

• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Análise do efeito do “taper” na resistência de juntas coladas

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projecto

Autor

Hugo Filipe Oliveira Pinto Santos

Orientadores

Ana Paula Bettencourt Martins Amaro

Altino de Jesus Roque Loureiro

Júri

Presidente Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor Paulo Nobre Balbis dos Reis
Professor Auxiliar da Universidade da Beira Interior
Professor Doutor António Mário Henriques Pereira
Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Leiria

Orientador Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro
Professor Associado c/ Agregação da Universidade de Coimbra

Coimbra, Fevereiro, 2015

Eu sei o preço do sucesso: dedicação, trabalho duro e uma incessante devoção

às coisas que você quer ver acontecer

Frank Lloyd Wright

À minha família e à minha namorada.

Agradecimentos

A realização desta tese de mestrado marca o culminar de uma etapa na minha formação académica. Este trabalho só foi possível com a ajuda de diversos intervenientes aos quais fico muito grato.

Agradeço desde já a esta grande instituição que é a Universidade de Coimbra, em particular ao Departamento de Engenharia Mecânica e todos os grandes integrantes, pela contribuição para a realização deste trabalho.

À Professora Doutora Ana Amaro e ao Professor Doutor Altino Loureiro o meu sincero obrigado por todo o apoio, total disponibilidade e conhecimentos transmitidos.

Ao Professor Doutor Mário pela disponibilidade e ajuda durante a realização das colagens.

À minha família pela compreensão e amor incondicional que demonstraram apesar de não estar presente tanto tempo como desejado.

À Tânia, minha namorada, um especial obrigado pelo carinho que sempre demonstrou, amor e compreensão mesmo quando estava ausente, estando fisicamente presente.

Resumo

Este trabalho tem por objetivo estudar a influência de diferentes geometrias de colagem na resistência mecânica de juntas coladas sobrepostas. As diferentes geometrias são alcançadas com a introdução de um “*taper*” no adesivo ou no aderente. O trabalho visa determinar se a utilização de diferentes ângulos de “*taper*” (30°, 45° e 60°) altera a resistência das juntas. São ainda consideradas neste estudo juntas coladas sem modificação na geometria para servirem de referência. O adesivo utilizado é o Araldite 420 A/B e os aderentes são na liga de alumínio 5083-H111.

A análise da resistência mecânica foi realizada através de ensaios de tração. Os ensaios foram realizados em máquina de tração universal e os deslocamentos captados com um equipamento de extensometria ótica que utiliza a técnica de correlação de imagem digital (DIC).

Foi efetuada a análise da morfologia do adesivo após a rotura dos provetes com recurso a microscópio eletrónico de varrimento (SEM). Nos provetes sem “*taper*” as roturas ocorreram por falha de coesão e adesão. Na maioria dos restantes provetes testados as roturas ocorreram por falha de adesão.

O sistema ótico permitiu verificar que a concentração de tensões localizou nas extremidades das juntas. A rotura, no geral, iniciou-se nas extremidades e propagou-se até ao meio da junta.

Através do estudo efetuado concluiu-se que a resistência das juntas coladas aumentou apenas no caso dos provetes com “*taper*” em adesivo invertido. Contudo, esse aumento foi apenas na ordem de 10%.

Palavras-chave: Juntas coladas, Geometrias de juntas, Ângulos de “*taper*”, Roturas por adesão e coesão, Ensaios Tração.

Abstract

The main objective of this work is to study the influence of different bonding geometries on the mechanical strength of bonded single lap joints. The different geometries were obtained by introducing tapers produced either with the adhesive itself or in the adherents. This work focus on determine if the usage of different taper angles (30° , 45° e 60°) increases the mechanical strength of the bonded joints.

Single bonded lap joints without any taper were also analyzed and used as reference. Araldite 420 A/B was used as adhesive and the adherents are made of 5083-H111 aluminum alloy plate of 4mm thick.

