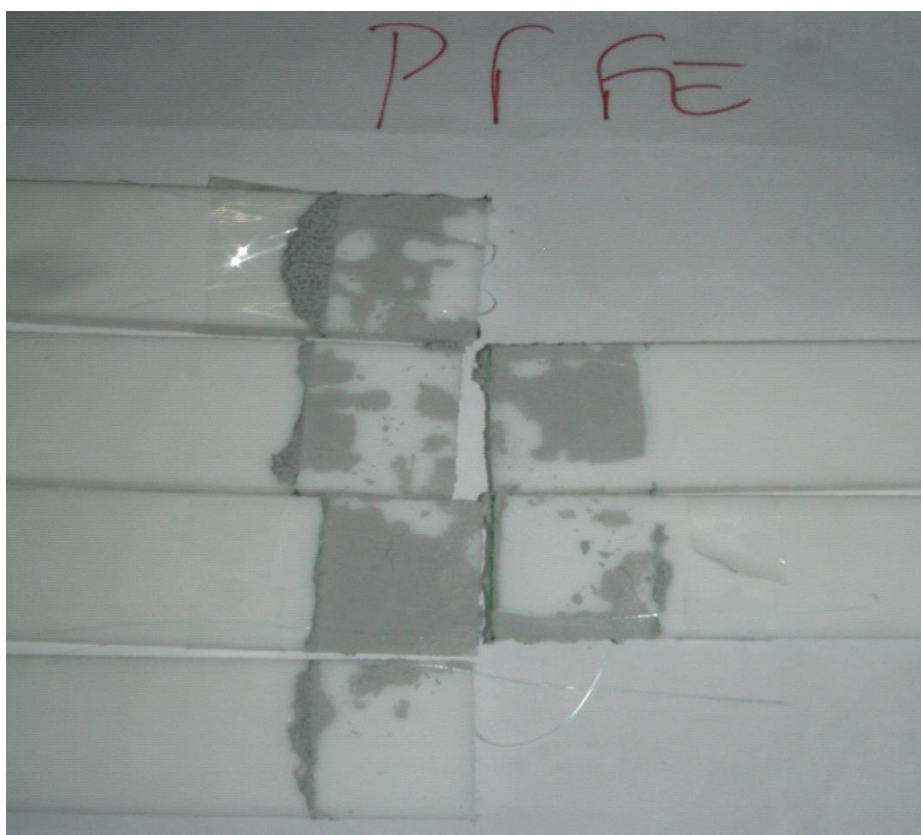


Fig 54-Rotura mista com tendência adesiva nas JSS-LS de PTFE.

Com o objetivo de aumentar a resistência ao corte das JSS-LS de PTFE, efetuamos um tratamento de superfície denominado por tratamento por chama. Este tratamento consistiu em expor a superfície do polímero a uma chama oxidante, para que a oxidação da superfície do substrato de PTFE, permita obter complexos favoráveis ao estabelecimento de ligações desejadas (da Silva, et al., 2007).

Para estas juntas foram utilizados substratos de PTFE com as mesmas dimensões indicadas na Fig 42.

No tratamento destes substratos de PTFE foi utilizado um maçarico manual (Fig 55). Foram efetuadas duas a três passagens de chama na superfície do substrato. No entanto, não houve grande controlo da distância do maçarico aos substratos e do tempo de contacto da chama sobre os referidos substratos. A colagem dos substratos foi efetuada imediatamente após o tratamento por chama, seguindo o procedimento apresentado no subcapítulo 3.4.1.



Fig 55-Maçarico utilizado no tratamento por chama.

Após terem sido realizados os respetivos ensaios de tração às JSS-LS de PTFE com tratamento por chama foram validados 3 ensaios com este tipo de tratamento. No gráfico da Fig 56, podemos verificar os valores médios de força máxima e comparar estes valores aos valores obtidos no ensaio das JSS-LS de PTFE, com tratamento por abrasão por lixa. Verifica-se que os valores obtidos de força máxima no tratamento por chama são superiores em cerca de 200 N, sendo os valores do desvio padrão muito similares.

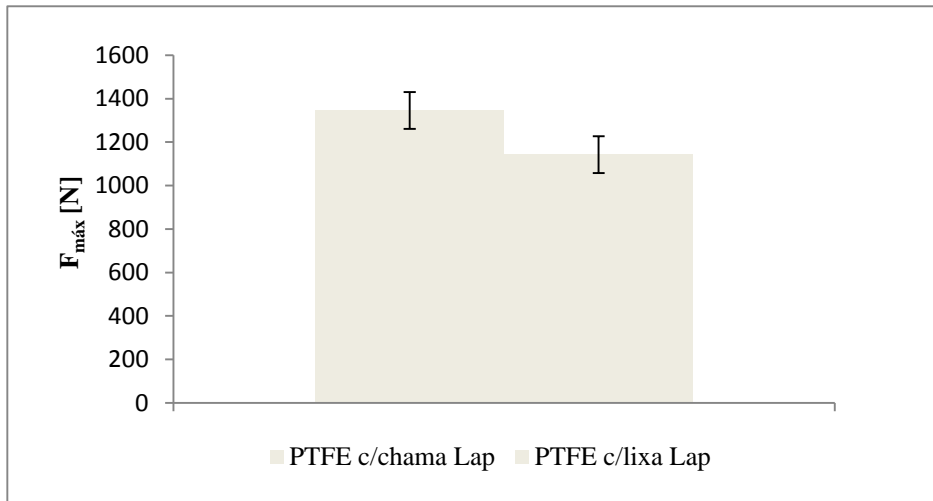


Fig 56-Valores médios de força máxima em LS para PTFE com e sem chama.

Podemos verificar na Fig 57 a rotação da junta devido ao baixo módulo de elasticidade do substrato utilizado nesta junta (PTFE), momentos antes da rotura. Também podemos verificar na mesma figura o início da rotura junto a uma das extremidades do comprimento de sobreposição desta junta.

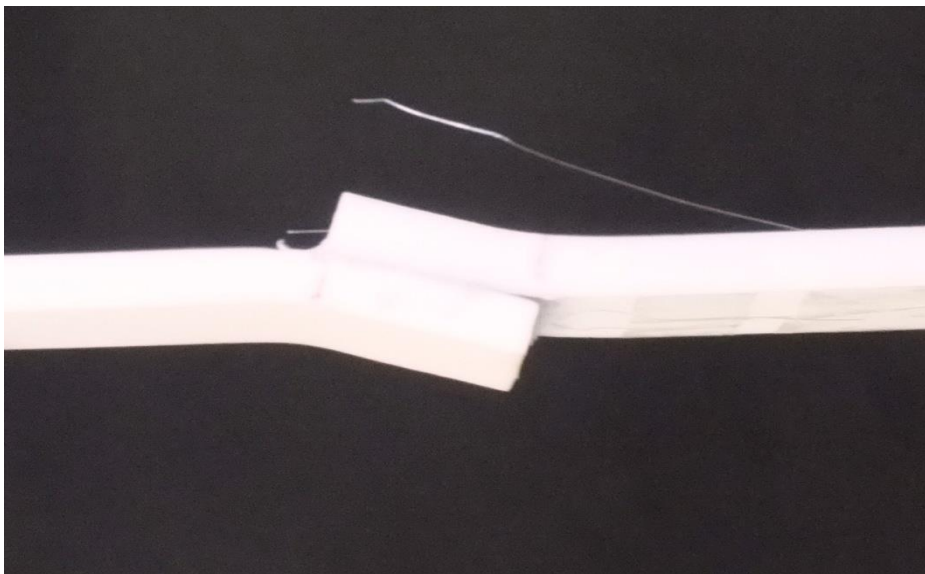


Fig 57-JSS-LS de PTFE c/ chama pouco antes da rotura.

Podemos verificar de seguida nas Fig 58 e Fig 59 o tipo de rotura obtida neste tipo de JSS-LS com tratamento por chama. Constata-se que neste caso a rotura foi mista com tendência para ser coesiva melhorando, assim, a resistência das juntas.



Fig 58-Tipo de rotura nas JSS-LS de PTFE com tratamento por chama.

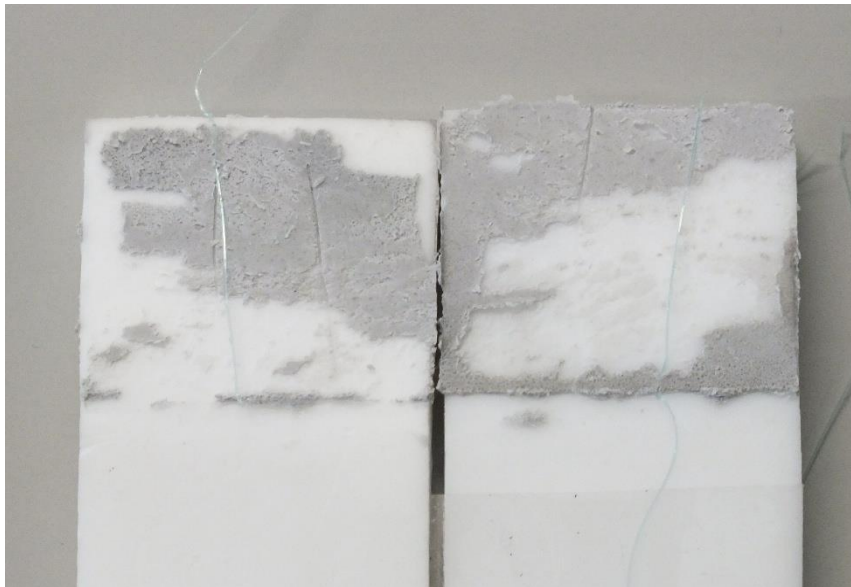


Fig 59-Rotura mista das JSS-LS de PTFE com tratamento por chama com tendência coesiva.

3.5 Juntas de Sobreposição Simples (JSS)-*Block Shear* (BS)

3.5.1 Fabrico das JSS-BS

Para estas juntas BS, foram cortados substratos de PTFE, PP e PVC a partir de placas de 6 mm de espessura. O corte foi efetuado recorrendo a uma serra mecânica (Fig 20). As dimensões finais dos provetes estão assinaladas na Fig 60.



Fig 60-Dimensões dos substratos utilizados nas JSS-BS.

A geometria e as dimensões destas juntas BS estão representadas na Fig 61.

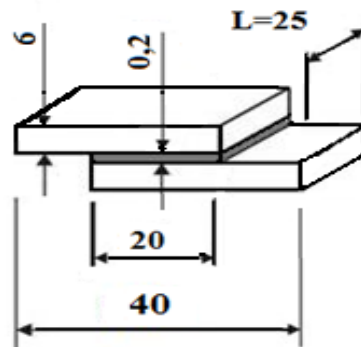


Fig 61-Geometria e dimensões da junta JSS-BS.

Tal como aconteceu nos substratos para juntas JSS-LS, também os substratos das JSS-BS foram limpos e desengordurados com álcool etílico. Nestes substratos não foi efetuada nenhuma preparação de superfície adicional exceto nos substratos de PTFE. Nestes foi efetuada uma preparação de superfície recorrendo a abrasão com lixa de granulometria 120. Posteriormente estes substratos de PTFE foram novamente limpos com álcool etílico para retirar as impurezas características do processo de abrasão com lixa ainda existentes. Foi efetuada a marcação do comprimento de sobreposição de 20 mm nos dois substratos com auxílio de um marcador para facilitar o processo de colagem. Para garantir a espessura

de 0,2 mm na zona de sobreposição da junta adesiva foi utilizado fio de pesca (Fig 44) aplicado num dos substratos. Nesta junta o fio é enrolado à volta do substrato com a finalidade deste fio não se soltar na colagem. Fato visível na junta BS de PP curada (Fig 63). Seguidamente foi aplicado adesivo no substrato inferior e posicionou-se o substrato superior com todo o cuidado. No final colocou-se uma mola que vai pressionar o fecho da junta (Fig 62). Decorre assim o processo de cura, que é realizado à temperatura ambiente.

Após o processo de cura estar concluído, foi realizado uma verificação da espessura do adesivo com a medição da altura total dos substratos mais o adesivo. O valor médio obtido para a espessura do adesivo para as JSS-BS foi de 0,25 mm.

A limpeza do excesso de adesivo foi efetuada recorrendo a uma mó abrasiva que por movimento rotativo, acoplado a uma máquina de furar existente nas oficinas mecânicas do DEM vai limpar o excesso de adesivo existente junto ao comprimento de sobreposição. Os ensaios das juntas BS foram realizados uma semana após o fabrico das juntas.

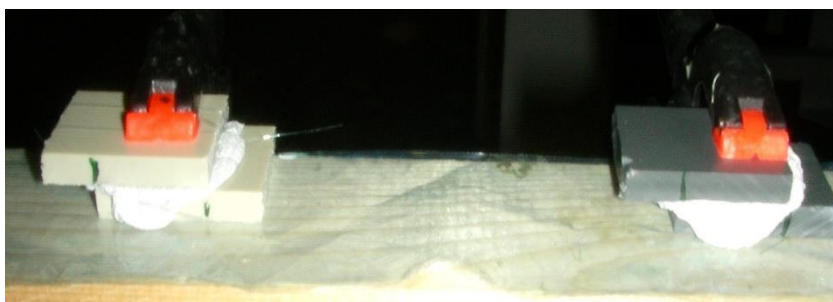


Fig 62-Juntas BS com substratos pressionados por ação de uma mola.



Fig 63-Juntas BS com substratos de PP após cura do adesivo.

3.5.2 Condições de ensaio

Foi realizado o ensaio *Block Shear Test method* segundo a norma ASTM D4501-01 (ASTM D 4501, 2001) a uma velocidade de 1mm/min. Estes ensaios foram realizados à temperatura ambiente. A geometria e dimensões desta junta estão representadas na Fig 61. Na Fig 64 assinalam-se os esforços a que a junta BS vai estar sujeita durante o ensaio não estando os substratos sujeitos a um esforço de tração mas sim a um esforço de compressão. Devido à geometria da junta e à forma como são aplicados os esforços, este método permite minimizar as tensões de arrancamento que costumam acontecer nas JSS-LS devido ao efeito da flexão. A resistência ao corte foi calculada pelo quociente entre a força máxima e a área de colagem sendo esta calculada a partir do comprimento de sobreposição vezes a largura de sobreposição, 20 x 25 mm².

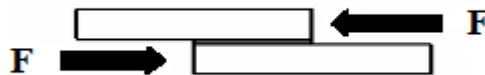


Fig 64-Esforço a que sujeita a JSS-BS.

Para cada tipo de substrato realizaram-se 4 ensaios totalizando 12 juntas BS. Para estes ensaios BS foi necessário utilizar a ferramenta indicada na Fig 65, a qual vai ser presa às amarras de fixação da máquina de ensaios mecânicos (Fig 23). Na Fig 66 podemos visualizar uma JSS-BS de PTFE durante um ensaio utilizando a ferramenta indicada.

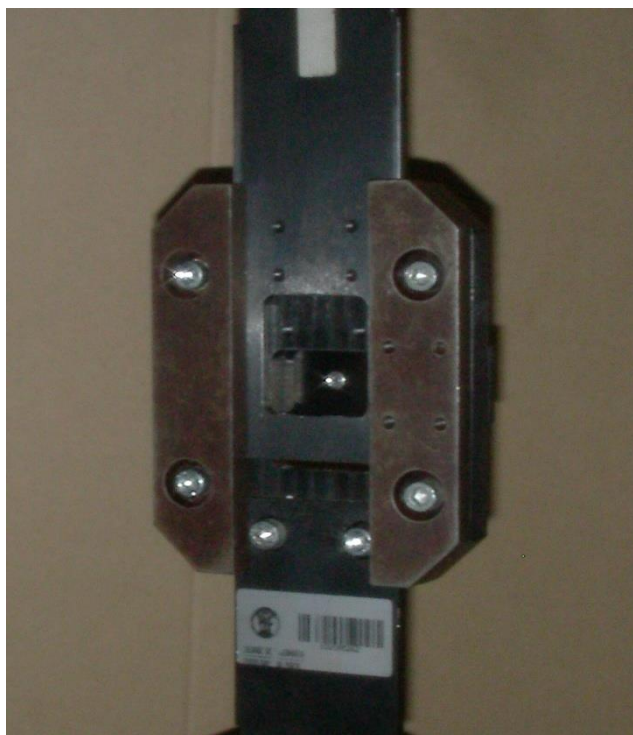


Fig 65-Ferramenta utilizada para as JSS-BS sem provete.



Fig 66-Ferramenta utilizada para JSS-BS com provete de PTFE.

3.5.3 Resultados experimentais

Após a realização dos ensaios das JSS-BS podemos verificar no gráfico da Fig 67 o valor médio de força máxima para cada conjunto de BS de PTFE, PP e PVC assim como o respetivo valor do desvio padrão. Podemos verificar após análise do gráfico da Fig 67 que o valor médio de força máxima para uma JSS-BS com substratos de PVC é ligeiramente superior ao valor obtido para substratos de PP e muito superior ao obtido para substratos de PTFE. As curvas $P-\delta$ serão apresentados no capítulo 4.

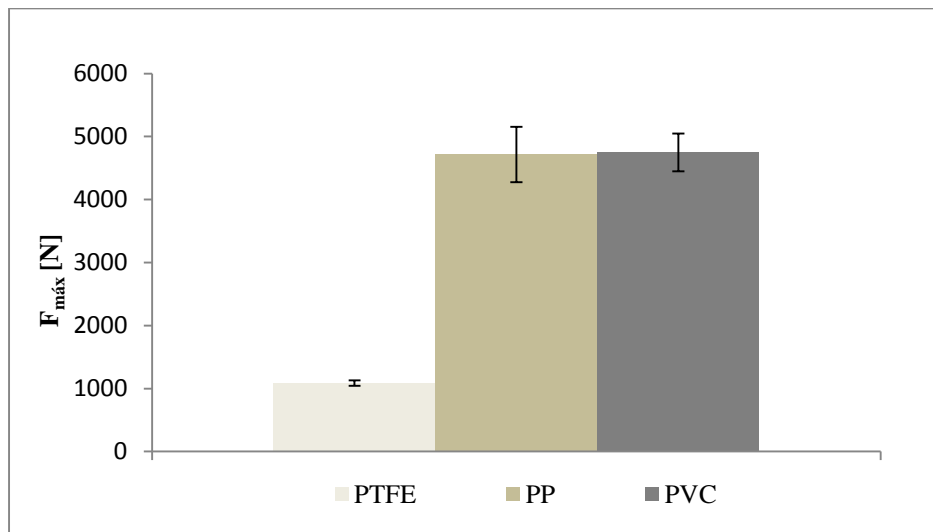


Fig 67-Valores médios de força máxima em BS para PTFE, PP e PVC.

Após a realização dos ensaios das JSS-BS visualizaram-se os seguintes modos de rotura:

- Para todas as JSS-BS de PP obtiveram-se roturas coesivas (Fig 68).
- Para todas as JSS-BS de PVC obtiveram-se roturas coesivas (Fig 69).
- Para todas as JSS-BS de PTFE obtiveram-se roturas adesivas (Fig 70 e Fig 71).

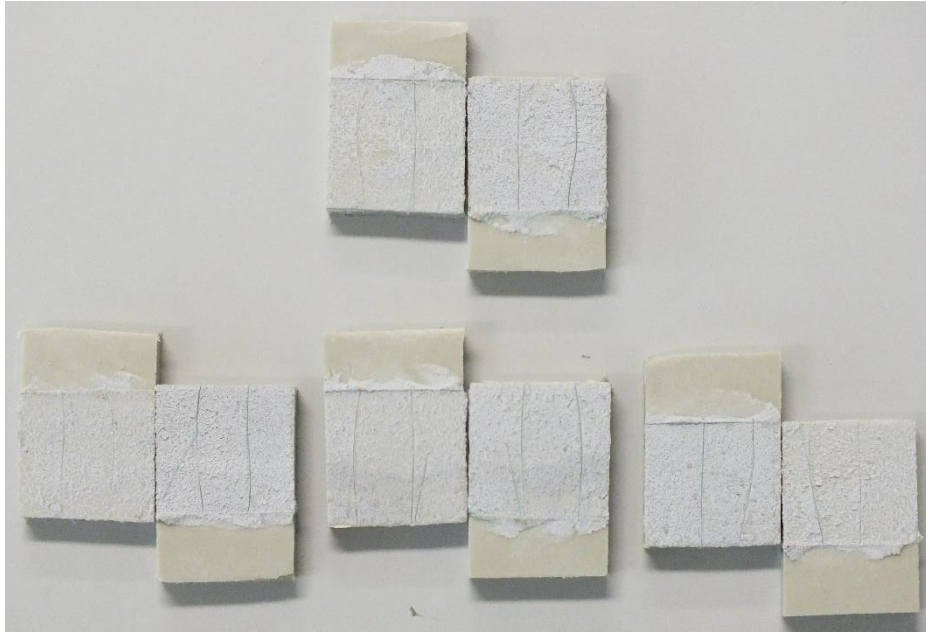


Fig 68-Rotura coesiva para as 4 JSS-BS de PP.



Fig 69-Rotura coesiva para as 4 JSS-BS de PVC.

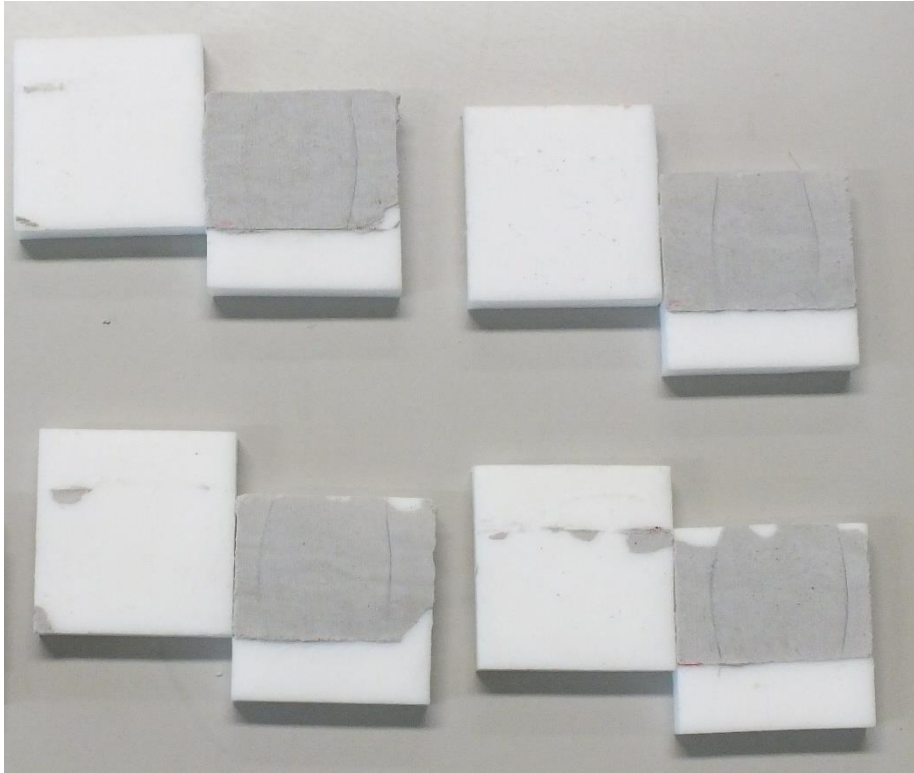


Fig 70-Rotura adesiva para as 4 JSS-BS de PTFE.

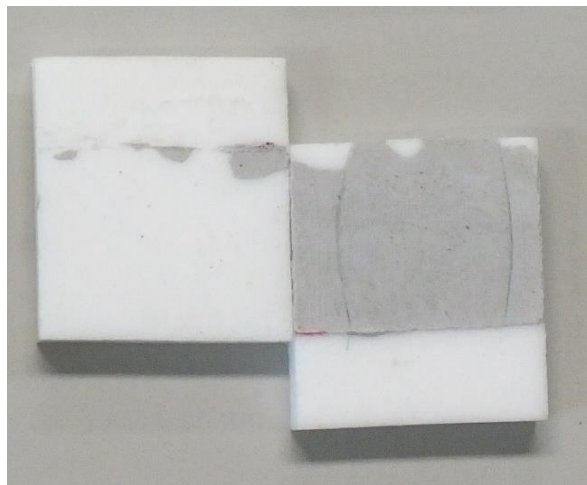


Fig 71-Rotura adesiva de PTFE.

Podemos constatar da análise do gráfico da Fig 72 que os valores de $F_{m\acute{a}x}$ são inferiores em JSS-LS para os substratos de PVC e PP quando comparados com as JSS-BS, devendo-se este facto à flexão dos substratos das JSS-LS, que leva à introdução de tensões de arrancamento na camada de adesivo. Para as juntas BS estas tensões são minimizadas logo a sua resistência superior. Nos substratos de PTFE os valores de $F_{m\acute{a}x}$ em JSS-LS (1142 N)

são muito próximos aos de JSS-BS (1085 N). Tal fato deve-se ao mesmo tipo de rotura obtida em LS e em BS -adesiva.

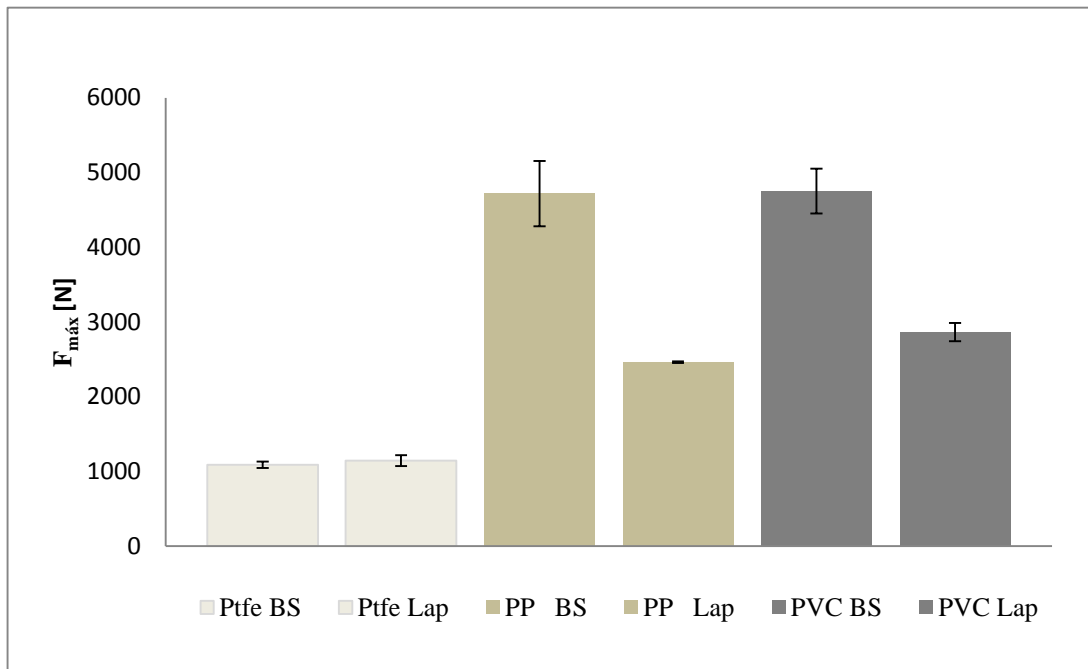


Fig 72-Quadro comparativo de $F_{\text{máx}}$ (média) de juntas BS e LS.

4 Trabalho numérico

4.1 Condições da análise numérica JSS e BS

Neste trabalho, a análise por elementos finitos foi efetuada recorrendo a modelos de dano coesivo (MDC) implementados em elementos finitos de interface. Os principais objetivos são o estudo do comportamento assim como a distribuição de tensões das juntas LS e BS de substratos em PTFE, PP e PVC com o adesivo da Tamarron -” Tam Tech Adhesive” e a comparação dos resultados obtidos numericamente com os resultados experimentais.

O MDC utilizado é o modelo de dano triangular, que caracteriza adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivo, mesmo considerando adesivos com alguma ductibilidade (Campilho, et al., 2013). As juntas são analisadas recorrendo ao programa de elementos finitos ABAQUS® CAE versão 6.11. e a análise numérica efetuada foi 2D.

A geometria e as dimensões desta JSS são apresentadas na Fig 43 e as condições fronteiras utilizadas são assinaladas na Fig 73. Estas consistem no encastramento de uma das extremidades da junta e na aplicação de um deslocamento na outra extremidade. Nesta extremidade o deslocamento vertical é restringido, por forma a reproduzir de forma fiel as condições de ensaio (ASTM D 3163, 2001).