The mechanical strength of bonded joints was evaluated using tensile/shear test, done, in universal tensile testing machine provided with a digital image correlation (DIC) system to strain mapping.

After breaking the surface of specimens was analyzed using a scanning electron microscope (SEM).

The mechanism of rupture on bonded specimens without any taper was a mix of cohesion and adhesion. In the majority of the other specimens rupture was by adhesion failure.

The stress singularities were located at the joint overlaps endings. The ruptures, mostly, was initiated at the overlap endings and propagated through to the middle of the overlap.

The mechanical strength of the bonded joints increased only for the adhesive inverted taper, however the increase was of only about 10%.

Keywords Bonded Joints, Joints Geometries, Taper angles, Ruptures for adhesion and cohesion, Tensile/Shear testing

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xv
Simbologia e Siglas	xvii
Simbologia.....	xvii
Siglas	xvii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ESTADO DA ARTE	3
2.1. Contexto Histórico	3
2.2. Polímeros	4
2.3. Adesão e Coesão	5
2.3.1. Teorias da Adesão	5
2.4. Condicionantes da Resistência de uma Junta Colada	7
2.4.1. Preparação da Superfície	9
2.5. Classificação dos Adesivos.....	9
2.6. Distribuição de Tensões nas Juntas Coladas.....	10
2.6.1. Análise Bi-dimensional Elástica.....	10
2.6.2. Análise Bi-dimensional Elasto-plástica.....	13
2.7. Vantagens das juntas coladas.....	15
2.8. Principais Conclusões	16
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	19
3.1. Materiais	19
3.1.1. Aderentes	20
3.1.2. Adesivo.....	20
3.2. Preparação da Junta e Colagem	21
3.3. Ensaio de Tração	22
4. RESULTADOS	25
4.1. Morfologia dos provetes	25
4.2. Rotura dos provetes	28
4.2.1. Provetes Sem “ <i>taper</i> ”	28
4.2.2. Provetes Com “ <i>taper</i> ” em Adesivo	28
4.2.3. Provetes Com “ <i>taper</i> ” no Aderente.....	30
4.2.4. Provetes Com “ <i>taper</i> ” de Adesivo Invertido.....	30
4.3. Morfologia da superfície de rotura	32
4.4. Morfologia da superfície de rotura em alta definição.....	37
4.5. Resistência estática de juntas coladas	40
4.6. Deformações Globais.....	47
4.7. Deformações locais.....	48
4.7.1. Provetes sem “ <i>taper</i> ”	50
4.7.2. Provetes com “ <i>taper</i> ” em adesivo	51

4.7.3. Provetes com “taper” em alumínio	52
4.7.4. Provetes com “taper” invertido	53
5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS.....	55
5.1. Conclusões.....	55
5.2. Propostas para futuros trabalhos.....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
ANEXO A.....	61
APÊNDICE A – Média de áreas de sobreposição	67
APÊNDICE B – Rotura dos provetes	69
APÊNDICE C – Superfícies dos provetes após rotura	73
APÊNDICE D – Forças Máximas, Média e desvio padrão dos resultados.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Aplicação de “ <i>taper</i> ” numa junta colada.	1
Figura 2.1. Molhagem de uma superfície (Loureiro, 1995).	6
Figura 2.2. Zonas de concentração de tensões em junta sobreposta simples.	8
Figura 2.3. - Tensões numa junta colada sobreposta.	10
Figura 2.4. (a)- Quadrado, (b)- Meio triangular, (c)- Triangular, (d)- Meio redondo, (e)- Redondo, (f)- Redondo com fillet, (g)- Oval, (h)- Com raio.....	11
Figura 2.5. Distribuição de tensões ao longo do comprimento de sobreposição de uma junta colada.....	12
Figura 2.6. Modo típico de iniciação de falha.	13
Figura 2.7. Diferentes geometrias de “ <i>taper</i> ”: (a)- quadrado, (b)- no aderente, (c)- invertido, (d)- no adesivo, (e)- no adesivo e aderente.	14
Figura 3.1. Geometria dos provetes: (a) Sem “ <i>taper</i> ”, (b) Taper no aderente, (c) Taper de adesivo invertido, (d) Taper no adesivo.	19
Figura 3.2. “ <i>Gabarits</i> ” utilizados para garantir o 20mm de comprimento de sobreposição entre aderentes.	22
Figura 4.1. Alguns dos provetes após colagem.	25
Figura 4.2. Provede desalinhado.	26
Figura 4.3. Falta de adesivo num provede com “ <i>taper</i> ” no adesivo.....	26
Figura 4.4. Distribuição não uniforme do adesivo.	27
Figura 4.5. Rotura do provede sem “ <i>taper</i> ”.	28
Figura 4.6. Rotura do provede com “ <i>taper</i> ” em adesvio de 30°. Na figura é apresentada a escala de deformação.....	29
Figura 4.7. Rotura do provede com “ <i>taper</i> ” em adesivo de 45°.	29
Figura 4.8. Rotura do provede com “ <i>taper</i> ” em adesivo de 60°.	30
Figura 4.9. Rotura do provede com “ <i>taper</i> ” no aderente de 30°.	30
Figura 4.10. Rotura do provede com “ <i>taper</i> ” invertido de 30°.	31
Figura 4.11. Rotura do provede com “ <i>taper</i> ” invertido de 45°.	31
Figura 4.12. Superfície de rotura mista do provede 2 sem “ <i>taper</i> ”.....	33
Figura 4.13. Superfície de rotura mista do provede 2 com “ <i>taper</i> ” no adesivo de 30°.....	34
Figura 4.14. Rotura mista no provede 1 com “ <i>taper</i> ” em adesivo de 60°.....	34
Figura 4.15. Rotura por adesão no provede 1 com “ <i>taper</i> ” em alumínio de 30°.	35

Figura 4.16. Rotura por adesão no provete 2 com “taper” invertido de 30°	35
Figura 4.17. Rotura mista no provete sem “taper” (vista de microscópio).....	36
Figura 4.18. Rotura por adesão no provete com “taper” em adesivo com 45° (vista de microscópio).....	36
Figura 4.19. Bolhas de ar existentes no provete com “taper” em adesivo de 30° (vista de microscópio).....	36
Figura 4.20. Zona de rotura mista no provete 2 sem “taper”	37
Figura 4.21. Zonas de rotura no provete 2 sem “taper”. Rotura por coesão(a), rotura por adesão(b).	37
Figura 4.22. Zona de rotura por adesão no provete 2 com “taper” em adesivo de 30°.	38
Figura 4.23. Zona de rotura por adesão no provete 3 com “taper” de adesivo invertido de 60°	39
Figura 4.24. Força em função da extensão dos provetes sem “taper”.	40
Figura 4.25. Força em função da extensão dos provetes com “taper” em adesivo.....	41
Figura 4.26. Força em função do ângulo de “taper” dos provetes com “taper” em adesivo e provetes sem “taper”	42
Figura 4.27. Força em função da extensão dos provetes com “taper” em alumínio.....	43
Figura 4.28. Força em função do ângulo de “taper” dos provetes com “taper” em alumínio.	43
Figura 4.29. Força em função da extensão dos provetes com “taper” de adesivo invertido.	44
Figura 4.30. Força em função do ângulo de “taper” dos provetes com “taper” de adesivo invertidos.....	45
Figura 4.31. Influência do comprimento de sobreposição em provetes com “taper” invertido.	45
Figura 4.32. Força máxima em função do comprimento de sobreposição da junta.	47
Figura 4.33. Deformações globais medias em função do ângulo de “taper”	48
Figura 4.34. Regiões de análise de deformação local. Provete sem “taper” (a) Provete com “taper” em adesivo (b) Provete com “taper” em alumínio (c) Provete com “taper” invertido (d).....	49
Figura 4.35. Comparação entre deformações locais (ARAMIS) e deformações globais (Instron) no provete C30P3.....	49
Figura 4.36. Rotura de um provete sem “taper”. Estágio 7 (a) Estágio 87(b).	50
Figura 4.37. Zona de início de rotura de um provete 2 com “taper” em adesivo de 30°. Estágio 106.....	51
Figura 4.38. Zona de início de rotura de um provete 2 com “taper” em adesivo de 45°	52
Figura 4.39. Zona de início de rotura de um provete com “taper” em adesivo de 45°	52
Figura 4.40. Zona de início de rotura de um provete com “taper” no aderente de 30°.	52