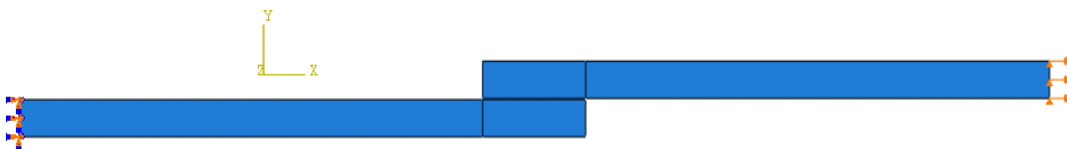


Fig 73-Representação das condições fronteira para as JSS-LS na simulação ABAQUS®.

A Fig 74 mostra um detalhe da malha utilizada no modelo numérico da JSS-LS na zona da sobreposição. Foram utilizados elementos sólidos bidimensionais de Estado Plano de

Deformação (EPD) de 4 nós (CPE4R do ABAQUS®) para os substratos. A camada de adesivo foi modelada por uma única fila de elementos coesivos (COH2D4).

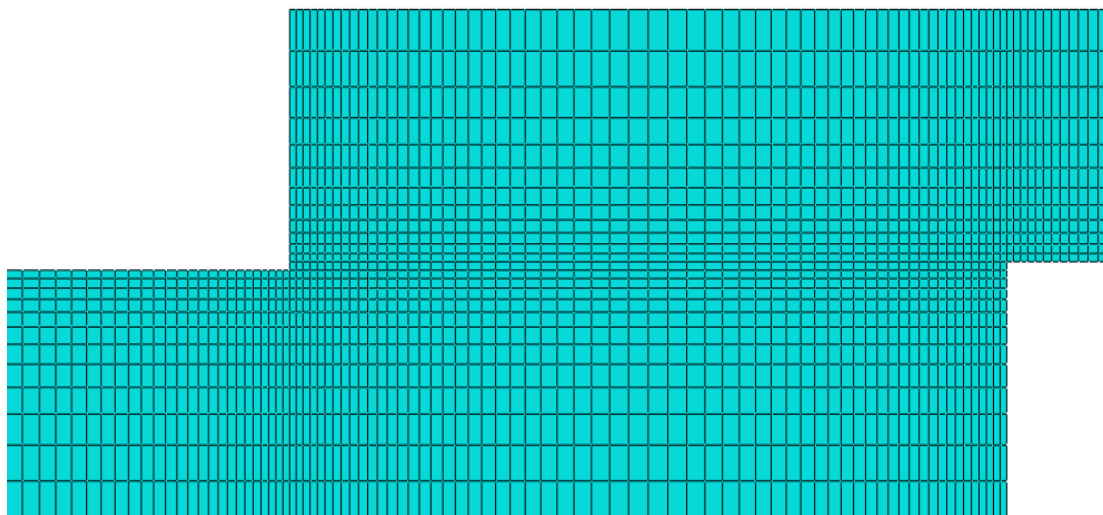


Fig 74-Malha de elementos finitos para as JSS-LS.

Foram utilizados 12 elementos ao longo da espessura de cada substrato com um maior refinamento da malha junto à camada de adesivo. O comprimento de sobreposição foi modelado com 60 elementos sólidos. Conforme se pode observar na Fig 74, existe um maior refinamento nas extremidades das zonas de sobreposição devido a estas zonas estarem sujeitas a gradientes de tensões significativos (Chang, et al., 2000).

A geometria e dimensões da junta BS são apresentadas na Fig 60. As condições fronteiras utilizadas são assinaladas na Fig 75. Estas consistem na aplicação de um deslocamento constante numa das extremidades do substrato superior enquanto o substrato inferior se encontra fixo, por forma a reproduzir de forma fiel as condições de ensaio (ASTM D 4501, 2001).



Fig 75-Representação das condições fronteiras para as JSS-BS na simulação ABAQUS®.

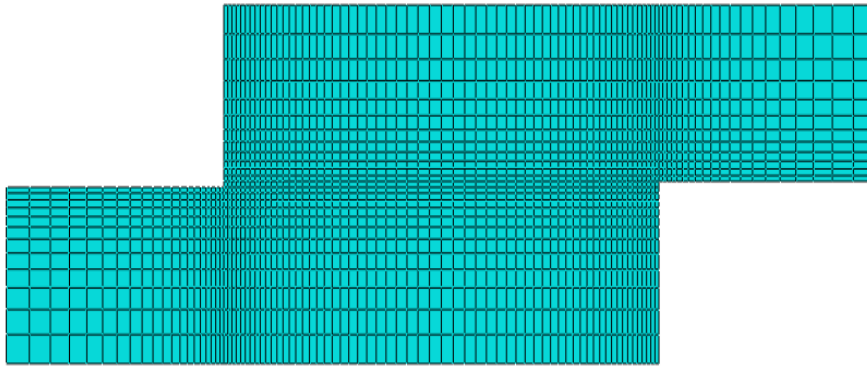


Fig 76-Malha de elementos finitos para as JSS-BS.

Para as juntas BS foi utilizado um esquema de refinamento de malha idêntico ao usado para as juntas LS (Fig 76).

Na Tabela 10 apresentam-se algumas das principais propriedades mecânicas médias utilizadas na simulação numérica para o adesivo Tam Tech Adhesive e para os substratos utilizados nas juntas LS e BS, propriedades obtidas experimentalmente.

Tabela 10-Propriedades mecânicas do adesivo e dos substratos.

Propriedades	Adesivo	PTFE	PP	PVC
E [MPa]	385,44	1289,91	2012,01	2605,12
$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	6,65	23,76	-	-
σ_y [MPa]	-	18,17	34,11	42,54
ν *	0,3	0,41	0,38	0,45

*Valores estimados

4.2 Modelo de dano coesivo

4.2.1 Modelo de dano triangular

A lei coesiva de dano triangular, descrita em detalhe nesta secção, é a mais utilizada devido à sua simplicidade, reduzido número de parâmetros a determinar, e fornece resultados geralmente aceitáveis para a maioria das condições reais (Liljedahl, et al., 2006). Todavia a forma das leis coesivas pode ser ajustada para estar em conformidade com o comportamento do material, ou da interface que está a simular, para resultados mais precisos (Campilho, et al., 2009a).

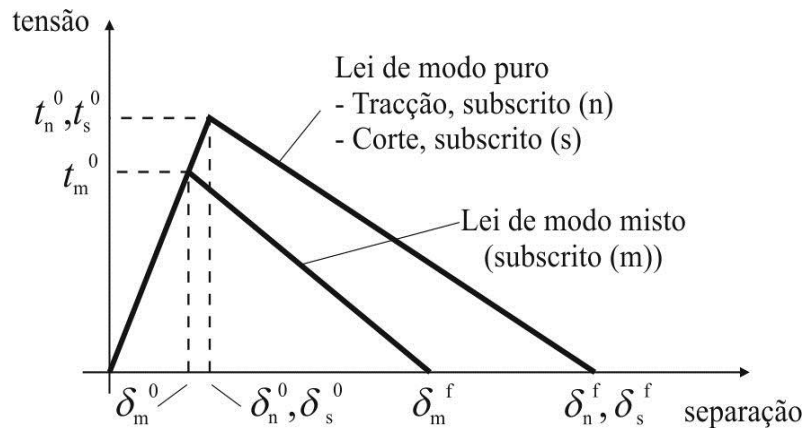


Fig 77-Modelo coesivo de dano triangular disponível no ABAQUS®.

A secção atual descreve o MDC de dano triangular estático em 2D implementado no Software ABAQUS® (Fig 77). O comportamento elástico é definido por uma matriz constitutiva \mathbf{K}_{coh} 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), para simular o comportamento elástico até t_n^0 (tração) ou t_s^0 (corte) e o amaciamento subsequente (Abaqus, 2009).

A matriz \mathbf{K}_{coh} contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva cuja definição depende se é utilizada a abordagem local ou contínua. Na Abordagem local que é usada para simular roturas de espessura zero, os parâmetros \mathbf{K}_{coh} são escolhidos como um valor extremamente grande para os elementos coesivos para não interferir com as deformações da estrutura. Na abordagem contínua e nas ligações adesivas uma aproximação adequada é fornecida com $K_{nn} = E$, $K_{ss} = G$ e $K_{ns} = 0$.

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{ns} & k_{ss} \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_{\text{coh}} \boldsymbol{\varepsilon} \quad \text{Equação 16}$$

A iniciação do dano sob modo misto pode ser especificada por diferentes critérios. Um desses critérios é o critério quadrático de tensões (Abaqus, 2009).

$$\left\{ \frac{t_n}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1 \quad \text{Equação 17}$$

⟨⟩ são os parêntesis de Macaulay, que indicam que um estado de tensão puramente compressivo não contribui para a iniciação do dano (Jing J, et al., 2009). Após ser atingida a tensão máxima em modo misto, t_m^0 na Fig 77, pelo cumprimento Equação 17, a rigidez do material inicia um processo de degradação. A separação completa (δ_m^f na Fig 77) é prevista por um critério linear energético da forma

$$\frac{G_n}{G_n^c} + \frac{G_s}{G_s^c} = 1 \quad \text{Equação 18}$$

4.2.2 Determinação das propriedades coesivas

A análise efetuada pelos modelos de dano coesivo oferece um meio eficaz para explicar o comportamento não linear das roturas das juntas adesivas. No entanto os parâmetros dos MDC requerem calibrações cuidadosas através de dados experimentais e respetiva validação com a finalidade de simular com precisão o processo de rotura (DuBois, 2004) (Carlberger T e Stigh, 2010). Nos últimos anos, muitos trabalhos foram publicados baseados na definição dos parâmetros do MDC (G_n^c , G_s^c , t_n^0 e t_s^0). Alguns destes trabalhos publicados, que efetuaram experiências utilizando o modo misto e o estimado modo puro dos MDC, usaram os ensaios *Double Cantilever Beam* (DCB) e os ensaios *End-Notched Flexure* (ENF) com bons resultados (Kafkalidis, et al., 2002). O presente modelo de dano coesivo triangular foi usado para simular uma camada de adesivo de espessura=0,2 mm do adesivo Tam Tech Adhesive. A elasticidade do adesivo em modo puro I e II é definida por uma matriz \mathbf{K} que contém os parâmetros de rigidez da camada fina de adesivo dados pelo

módulo elástico E e de corte G . As resistências locais (t_n^0 e t_s^0) e as energias críticas de rotura G_n^c e G_s^c são os parâmetros coesivos restantes que devem ser definidos em modo puro para a caracterização do adesivo. No que diz respeito aos parâmetros do modelo coesivo, G^c é normalmente o parâmetro chave a ser determinado, devido à sua importância na resistência da junta (da Silva, et al., 2012). Neste trabalho, os valores de tenacidade em tração (G_n^c) e corte (G_s^c) não foram obtidos. No entanto uma possível maneira de o fazer seria através da realização de ensaios *Double Cantilever Beam* (DCB) (modo I), e de ensaios *End-Notched Flexure* (ENF) (modo II). No entanto, e como o adesivo utilizado neste trabalho (Tam Tech Adhesive) é um adesivo com características de ductilidade semelhante ao 3M DP 8005, utilizaram-se as propriedades deste adesivo (Pinto, 2009) para os valores de G_n^c e G_s^c (Tabela 11). O módulo de corte G foi obtido a partir da expressão da lei de Hooke para materiais isotrópicos:

$$G = \frac{E}{2*(1+\nu)} \quad \text{Equação 19}$$

Para os valores de tensão de tração t_n e a tensão corte t_s foi utilizado o valor de $\sigma_{\text{máx}}$ médio obtido no ensaio de tração para os provetes de adesivo.

Tabela 11-Propriedades coesivas do adesivo Tam Tech Adhesive.

Módulo de Elasticidade,	E [MPa]	385,44
Módulo de corte,	G [GPa]	148,24
Tensão tração,	t_n [MPa]	6,65
Tensão corte,	t_s [MPa]	6,65
Energia critica modo I,	G_n^c [N/mm] *	1,24
Energia critica modo II,	G_s^c [N/mm]*	2,48

* (Pinto, 2009).

4.3 Distribuição de tensões nas juntas adesivas

Nesta secção analisam-se os campos de tensões na região da sobreposição e as distribuições de tensões de corte e de arrancamento ao longo do comprimento de sobreposição normalizado (x/L_0), para JSS-LS e BS de PTFE, PP e PVC. Em ambos os casos, as tensões dizem respeito a um carregamento puramente elástico dos materiais envolvidos. Para a análise que se segue, foi realizada uma alteração ao nível dos modelos, mais especificamente a substituição dos elementos coesivos do adesivo por elementos elementos sólidos CPE4R.

4.3.1 Juntas *Lap Shear*

As Fig 78 e Fig 79 apresentam as tensões equivalentes de von Mises para as juntas LS de PVC-PVC.

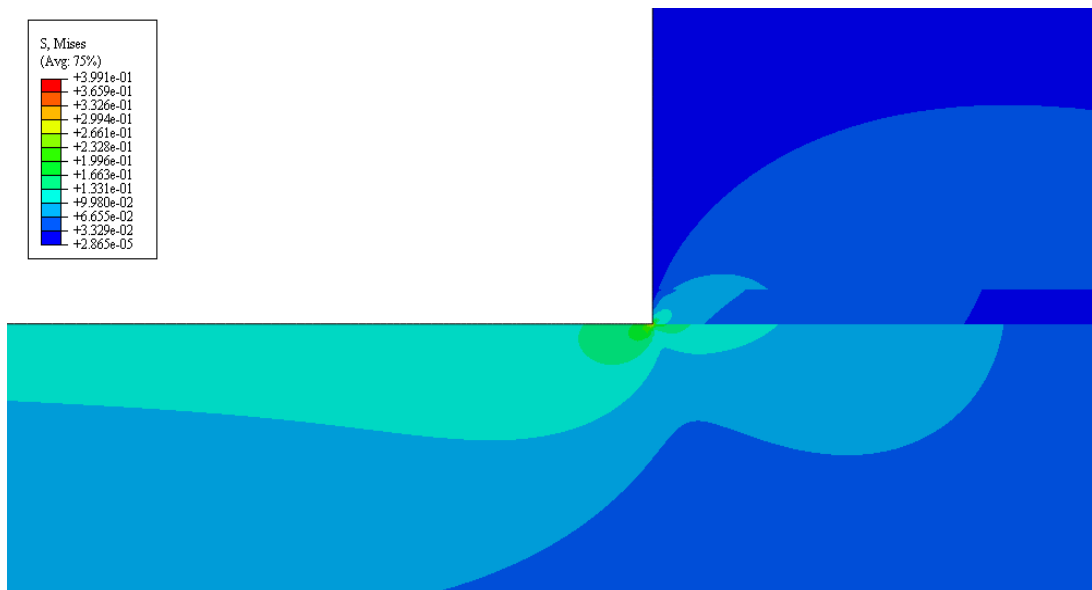


Fig 78-Campo de tensões de von Mises para as juntas LS de PVC (Detalhe numa das extremidades da sobreposição).