Figura 4.41. Rotura de um provete com “taper” invertido. Estágio 2(a) Estágio 84(b) Estágio 102(c) Estágio 103(d).....	53
Figura 4.42. Rotura do provete 1 com “taper” invertido de 45°. Estágio 102.	54
Figura AN.1. Folha número 1 de especificação do adesivo Araldite 420 A/B.	61
Figura AN.2. Folha número 2 de especificação do adesivo Araldite 420 A/B.	62
Figura AN.3. Folha número 3 de especificação do adesivo Araldite 420 A/B.	63
Figura AN.4. Folha número 4 de especificação do adesivo Araldite 420 A/B.	64
Figura AN.5. Folha número 5 de especificação do adesivo Araldite 420 A/B.	65
Figura B.1. Provetes sem “taper”. Amostra 1(a), Amostra 3 (b).....	69
Figura B.2. Provetes com “taper” em adesivo de 30°. Amostra 2(a), Amostra 3 (b).....	69
Figura B.3. Provetes com “taper” em adesivo 45°. Amostra 1(a), Amostra 2 (b).	69
Figura B.4. Provetes com “taper” em adesivo 60°. Amostra 1(a).....	70
Figura B.5. Provetes com “taper” no aderente 30°. Amostra 1(a), Amostra 3 (b).....	70
Figura B.6. Provetes com “taper” no aderente 45°. Amostra 1(a), Amostra 2 (b), Amostra 3(c).....	70
Figura B.7. Provetes com “taper” no aderente 60°. Amostra 1(a), Amostra 2 (b), Amostra 3(c).....	71
Figura B.8. Provetes com “taper” de adesivo invertido 30°. Amostra 2(a), Amostra 3 (b).71	
Figura B.9. Provetes com “taper” de adesivo invertido 45°. Amostra 1(a), Amostra 2 (b).71	
Figura B.10. Provetes com “taper” de adesivo invertido 60°. Amostra 1(a), Amostra 2 (b), Amostra 3(c).....	72
Figura C.1. Provete 1 sem “taper”. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).....	73
Figura C.2. Provete 3 sem “taper”. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).....	73
Figura C.3. Provete 1 com “taper” em adesivo 30°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).....	74
Figura C.4. Provete 2 com “taper” em adesivo 30°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).....	74
Figura C.5. Provete 1 com “taper” em adesivo 45°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).....	74
Figura C.6. Provete 2 com “taper” em adesivo 45°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).....	75
Figura C.7. Provete 3 com “taper” em adesivo 45°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).....	75
Figura C.8. Provete 2 com “taper” em adesivo 60°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).....	75
Figura C.9. Provete 2 com “taper” em aderente 30°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).	76
Figura C.10. Provete 3 com “taper” em aderente 30°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b). ...	76
Figura C.11. Provete 1 com “taper” em aderente 45°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b). ...	77
Figura C.12. Provete 2 com “taper” em aderente 45°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b). ...	77
Figura C.13. Provete 3 com “taper” em aderente 45°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b). ...	77
Figura C.14. Provete 1 com “taper” em aderente 60°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b). ...	78

Figura C.15. Provete 2 com “taper” em aderente 60°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b). ...	78
Figura C.16. Provete 3 com “taper” em aderente 60°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b). ...	78
Figura C.17. Provete 1 com “taper” de adesivo invertido 30°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).	79
Figura C.18. Provete 3 com “taper” de adesivo invertido 30°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).	79
Figura C.19. Provete 1 com “taper” de adesivo invertido 45°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).	79
Figura C.20. Provete 2 com “taper” de adesivo invertido 45°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).	80
Figura C.21. Provete 3 com “taper” de adesivo invertido 45°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).	80
Figura C.22. Provete 1 com “taper” de adesivo invertido 60°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).	80
Figura C.23. Provete 2 com “taper” de adesivo invertido 60°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).	81
Figura C.24. Provete 3 com “taper” de adesivo invertido 60°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).	81

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Propriedades mecânicas e composição química da liga de Alumínio 5083 (Davis, 1993).....	20
Tabela 4.1. Média de comprimentos de sobreposição.....	27
Tabela 4.2. Médias das percentagens de coesão.....	33
Tabela 4.3. Média e desvio padrão das deformações globais.....	47
Tabela A.1. Médias de áreas de sobreposição e desvios padrão.	67
Tabela D.1. Forças máximas dos provetes sem “ <i>taper</i> ”.....	83
Tabela D.2. Forças máximas dos provetes com “ <i>taper</i> ” em adesivo.	83
Tabela D.3. Forças máximas dos provetes com “ <i>taper</i> ” no aderente.....	84
Tabela D.4. Forças máximas dos provetes com “ <i>taper</i> ” invertido.....	84
Tabela D.5. Média e desvio padrão dos resultados das forças máximas.....	85

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

θ – Ângulo de contacto entre superfície do aderente e a tangente à superfície do líquido.

γ_{LV} – Tensão superficial do líquido em equilíbrio com o vapor

γ_{SL} – Tensão entre sólido e líquido

γ_{SV} – Tensão superficial do sólido

M – Momento fletor

k – Fator do momento fletor

P – Carga

t – Espessura do aderente

Siglas

ANSI – *American National Standards Institute*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

GOM – *Gesellschaft für Optische Messtechnik*

SEM – *Scanning Electron Microscopy*

DIC – *Digital Image Correlation*

1. INTRODUÇÃO

A utilização de adesivos em aplicações de engenharia tem vindo a aumentar devido à economia de custos, redução de peso e possibilidade de união de materiais diferentes que este modo de ligação de materiais oferece.

Segundo a norma ANSI/ASTM D907 a definição de adesivo é “uma substância capaz de unir materiais através da fixação das suas superfícies”.

No que toca a juntas coladas, a junta sobreposta simples é a mais utilizada a nível de projeto mecânico. O uso deste tipo de junta substitui, por vezes, outros modos de ligação nomeadamente o aparafusamento, a rebitagem e a soldadura (Santos, 2005).

A resistência mecânica das juntas coladas depende das propriedades geométricas da junta, das características dos materiais utilizados, dos efeitos térmicos e da preparação das superfícies (Solmaz *et al.*, 2011). As tensões que se desenvolvem no adesivo em juntas sobrepostas sob o efeito de cargas de tração podem ser consideradas como resultantes da ação conjugada de tensões de corte, tensões superficiais e pressão hidrostática. Os máximos das tensões são localizados nas extremidades da sobreposição (Adams *et al.*, 1987). O estudo deste tipo de ligação é complexo mas ao mesmo tempo fundamental para que seja possível a utilização em projetos mecânicos.

Segundo Adams *et al.* (1987) a adição de adesivo nas extremidades da sobreposição (designado por “*taper*”) diminui a concentração de tensões na junta uma vez que o excedente de adesivo suporta parte da carga a que a junta está sujeita (Figura 1.1).