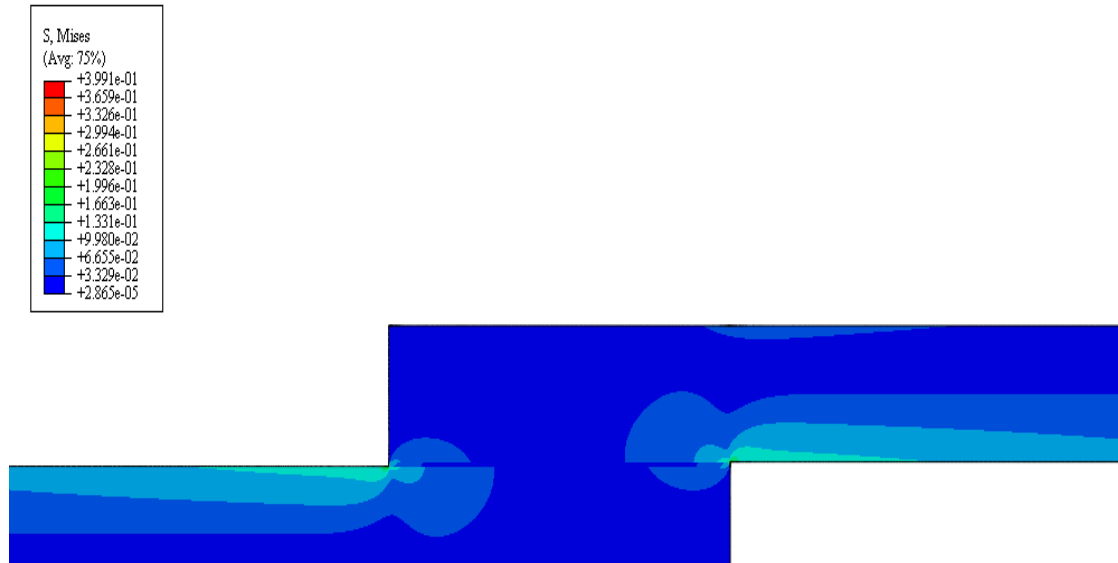


Fig 79-Campo de tensões de von Mises para as juntas LS de PVC.

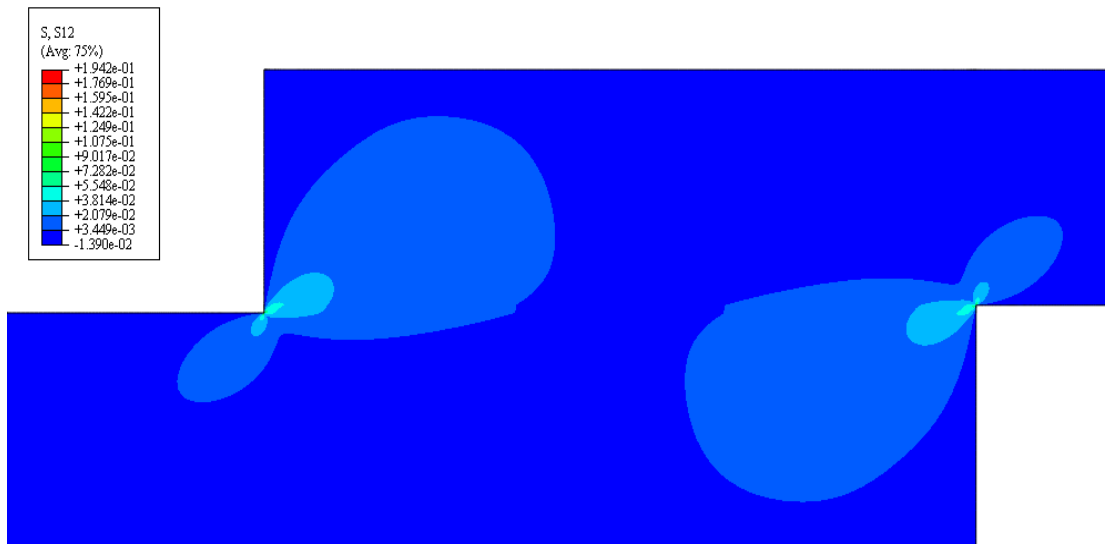


Fig 80-Campo de tensões de corte para as juntas LS de PVC.

Pode-se verificar na Fig 79 que há concentração de tensões acentuadas no adesivo nas extremidades da sobreposição. Na Fig 80 apresenta-se o campo de tensões de corte ao longo do comprimento de sobreposição, onde se observa que existe uma acentuada concentração de tensões nas extremidades, sendo inferiores na zona intermédia. Na Fig 81 mostra-se a distribuição de tensões de corte a meio da espessura do adesivo ao longo do comprimento de sobreposição normalizado pela tensão de corte média ($\tau_{méd}$).

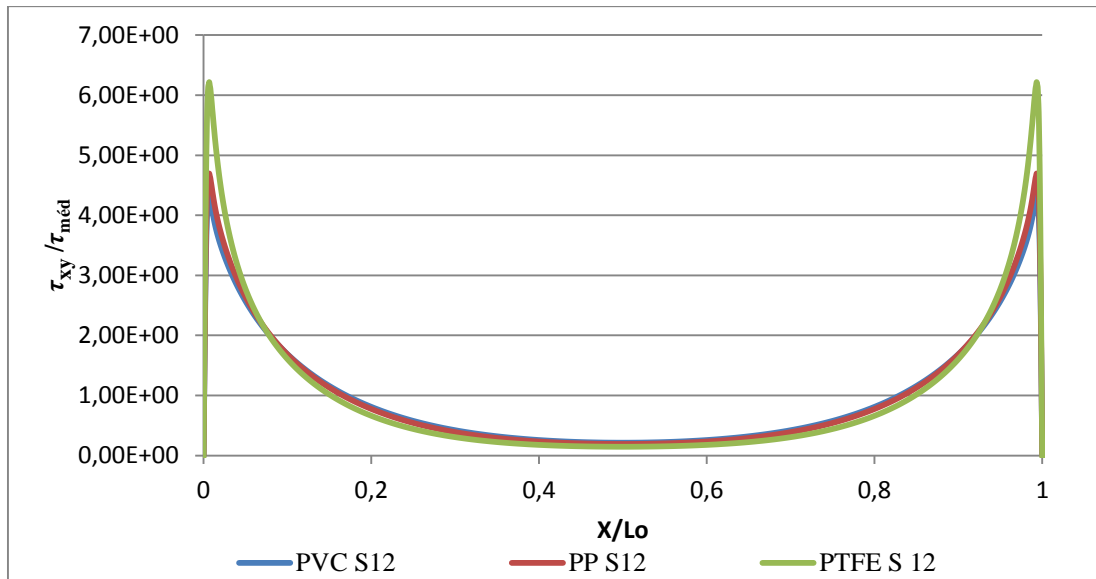


Fig 81-Distribuição de tensões de corte para as juntas LS.

É possível verificar na Fig 81 o efeito da deformação diferencial (Volkersen, 1938) devido à diferente deformação de cada um dos aderentes ao longo da zona de sobreposição. A tensão de corte no adesivo é máxima nas extremidades e mínima no meio. Esta constatação poderá indicar o início do dano nas extremidades da zona de sobreposição propagando-se para o interior (Fig 80). Verifica-se pela análise da Fig 81 que os picos nas extremidades do comprimento de sobreposição são superiores no PTFE seguindo-se o PP e por fim o PVC. Os menores picos de tensão são obtidos para as juntas de PVC e PP, que correspondem às juntas com maior rigidez. Estes resultados apontam para uma tendência de resistência crescente das juntas pela ordem indicada acima (PTFE, PP e PVC) devido à gradual diminuição das tensões de corte nas extremidades de sobreposição, sendo estes os locais da iniciação do dano (Luo, et al., 2007).

Na Fig 82 apresenta-se o campo de tensões de arrancamento para as juntas LS de PVC, podendo se verificar uma acentuada concentração de tensões na extremidade do comprimento de sobreposição. Na Fig 83 apresenta-se a sua distribuição a meio da espessura do adesivo ao longo do comprimento de sobreposição normalizado pela tensão de corte média ($\tau_{méd}$).



Fig 82-Campo de tensões de arrancamento para as juntas LS de PVC (Detalhe numa das extremidades da sobreposição).

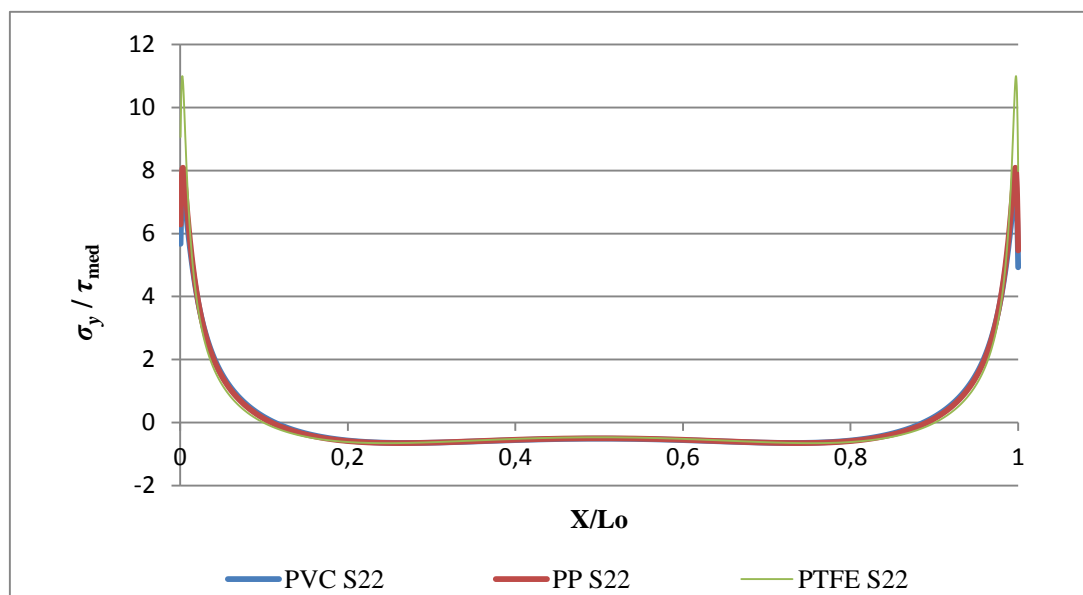


Fig 83-Distribuição de tensões de arrancamento para as juntas LS.

Pela análise da Fig 83 verifica-se que as tensões de arrancamento são praticamente nulas na região interior da zona de sobreposição, apresentando picos nas extremidades bastante elevados. Estes picos de tensões são bastante superiores no PTFE comparativamente ao PP e ao PVC. Tal facto deve-se à menor rigidez do PTFE quando comparada com os outros dois substratos, o que propicia uma maior rotação destas juntas na zona de sobreposição, levando a tensões de arrancamento superiores (Goland M e Reissner, 1944). Devido á

maior rigidez do PP e do PVC, estes apresentam tensões de arrancamento inferiores pois a rotação da junta não é tao elevada. Esta constatação aponta para uma tendência de resistência crescente das juntas pela ordem indicada acima (PTFE, PP e PVC) devido à diminuição das tensões de arrancamento nas extremidades de sobreposição, sendo provavelmente estes os locais da iniciação do dano nestas juntas.

4.3.2 Juntas *Block shear*

As Fig 84 e Fig 85 apresentam as tensões equivalentes de von Mises para as juntas BS de PVC-PVC.



Fig 84-Campo de tensões de von Mises para as juntas BS de PVC (Detalhe numa das extremidades de sobreposição).

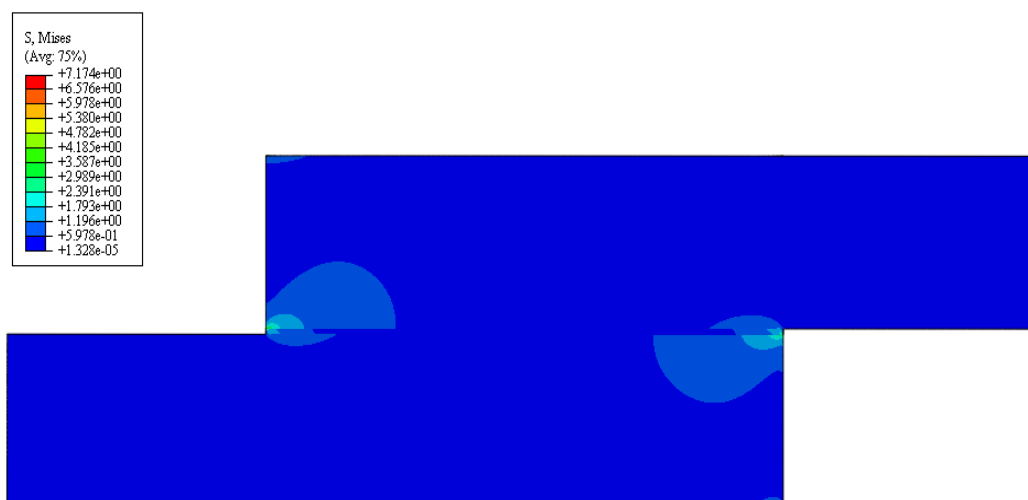


Fig 85-Campo de tensões de von Mises para as juntas BS de PVC.

Pela análise das duas Fig 84 e Fig 85, verifica-se a existência de concentração de tensões no adesivo nas extremidades da sobreposição. Nesta configuração de junta, é eliminada a flexão da junta na zona de sobreposição pois é aplicado um deslocamento numa das extremidades do substrato superior enquanto o substrato inferior se encontra fixo (Fig 75). Devido a este facto será de prever a eliminação quase completa das tensões de arrancamento, que ocorrem nas extremidades das zonas de sobreposição das juntas BS devido à flexão dos substratos.

Na Fig 86 apresenta-se o campo de tensões de corte para as juntas BS de PVC verificando-se que existe uma concentração de tensões nas extremidades da sobreposição sendo inferiores na zona intermédia. Na Fig 87 mostra-se a distribuição de tensões de corte a meio da espessura do adesivo ao longo do comprimento de sobreposição normalizado pela tensão de corte média ($\tau_{méd}$).



Fig 86-Campo de tensões de corte para as juntas BS de PVC.

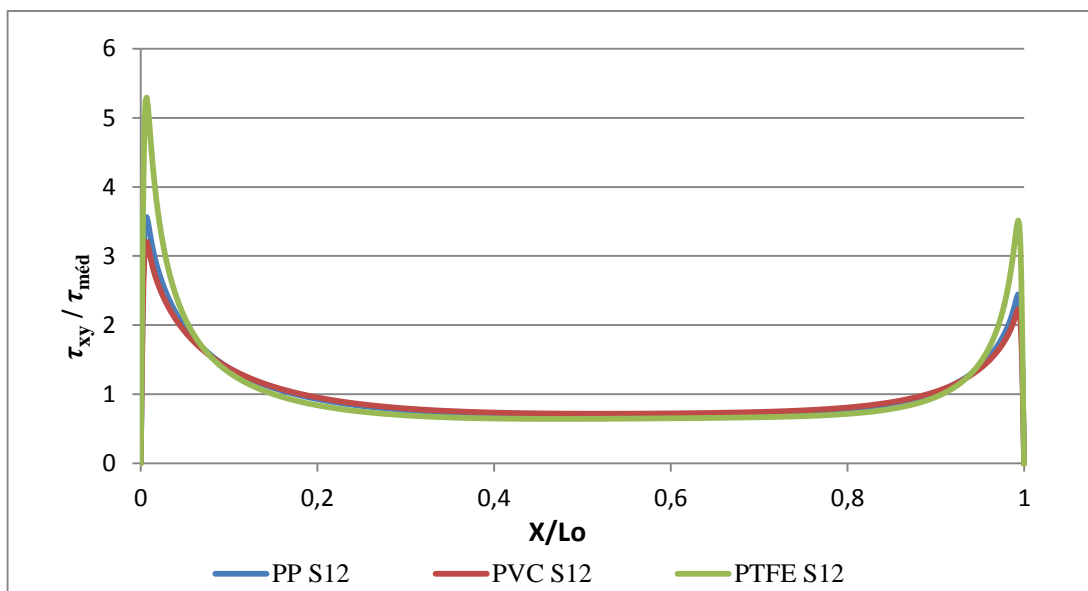


Fig 87-Distribuição de tensões de corte para as juntas BS.

Também nesta configuração BS, podemos verificar que o efeito da deformação diferencial se encontra presente (Volkersen, 1965). As tensões de corte são superiores na extremidade correspondente à aplicação do deslocamento, o que faz com que a rotura inicie nesta extremidade. Também existe nestas juntas uma tendência de resistência crescente das juntas pela ordem indicada (PTFE, PP e PVC) devido à gradual diminuição das tensões de corte nas extremidades de sobreposição.

Na Fig 88 apresenta-se o campo de tensões de arrancamento para as juntas BS de PVC. Na Fig 89 mostra-se a distribuição de tensões de arrancamento a meio da espessura do adesivo ao longo do comprimento de sobreposição normalizado pela tensão de corte média ($\tau_{méd}$).

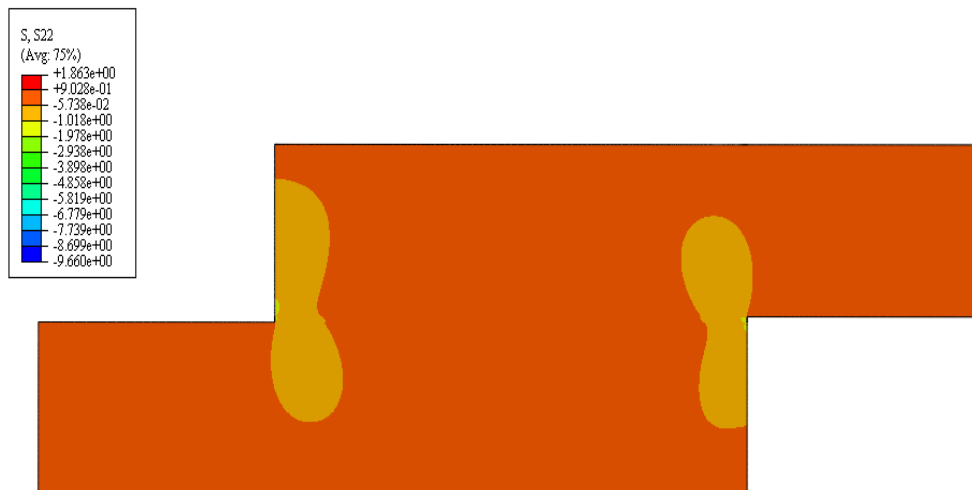


Fig 88-Campo de tensões de arrancamento para as juntas BS de PVC.

Verifica-se pela análise da Fig 89 que as tensões de arrancamento são muito inferiores em magnitude normalizada à $\tau_{méd}$, quando comparadas com as LS (Fig 83). Tal facto deve-se à menor flexão destas juntas, devendo levar por este motivo ao aumento da resistência das juntas BS. Pela análise da Fig 89 verifica-se que as tensões de arrancamento são de tração do lado da carga e de compressão do lado contrário do comprimento de sobreposição, sendo de magnitude muito reduzida ao longo do comprimento de sobreposição. As tensões de arrancamento nas extremidades de sobreposição das juntas com substratos de PTFE são bastante superiores às de PP e de PVC, principalmente na extremidade solicitada. Tal facto deve-se a uma menor rigidez deste substrato, o que leva a uma maior flexão destas juntas na zona de sobreposição. A resistência destas juntas será crescente pela ordem indicada acima devido à gradual diminuição das tensões de arrancamento. O motivo pelo qual as tensões nas extremidades são superiores no lado da carga e de compressão no lado oposto ao da carga deve-se possivelmente à flexão do substrato superior. A aplicação da carga no substrato superior vai provocar tensões de arrancamento de tração nessa zona levando a que o mesmo substrato no movimento de flexão subsequente provoque tensões de arrancamento compressivas do lado oposto ao da carga (Fig 89).

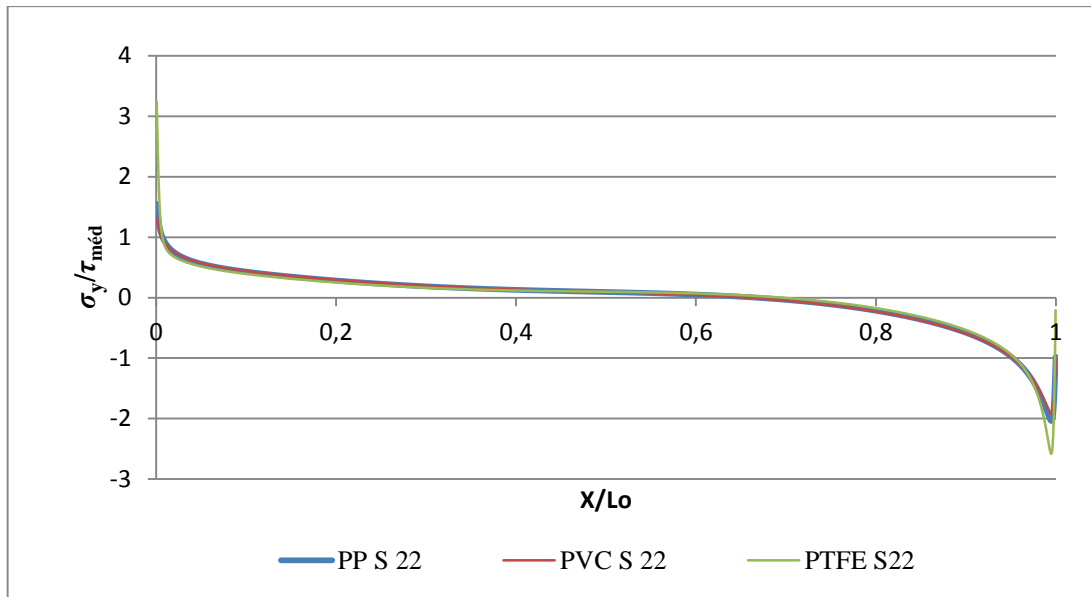


Fig 89-Distribuição de tensões de arrancamento para as juntas BS.

Pela análise das Fig 81 e Fig 87 e também da Fig 83 e Fig 89 verifica-se que os picos nas extremidades das tensões de corte e de arrancamento são superiores nas juntas LS quando comparadas com as juntas BS. Esta constatação aponta para uma tendência de resistência superior das juntas BS quando comparadas com as juntas LS devido às mesmas tensões de corte e de arrancamento nas extremidades de sobreposição serem inferiores em BS quando comparadas com as LS, pois são estes os locais da iniciação do dano (Pinto, 2009).

4.4 Previsão da resistência das juntas

4.4.1 Juntas *Lap Shear*

As Fig 90, Fig 91 e Fig 92 apresentam uma comparação entre as curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas para as juntas LS de PVC, PP e PTFE, respetivamente. Nestas três figuras podemos verificar que o modelo numérico triangular simula corretamente a rigidez inicial das JSS-LS obtidas experimentalmente. Na Fig 90 e Fig 91 verifica-se que o comportamento é linear até à rotura e na Fig 92 tal situação não se verifica pois os substratos sofrem plastificação antes da rotura do adesivo. Neste caso os substratos de PTFE também foram modelados plasticamente. Na simulação numérica, o início e propagação do dano ocorrem apenas no adesivo, pelo que os valores apresentados nas curvas $P-\delta$ pressupõem rotura coesiva.

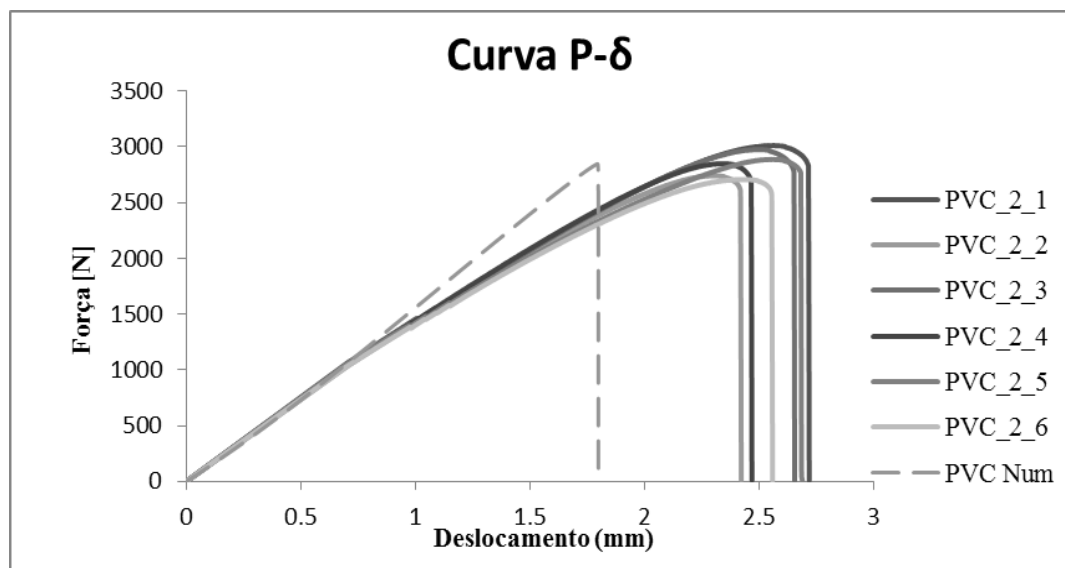


Fig 90-Comparação entre curvas P - δ experimentais e numéricas para as juntas LS de PVC.

Na Fig 90 verifica-se que a força máxima em modo experimental é muito semelhante à obtida numericamente, o que indicia a adequabilidade dos modelos numéricos utilizados na previsão de resistência desta junta. Na Fig 91 verifica-se que a força máxima em modo experimental é ligeiramente inferior ao obtido numericamente (10 %), no entanto a diferença não é muito significativa.

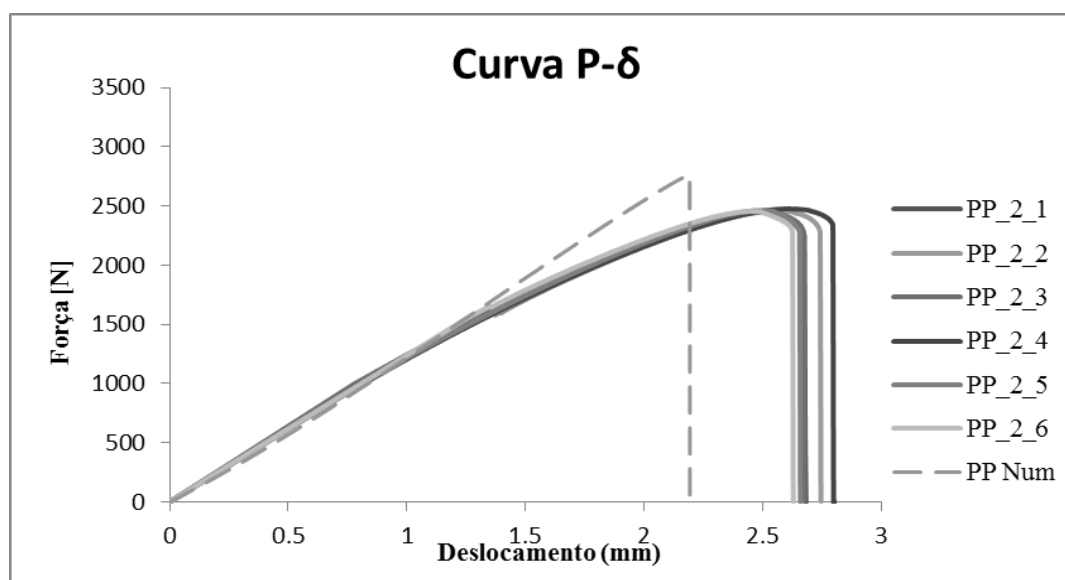


Fig 91-Comparação entre curvas P - δ experimentais e numéricas para as juntas LS de PP.

Na Fig 92 verifica-se que o valor de força máxima atingido no modelo numérico é bastante superior ao valor obtido experimentalmente, o que indicia tipos de roturas diferentes. Experimentalmente nas JSS-LS de PTFE foram obtidas roturas adesivas e mistas com

tendência adesiva (Fig 53 e Fig 54), numericamente obteve-se rotura coesiva, o que justifica o resultado obtido nas curvas $P-\delta$.

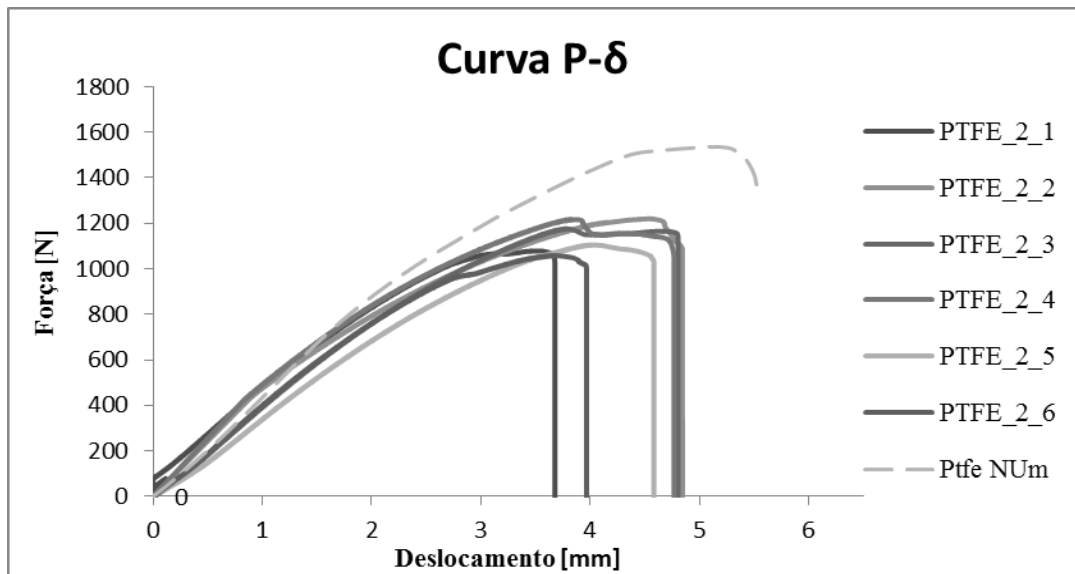


Fig 92-Comparação entre curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas para as juntas LS de PTFE.

Na Fig 93 são apresentados os resultados experimentais médios com o respetivo desvio padrão e previsão numérica de $\tau_{méd}$, para as juntas LS de PTFE, PP e PVC.

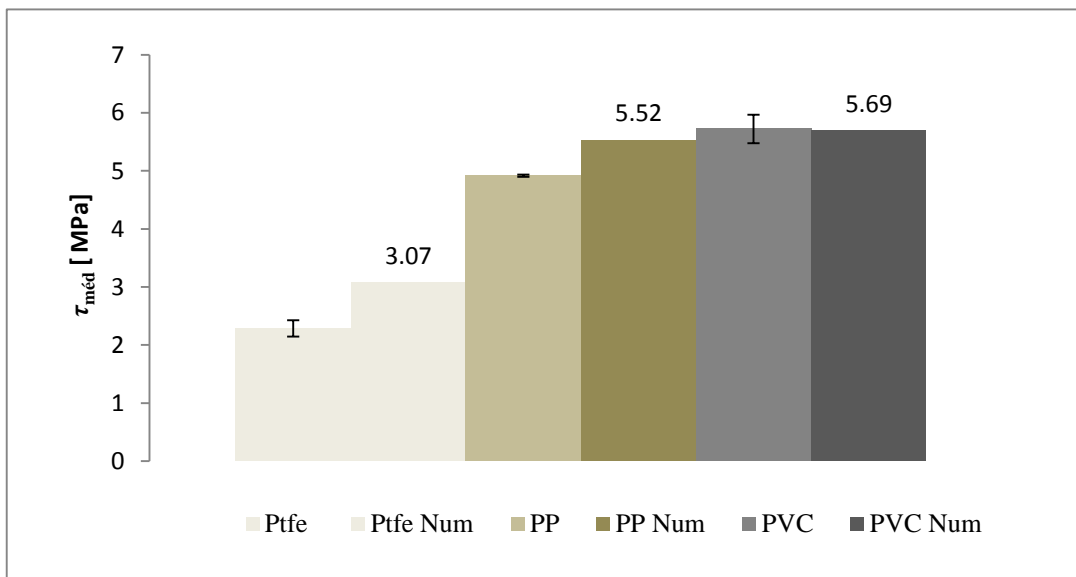


Fig 93-Valores de $\tau_{méd}$ experimentais e numéricos para juntas LS para os diferentes substratos.

Nas simulações numéricas, os valores de $\tau_{méd}$ apresentados pressupõem rotura coesiva. Na Fig 93 verifica-se que os resultados de $\tau_{méd}$ obtidos experimentalmente para os substratos de PVC e PP são muito semelhantes aos obtidos numericamente, e tal ocorreu pois a rotura foi coesiva em ambos os casos. Para os substratos de PTFE os valores de $\tau_{méd}$ experimentais são inferiores em cerca de 30% aos valores obtidos numericamente, o que se justifica porque experimentalmente as roturas são adesivas e mistas com tendência adesiva e numericamente são coesivas. Os valores $\tau_{méd}$ obtidos experimentalmente e numericamente para as juntas LS de PVC e PP são bastante mais elevados quando comparados com os obtidos para as juntas LS de PTFE. Isto deve-se à flexão da junta e ao facto das tensões de arrancamento e de corte serem mais elevadas nas juntas LS de PTFE, o que leva a uma diminuição de resistência da junta.

4.4.2 Juntas *Block shear*

As Fig 94, Fig 95 e Fig 96 apresentam uma comparação entre as curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas para as juntas BS de PVC, PP e PTFE, respetivamente. Na simulação numérica o início e propagação do dano ocorrem apenas no adesivo, pelo que os valores apresentados nas curvas $P-\delta$ pressupõem rotura coesiva. Os substratos de PTFE também foram modelados plasticamente. Nas três figuras seguintes podemos verificar que os valores obtidos numericamente são bastante diferentes dos obtidos experimentalmente. Na Fig 94 e Fig 95 os valores de força máxima experimentais são bastante superiores aos obtidos numericamente (45%). Em ambas as situações (numérico e experimental) as roturas são coesivas. Também nestes dois casos podemos verificar que o modelo numérico triangular não simula corretamente a rigidez das curvas BS. Estas diferenças, no caso da força máxima poderá ser consequência dos valores obtidos de resistência pelos provetes bulk, e no caso da rigidez poderá ser consequência da flexibilidade do dispositivo de corte.

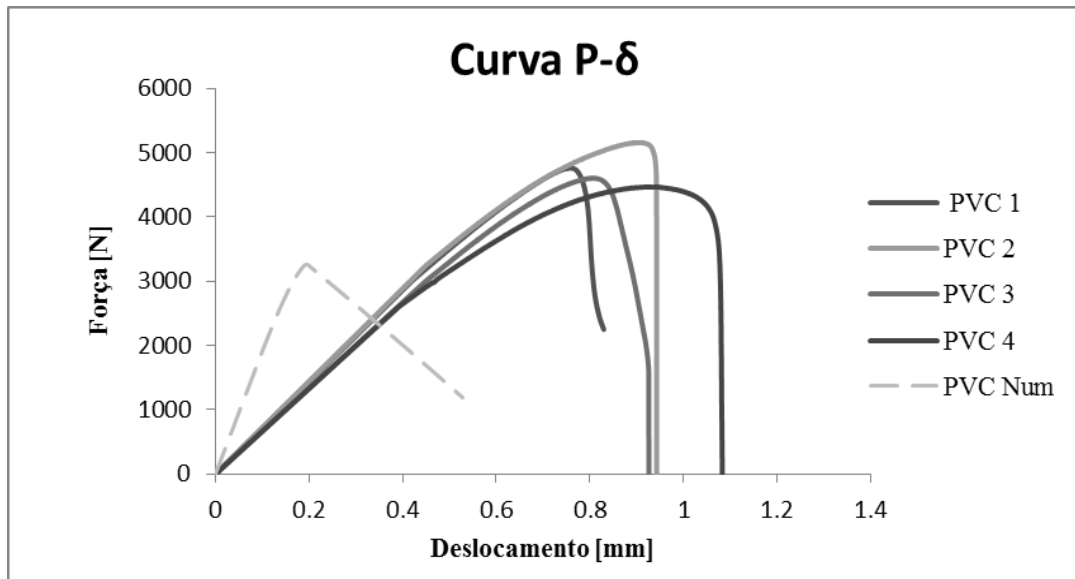


Fig 94-Comparação entre curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas para as juntas BS de PVC.

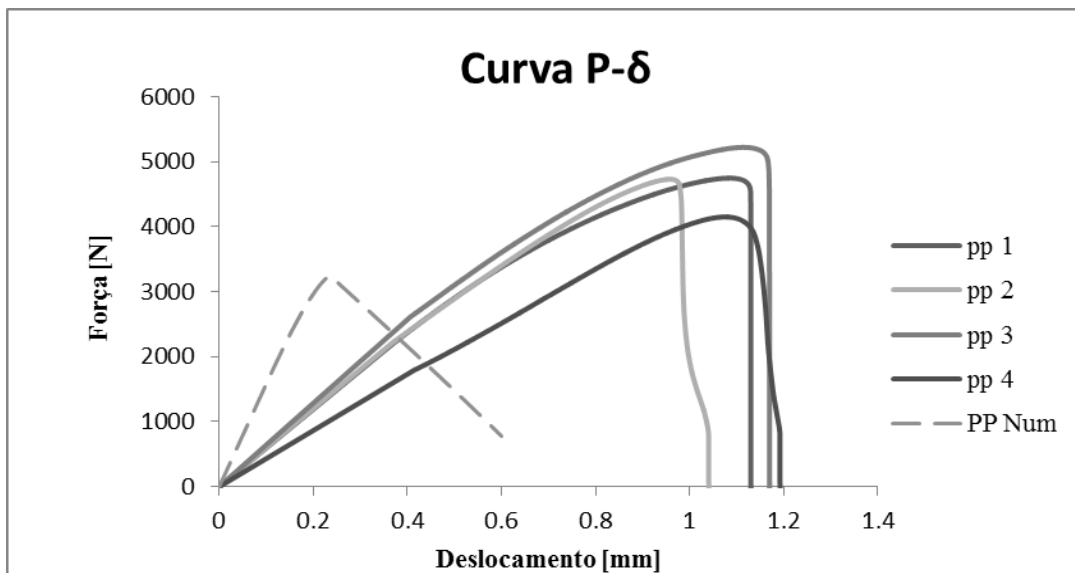


Fig 95-Comparação entre curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas para as juntas BS de PP.

Pela análise da Fig 96 verifica-se que o valor de força máxima atingido no modelo numérico é bastante superior ao valor obtido experimentalmente, o que indicia a existência de tipos de roturas diferentes. Experimentalmente, nas juntas BS de PTFE foram obtidas roturas adesivas (Fig 70) e numericamente obteve-se rotura coesiva, o que vai de encontro ao resultado obtido nas curvas $P-\delta$. Na mesma Fig 96 pode-se verificar que o modelo numérico não simula corretamente a rigidez das curvas BS, situação que poderá ser explicada pela flexibilidade do dispositivo de corte.

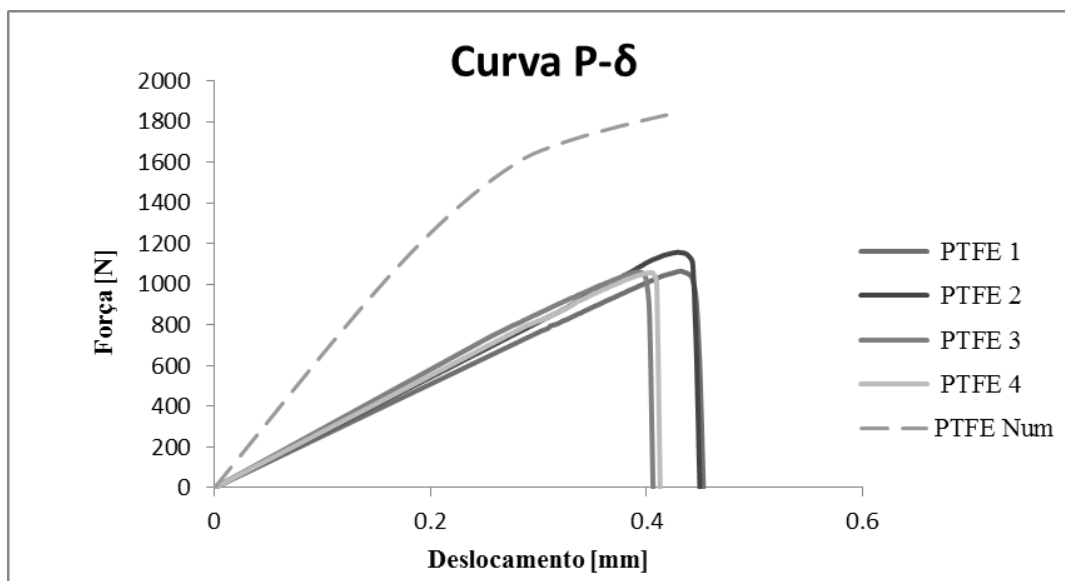


Fig 96-Comparação entre curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas para as juntas BS de PTFE.

Na Fig 97 apresentam-se os resultados experimentais médios com o respetivo desvio padrão e previsão numérica de $\tau_{méd}$, para as juntas BS de PTFE, PP e PVC.

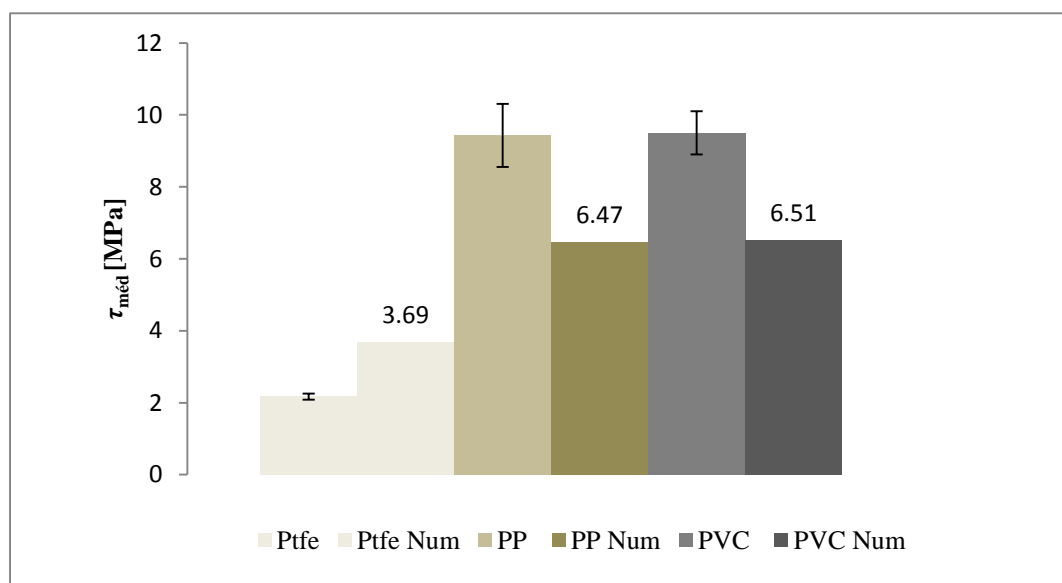


Fig 97-Valores de $\tau_{méd}$ experimentais e numéricos para as juntas BS para os diferentes substratos.

Nas simulações numéricas, os valores de $\tau_{méd}$ apresentados pressupõem rotura coesiva. Pela análise da Fig 97 verifica-se que os resultados de $\tau_{méd}$ obtidos experimentalmente para os substratos de PVC e PP são muito superiores aos obtidos numericamente, provavelmente devido aos valores obtidos de resistência pelos provetes bulk. No que respeita aos substratos de PTFE os valores de $\tau_{méd}$ experimentais são inferiores em cerca de 80% aos

valores obtidos numericamente, o que poderá indiciar a existência de um tipo de rotura diferente, o que efetivamente acontece na prática. Os valores $\tau_{méd}$ obtidos, tanto ao nível experimental como numérico, para as juntas BS de PVC e PP são bastante elevados comparativamente aos obtidos para as juntas BS de PTFE. Tal facto pode ser explicado pelo tipo de rotura obtida nas juntas BS de PTFE - rotura adesiva, e também pela menor rigidez do material em causa, que conduz a uma maior flexão das juntas BS de PTFE e, conseqüentemente, a tensões de arrancamento bastante superiores que diminuem a resistência destas juntas.

Após a análise das Fig 93 e Fig 97 verifica-se que os valores de $\tau_{méd}$ experimentais e numéricos obtidos em juntas BS são superiores aos obtidos em juntas LS para os substratos de PVC e PP. Esta situação deve-se à existência de menores tensões de corte e de arrancamento das juntas BS comparativamente às juntas LS. Nos substratos de PTFE, o valor obtido de $\tau_{méd}$ na simulação numérica para as juntas BS é superior ao obtido para as juntas LS, podendo-se explicar tal facto pelas superiores tensões de corte e de arrancamento existentes nas juntas LS. Para os mesmos substratos, o valor experimental nas juntas BS é muito similar ao obtido nas juntas LS. Tal facto poderá dever-se ao mesmo tipo de roturas obtidas - adesivas.

5 Conclusões e propostas de trabalhos futuros

O trabalho realizado consistiu no estudo de juntas LS e BS de polímeros difíceis de colar, utilizando três tipos de substratos diferentes: PTFE, PP e PVC e para a ligação destes foi utilizado um adesivo da Tamarron - “Tam Tech Adhesive”. Foi utilizada em todas as juntas a mesma espessura dos substratos, 6 mm, o mesmo comprimento de sobreposição, 20 mm e a mesma espessura de adesivo, 0,2 mm. Foi também efetuada uma análise numérica por elementos finitos recorrendo a modelos de dano coesivos triangulares com o objetivo de avaliar e explicar os resultados obtidos à luz das distribuições de tensões na camada do adesivo e efetuar uma previsão da resistência das juntas comparando os valores obtidos numericamente com os resultados experimentais. A análise numérica foi efetuada recorrendo ao *Software ABAQUS*[®].

Nas juntas LS, as roturas obtidas após o ensaio de tração para os substratos de PVC e PP foram todas coesivas. Nos substratos de PTFE, obtiveram-se três roturas mistas mas essencialmente adesivas e três adesivas. Para as juntas LS de PTFE foi também efetuado um tratamento por chama, tendo-se obtido roturas mistas com tendência coesiva. A resistência ao corte obtida nas juntas LS de PVC é a maior de entre os três substratos com 5,75 MPa, seguindo-se as de PP, com 4,91 MPa e por fim as de PTFE, com 2,28 MPa. A resistência ao corte obtida nas juntas LS de PTFE com tratamento por chama foi de 2,69 MPa, o que traduz um aumento de cerca de 18% comparativamente ao valor obtido com o mesmo tipo de juntas sem tratamento. Este facto permite concluir que o tratamento por

chama aumenta a resistência da junta pela melhoria da adesão do adesivo aos substratos de PTFE.

Nas juntas BS, as roturas obtidas após o ensaio para os substratos de PVC e PP foram todas coesivas, sendo as roturas obtidas nas juntas de PTFE todas adesivas. A resistência ao corte obtida nas juntas BS de PVC é a maior com 9,49 MPa, seguindo-se as de PP, com 9,43 MPa e por fim as de PTFE, com 2,18 MPa. Verifica-se assim um aumento de resistência ao corte para as juntas BS de PVC e PP comparativamente às juntas em LS dos mesmos substratos. Quanto às juntas BS de PTFE, estas apresentam um valor muito aproximado às juntas LS. Enquanto nos dois substratos de PVC e PP se verifica um aumento da resistência ao corte nas juntas BS devido às menores tensões de corte e de arrancamento no adesivo, o mesmo não se passa nos substratos de PTFE, possivelmente devido ao mesmo tipo de rotura adesiva obtido tanto em BS como em LS.

Através da análise à resistência ao corte das juntas LS é possível afirmar que a rigidez dos substratos e o tipo de rotura influencia a resistência da junta. Com o adesivo utilizado, as juntas com substratos de PVC, que é o material com maior rigidez, possuem uma resistência ao corte superior. Segue-se o PP, que possui a segunda maior rigidez e a segunda maior resistência ao corte em juntas LS. Ambos possuem o mesmo tipo de rotura - rotura coesiva. Por fim, o PTFE apresenta a menor rigidez, facto que leva a que sejam obtidas maiores tensões de arrancamento na junta, o que tem influência decisiva na resistência ao corte. Estas juntas, com substratos de PTFE, apresentam um modo de rotura diferente das juntas anteriores - rotura adesiva. Devido a estes dois fatores, estas juntas apresentam a menor resistência ao corte. Para as juntas BS apenas o tipo de rotura tem influência decisiva. Nas juntas com substratos de PVC e PP as roturas obtidas são coesivas e as resistências ao corte são muito similares. Nas juntas com substratos de PTFE, os valores de resistência ao corte são bastante inferiores relativamente aos outros dois conjuntos de juntas devido ao tipo de rotura obtida ser adesiva.

Pela análise comparativa das curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas é possível afirmar que as curvas numéricas descrevem de forma aceitável o comportamento das juntas LS experimentais, excetuando nas curvas $P-\delta$ de PTFE. Embora o modelo numérico utilizado simula corretamente a rigidez inicial das juntas LS experimentais, nestas juntas de PTFE a força máxima obtida numericamente é bastante superior ao obtido experimentalmente, o que indicia a existência de roturas diferentes: numericamente a rotura é coesiva sendo a rotura experimental adesiva. Através da análise comparativa das curvas $P-\delta$ experimentais

e numéricas para as juntas BS, o mesmo já não sucede, ou seja as curvas numéricas não descrevem perfeitamente o comportamento das juntas BS experimentais. Aponta-se como possível causa desta discrepância a subestimação da resistência do adesivo.

No geral, pode-se dizer que os modelos numéricos são uma ferramenta que permitem complementar a análise experimental e, neste caso, descrever de uma forma aceitável o comportamento das juntas.

Como sugestões de trabalhos a realizar no futuro apresentam-se os seguintes:

- Produzir provetes de DCB e ENF de adesivo “Tam Tech Adhesive” de forma a determinar os valores de tenacidade em tração (G_n^c) e corte (G_s^c).
- Produzir JSS com substratos poliméricos de PTFE, PP e PVC a outros materiais como o alumínio e compósitos, com a finalidade de estudar o comportamento mecânico do adesivo utilizado neste trabalho, para este tipo de juntas.
- Utilizar um modelo de dano numérico para as juntas BS que permita simular de forma mais precisa o seu comportamento.
- Determinar outras propriedades do adesivo, tais como a temperatura de transição vítrea, propriedades ao corte e à fratura.
- Avaliar o comportamento do adesivo utilizado neste trabalho para diferentes condições como, por exemplo, temperatura e humidade.
- Realizar JSS-LS e BS de PTFE utilizando tratamento por chama, com os parâmetros devidamente ajustados.
- Estudar o efeito da espessura do adesivo na resistência de JSS.

Referências Documentais

Abaqus Documentation. - Vélizy-Villacoublay : Dassault Systèmes, 2009.

Adams R.D e Harris J.A Strengh prediction of bonded single lap joints by nonlinear finite elements methods. [Jornal]. - [s.l.] : Int J Adhes Adhes, 1984. - Vols. 4:65-78.

Adams R.D e Harris J.A The influence of local geometry on the strengh od adhesive joints [Jornal]. - [s.l.] : Int J Adhes Adhes, 1987. - Vols. 7: 69-80.

Adams R.D, Comyn J e Wake W.C Structural adhesive Joints in Engineering [Livro]. - london : Chapman & Hall, 1997.

ASTM D 3163 Standard Test Method for determinig Strength of Adhesively Bonded Rigid Plastic Lap Shear Joints in shear by tension Loading [Relatório]. - 2001.

ASTM D 4501 Standard Test Method for Shear Strength os Adhesive Bonds Between Rigid Substrates by the Block Shear Method [Relatório]. - 2001.

ASTM D 5573 Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber- Reinforced-Plastic (FRP) joints [Relatório]. - 1999.

Barenblatt G.I. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture [Secção do Livro]. - [s.l.] : Adv.Appl. Mech., 1962. - Vols. 7: 55-129.

Bogy D.B ASME [Jornal]. - [s.l.] : J Appl Mech, 1968. - Vol. 35:460.

Campilho R.D.S.G e de Moura M.F.S.F, Domingues, J.J.M.S. Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs [Jornal]. - [s.l.] : Int J Solids Struct, 2008a. - Vols. 45 : 1497-1512.

Campilho R.D.S.G, Banea M.D. e Neto J.A.B.P., da Silva, L.F.M. Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer. [Jornal]. - [s.l.] : Int J Adhes Adhes, 2013. - Vols. 44: 48-56.

Campilho R.D.S.G, de Moura M.F.S.F e Domingues J.J.M.S Modelling single and double-lap repair on composite materials [Jornal]. - [s.l.] : Compos. Sci. Technol., 2005. - Vols. 65:1948-1958.

Campilho R.D.S.G, de Moura M.F.S.F e Domingues J.J.M.S. Numerical prediction on the tensile residual stenght of repaired CFRP under different geometric changes [Jornal]. - [s.l.] : Int.J. Adhes Adhes, 2009a. - Vols. 29: 195-205.

Campilho R.D.S.G. Método de Elementos Finitos [Livro]. - Porto : Publindústria, 2012.

Carlberger T e Stigh U Influence of a layer thickness on cohesive properties of an epoxy-based adhesive-an experimetal study [Jornal]. - [s.l.] : J. Adhesion, 2010. - Vols. 86: 814-833.

- Chang B., Shi Y. e Dong S.** [Jornal]. - [s.l.] : Journal of Materials processing technology, 2000. - Vols. 100: 171-178.
- da Silva L.F.M. e Campilho R.D.S.G** Advances in Numerical Modelling of Adhesive Joints [Livro]. - Porto : Springer, 2012.
- da Silva L.F.M., de Magalhães A.G. e de Moura M.F.S.F.** Juntas Adesivas Industriais [Livro]. - [s.l.] : Publindustria, 2007.
- de Magalhães A.G, de Moura M.F.S.F e Goncalves J.P.M.** Evaluation of stress concentration effects in single-lap bonded joints of laminate composite material [Jornal]. - [s.l.] : Int J. Adhes. Adhes, 2005. - Vols. 25: 313-319.
- de Moura M.F.S.F, de Moraes A.B. e de Magalhães A.G.** Materiais Compósitos, Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico [Livro]. - [s.l.] : Publindústria, 2005.
- Dillard D.A., Singh H. K e Pohlit. D.J** Observations of decreased fracture toughness for mixed mode fracture testing of adhesively bonded joints [Jornal]. - [s.l.] : J. Adhes Sci technol., 2009. - Vols. 23: 515-530.
- Duan K, Hu X e Mai Y.W** Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints. [Jornal]. - [s.l.] : J. Adhes. Sci Technol, 2004. - Vols. 18: 39-53.
- DuBois P.A** Crashworthiness Engineering Course Notes [Livro]. - Livermore : Livermore Software Technology corporation, 2004.
- Dugdale D.S.** Yielding of steel sheets containing slits [Jornal]. - [s.l.] : J. Mech Phys. Solids, 1960. - Vols. 8: 100-104.
- Dupré A.** Théorie Mécanique de la Chaleur [Livro]. - Paris : Gauthier-Villars, 1869.
- Ebnesajjad S.** Adhesives technology Handbook [Livro]. - [s.l.] : William Andrew, 2008. - Vol. 2nd Edition.
- Ensinger GmbH.** Engineering plastics-The Manual [Livro]. - Nufringen : [s.n.], 2000.
- Esteves J.L e Aivazzadeh S.** Analyse numérique et expérimentale d'un assemblage collé en composite en simple recouvrement. [Conferência] // journées nationales sur les composites. - [s.l.] : C. R Dixiemes J nat Campos, 1996. - Vols. 2: 915-923.
- Fox H.W e Zisman W.A.** [Jornal]. - [s.l.] : J Colloid Sci, 1950. - Vol. 5: 514.
- Gilibert Y e Rigolot A.** Left bracket asymptotic analysis of double-lap adhesive-bonded joints loaded inshear tension right bracket. [Jornal]. - [s.l.] : J Méc Appl, 1979. - Vols. 3: 341-372.
- Gleich D.M, Van Tooren M.J.L e Beukers A.** Analysis and evaluation of bondline thickness effects on failure load in adhesively bonded structures [Jornal]. - [s.l.] : J. Adhes Sci Technol., 2001. - Vols. 15: 1091-1101.
- Goland M e Reissner E** The stresses in cemented joints [Jornal]. - [s.l.] : ASME J Appl Mech, 1944. - Vols. 7: A-17.

- Groth H.L** Stress singularities and fracture at interface corners in bonded joints [Jornal]. - [s.l.] : int. J. Adhes, 1988. - Vols. 8: 107-113.
- Hart-Smith L.J** Adhesive Bonded single lap Joints. [Livro]. - [s.l.] : NASA Contractor report 112235, 1973.
- Hashemi S, Kinloch A.J e Williams J.G** Corrections needed in double cantilever beam tests for accessing the interlaminar failure of fibre composites [Jornal]. - [s.l.] : J. Mater Sci Lett, 1989. - Vols. 8: 125-129.
- ISO 527-3** Plastics- Determination of tensile properties [Relatório]. - 2003.
- ISO 868** Plastics and Ebonite- Determination of indentation hardness by means of a durometer [Relatório]. - 2003.
- Ji G , Ouyang Z, Li G e Ibekwe S, Pang S S** Effects of adhesive thickness on global and local Mode- I interfacial fracture of bonded joints [Jornal]. - [s.l.] : Int J Solids Struct, 2010. - Vols. 47: 2445-2458.
- Jing J Gao F e Johnson J lian FZ, Williams RL, Qu J.** Simulation of dynamic fracture along solder-pad interfaces usinga cohesive zone model [Jornal]. - [s.l.] : Eng. Failure Anal, 2009. - Vols. 16: 1579-1586.
- John S.J, Kinloch A.J e MATtthews F.L** Measuring and predicting the durability of bonded fibre/ epoxy composite joints [Jornal]. - [s.l.] : composites, 1991. - Vols. 22: 121-127.
- Kafkalidis M.S e Thouless M.D.** The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-Shear joints [Jornal]. - [s.l.] : Int J. Solids Struct., 2002. - Vols. 39: 4367-4382.
- kinloch A.J.** Adhesion and adhesives: Science and technology [Livro]. - [s.l.] : Chapman & Hall, 1987.
- Lewallen C.S.** The Water Strider [Jornal]. - [s.l.] : Durhan Herald-Sun, 1998.
- Liljedahl C.D.M, Crocombe A.D e Wahab M.A. Ashcroft, I.A.** Damage modelling of adhesively bonded joints [Jornal]. - [s.l.] : Int. J. fract, 2006. - Vols. 141: 147-161.
- Luo Q e Tong L.** Fully-coupled nonlinear analysis of single lap adhesive joints. [Jornal]. - [s.l.] : Int J of Solids and Structures, 2007. - Vols. 44: 2349-2370.
- Ojalvo I.U e Eidinnoff H.L.** Bond Thickness effects upon stresses in single -lap adhesive joints [Jornal]. - [s.l.] : AIAA Journal, 1978. - Vols. 16: 204-211.
- Oplinger DW.** Effects of adherend deflections in single lap joints. [Jornal]. - [s.l.] : Int J solids Struct, 1994. - Vols. 31: 2565-2587.
- Pardoen T, Ferracin T e landis C.M Delannay F.** Constraint effects in adhesive joint fracture [Jornal]. - [s.l.] : J. Mech. Phys. Solids, 2005. - Vols. 53: 1951-1983.
- Petrie Edward M.** Handbook of Adhesives and sealants. [Livro]. - [s.l.] : McGraw-Hill, 2000. - Vol. 2nd Editions.

- Pinto A.M.G.** Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos [Livro]. - Porto : [s.n.], 2009. - Vols. PHd, Thesis.
- Rice J.R e Rosengren G.F.** Plane strain deformation near a crack tip in a powerlaw hardening material [Jornal]. - [s.l.] : J. Mech. Phys. Solids, 1968. - Vols. 16: 1-12.
- Sept J.K e Fernlund G** Failure load prediction [Jornal]. - [s.l.] : Int J. Adhes, 1991. - Vols. 11: 213-227.
- Simona AG.** Engineered from post-chlorinated PVC for exceptional performance [Livro]. - Teichweg 16 : [s.n.], 2008.
- Song S.H e Paulino G.H. Buttlar, W.G** A bilinear cohesive zone model tailored for fracture of asphalt concrete considering viscoelastic bulk material [Jornal]. - [s.l.] : Eng. fract Mech, 2006. - Vols. 73: 2829-2848.
- Taib A.A, Boukhli R. e Achiou S., Gordon, S, Boukehili, H.** Bonded joints with composite adherends. Part I. Effect of specimen configuration, adhesive thickness, spew fillet and adherend stiffness on fracture. [Jornal]. - [s.l.] : Int J Adhe. Adhe, 2006. - Vols. 26: 226-236.
- Tong L e Steven GP.** Analysis and design of structural bonded joints [Livro]. - [s.l.] : Kluwer Academic, 1999.
- Tsai M.Y, Oplinger D.W e Morton J** Improved theoretical solutions for adhesive lap joints. [Jornal]. - [s.l.] : J Eng Appl SCi, 1998. - Vols. 12: 1163-1185.
- Tvergaard V e Hutchinson J.W** The relation between crack growth resistance and fracture process parameters in elastic-plastic solids. [Jornal]. - [s.l.] : J Mech. Phys. Solids , 1992. - Vols. 40: 1377-1397.
- Volkersen O** Construction Métallique [Livro]. - 1965. - Vols. 4:3-13.
- Volkersen O.** Luftfahrtforschung [Livro]. - 1938. - Vols. 15: 41-47.
- Xie D e Waas A.M.** Discrete cohesive zone model for mixed-mode fracture using finite element analysis. [Jornal]. - [s.l.] : Eng. Fract. Mech, 2006. - Vols. 73: 1783-1796.
- Xu J.Q e Liu Y.H, Wang, X.G** Numerical methods for the determination of multiple stress singularities and related stress intensity coefficients [Jornal]. - [s.l.] : Eng. Fract Mech, 1999. - Vols. 63 : 775-790.
- Yang Q.D e Thouless M.D. Ward, S.M.** Elastic-Plastic mode II fracture of adhesive joints. [Jornal]. - [s.l.] : Int J. Solids Struct., 2001. - Vols. 38: 3251-3262.
- Young T.** Trans Roy Soc. [Secção do Livro]. - 1805.

Anexo A Ficha Técnica PTFE

Fluorseals PTFE Unfilled

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	2.15 - 2.18 g/cc	0.0777 - 0.0788 lb/in ³	DIN 53479
Deformation	14.0 %	14.0 %	14 MPa, 100 h, 23°C; ASTM D621-59
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Shore D	55.0 - 59.0	55.0 - 59.0	DIN 53505
Ball Indentation Hardness	27.0 - 32.0 MPa	3920 - 4640 psi	DIN 53456
Tensile Strength at Break	20.0 - 40.0 MPa	2900 - 5800 psi	ASTM 1457-69 T
Elongation at Break	250 - 500 %	250 - 500 %	ASTM 1457-69 T
Tensile Modulus	0.750 GPa	109 ksi	DIN 53457
Flexural Strength	14.0 MPa	2030 psi	3.5% Flexural Stress; DIN 53452
Compressive Strength	10.0 MPa	1450 psi	1% Yield Point; DIN 53454
Izod Impact, Unnotched (ISO)	18.0 MPa NB	2610 psi NB	10% Yield Point; DIN 53454 DIN EN ISO 197 397
Coefficient of Friction	0.230 - 0.270	0.230 - 0.270	v = 1 m/s
Abrasion	0.250 - 0.280 4.00	0.250 - 0.280 4.00	v = 1.9 m/s mm of depth after 5 hrs load duration; Partner Material ST 50
Torsional Stiffness	160 MPa	23200 psi	DIN 53447
Izod Impact, Notched (ISO)	16.0 kJ/m ²	7.61 ft-lb/in ²	DIN EN ISO 197 397
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Volume Resistivity	1.00e+18 ohm-cm	1.00e+18 ohm-cm	DIN 53482
Surface Resistance	1.00e+17 ohm	1.00e+17 ohm	DIN 53482
Dielectric Constant	2.10 @Frequency 50.0 - 100 Hz	2.10 @Frequency 50.0 - 100 Hz	DIN 53483
Dielectric Strength	50.0 - 80.0 kV/mm	1270 - 2030 kV/in	0.2 mm, VDE 0303 Part 2
Dissipation Factor	<= 0.000100 @Temperature -50.0 - 200 °C, Frequency 1000 - 100000 Hz	<= 0.000100 @Temperature -58.0 - 392 °F, Frequency 1000 - 100000 Hz	DIN 53483
	0.0000300 @Frequency 1000 Hz	0.0000300 @Frequency 1000 Hz	DIN 53483
	0.0000500 @Frequency 50 Hz	0.0000500 @Frequency 50 Hz	DIN 53483
	0.0000700 @Frequency 1e+6 Hz	0.0000700 @Frequency 1e+6 Hz	DIN 53483
Comparative Tracking Index	>= 600 V	>= 600 V	VDE 0303 Part 1/9.64
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear	160 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 100 °C	88.9 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 212 °F	DIN 52328
	195 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 200 °C	108 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 392 °F	DIN 52328

Anexo B Ficha Técnica PP

Technical Data Sheet PP-DWU AlphaPlus®

SIMONATrade name: **PP-DWU AlphaPlus®**

Revision: 22.11.2012

Date of printing: 16.10.2013

PP-DWU AlphaPlus®	
Data sheet update	22.11.2012
Moulding compound extruded	PP-H,ECH,16-09-003
Extruded to moulding compound standard	DIN EN ISO 1873, Teil 1
Moulding compound pressed	PP-H,QCH,16-09-003
Pressed to moulding compound standard	DIN EN ISO 1873, Teil 1
Density, g/cm ³ , DIN EN ISO 1183	0.915
Yield stress, MPa, DIN EN ISO 527	33
Elongation at yield, %, DIN EN ISO 527	8
Tensile modulus of elasticity, MPa, DIN EN ISO 527	1700
Impact strength, KJ/m ² , DIN EN ISO 179	without break
Notched impact strength, kJ/m ² , DIN EN ISO 179	9
Ball indentation hardness, MPa, DIN EN ISO 2039-1	70
Shore hardness D (15 s), DIN EN ISO 868	72
Mean coefficient of linear thermal expansion, K ⁻¹ , DIN 53752	1,6 × 10 ⁻⁴
Fire behaviour DIN 4102	DIN 4102 B2 normal flammability (self-assessment without test certificate)
Dielectric strength, kV/mm, DIN IEC 60243-1	52
Surface resistivity, Ohm, DIN IEC 60093	10 ¹⁴
Temperature range, °C	0 to +100
Physiological safety in accordance with BfR (German Federal Institute for risk valuation)	yes
Physiological safety in accordance with EU	yes
Physiological safety in accordance with FDA	yes

The data presented in this section are to be seen as a guide and may vary depending on the processing method and test specimen used. In general, the figures are averages of tests performed on extruded sheets with a thickness of 4 mm. In the case of sheets manufactured by means of pressing, testing is generally performed on sheets with a thickness of 20

Anexo C Ficha técnica PVC

Technical Data Sheet PVC-C CORZAN Industrial Grade (pressed)

SIMONA
Trade name: **PVC-C CORZAN Industrial Grade (pressed)**

Revision: 25.02.2013

Date of printing: 16.10.2013

	PVC-C CORZAN Industrial Grade (pressed)
Data sheet update	25.02.2013
Moulding compound pressed	PVC-C, QP, 106-25-T28
Pressed to moulding compound standard	Based on DIN EN ISO 1163-1
Density, g/cm ³ , DIN EN ISO 1183	1.500
Yield stress, MPa, DIN EN ISO 527	60
Elongation at yield, %, DIN EN ISO 527	3
Tensile modulus of elasticity, MPa, DIN EN ISO 527	2500
Impact strength, KJ/m ² , DIN EN ISO 179	without break
Notched impact strength, kJ/m ² , DIN EN ISO 179	8
Shore hardness D (15 s), DIN EN ISO 868	80
Mean coefficient of linear thermal expansion, K ⁻¹ , DIN 53752	0,7 x 10 ⁻⁴
Vicat B, °C	107
Fire behaviour DIN 4102	DIN 4102 B1 low flammability (self-assessment without test certificate)
Surface resistivity, Ohm, DIN IEC 60093	10 ¹⁵
Temperature range, °C	-40 to +95
Physiological safety in accordance with BfR (German Federal Institute for risk valuation)	no
Physiological safety in accordance with EU	no
Physiological safety in accordance with FDA	no

The data presented in this section are to be seen as a guide and may vary depending on the processing method and test specimen used. In general, the figures are averages of tests performed on extruded sheets with a thickness of 4 mm. In the case of sheets manufactured by means of pressing, testing is generally performed on sheets with a thickness of 20

Anexo D Ficha Técnica do Adesivo Tamarron



Ph: 800-277-3207 Fax: 888-845-9491
www.tamarrontechnology.com

Tam Tech Adhesive

(Adhesive For "Hard To Bond" Materials)

"No Special Surface Preparation or Heat Treatment Necessary"

Product Description:

Tam Tech Adhesive is one of the top performing adhesives in the industry. It is a very high performance structural adhesive designed to work with "hard to bond" materials like: HDPE (high density polyethylene), LDPE (low density polyethylene), PE, polypropylene, ABS, nylon, Teflon, rubber, TPE's (like Santoprene), polycarbonate, fiberglass, PVC and it bonds to concrete, steel, aluminum and glass. It is a modified polymer in a proprietary formulation supplied in a 10-1 ratio with cartridges.

Features & Benefits:

- One of top adhesives in the industry
- Bonds polyethylene & polypropylene
- Bonds dissimilar materials
- No special surface preparation necessary
- Very good chemical resistance
- Excellent resistance to water
- Replaces mechanical fasteners

Technical Data:

- VOC Content: 0 % (no solvents)
- Viscosity: Part A & Part B – 20,000 cps
- Color: Part A - White, Part B - Black, Mixed - Gray
- Pot Life/Working time: 3 minutes at 72 degrees F (22 degrees C)
- Time To Handling Strength: 2-3 hours at 72 degrees F (22 degrees C)
- Shore D Hardness: 60

Cured Materials

Lap Shear Strength (ASTM D1002)

<u>Cured Materials</u>	<u>lbs/square inch at 75 degrees F</u>	
	<u>24 Hours</u>	<u>48 Hours</u>
HDPE TO HDPE	163	880
ABS to ABS	280	685
Polypropylene to Polypropylene	105	780
Nylon to Nylon	228	310
Polycarbonate to Polycarbonate	288	632
Teflon to Teflon	205	212
Styrene to Styrene	184	337
Steel to Steel	335	1258
Aluminum to Aluminum	320	1025
PVC to PVC	203	1280

Tam Tech Adhesive will also bond combinations of the materials listed above in the chart.