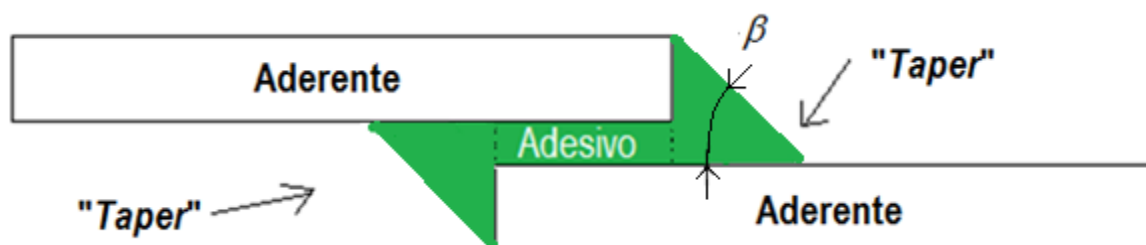


Figura 1.1. Aplicação de “*taper*” numa junta colada.

O “*taper*” tanto poder ser produzido no adesivo como no aderente. De acordo com alguns autores quando é aplicado corretamente melhora a resistência da junta colada (Sancaktar, *et al.*, 2002; Hildebrand, 1992). Tal pode ser justificado pelo facto da adição de

material suportar parte da carga a que a junta está sujeita (“taper” no adesivo) ou devido à diminuição da concentração de tensões nas extremidades da sobreposição, situação simulada analiticamente e testada experimentalmente por Sancaktar, *et al.* (2002) para o caso do “taper” ser no aderente.

Neste trabalho é estudada a resistência mecânica de 4 tipos de juntas coladas com diferentes geometrias e ângulos de “taper”. As geometrias consideradas são: sem “taper”, “taper” no adesivo, “taper” no aderente e finalmente “taper” de adesivo invertido. Os ângulos de “taper” em análise são 30°, 45° e 60°. A situação de sem “taper” é referenciada como ângulo de “taper” de 90°.

Os equipamentos utilizados na análise da resistência mecânica das juntas coladas são uma máquina de ensaios de tração e um extensômetro ótico que permite a correlação de imagem digital (DIC), o ARAMIS.

Para tal esta tese está dividida em 5 capítulos, sendo este a introdução o primeiro. No segundo capítulo é apresentado o estado da arte, no qual é feita a revisão bibliográfica. O terceiro capítulo corresponde ao procedimento experimental. No quarto capítulo são apresentados os resultados e a análise dos mesmos. Por fim, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho.

2. ESTADO DA ARTE

Neste capítulo é apresentado o estado da arte, abordando matéria relativa às juntas coladas, adesivos e aderentes. É ainda feita uma revisão bibliográfica considerando trabalhos realizados na área, por forma a permitir que o leitor se contextualize com esta temática.

2.1. Contexto Histórico

A utilização de adesivos tem milhares de anos. O recurso ao primeiro adesivo de que se tem registo, remonta há mais de 200 000 anos (Mazza, *et al.*, 2006). O poder de observação do ser humano permitiu-lhe utilizar conceitos retirados da natureza para os aplicar em sua vantagem. Os primeiros adesivos utilizados eram feitos à base de matéria natural como seiva de árvores e cera de abelha e serviam essencialmente para construir armas. Mais tarde surgiram outros adesivos como o latex natural, a resina e proteína animal (caseína). Na história existem arquivos que revelam que os Egípcios, por exemplo, utilizavam caseína na construção de arcos e mobília (Keimel, 2003).

Os Gregos e os Romanos por sua vez tiveram um papel fundamental ao nível da construção ao desenvolverem o cimento pozolânico com recurso a cal, cinza vulcânica e areia, dando assim início à ciência da tecnologia de juntas coladas (Keimel, 2003). Contudo, a exploração dos adesivos modernos começou apenas em 1690, na Holanda com a descoberta da primeira planta da cola (Delmonte, 1947).

Na literatura existe pouca informação relativamente às datas em que foram inventados os primeiros adesivos. Só no século XIX é que surgiram os primeiros registos de patentes em sintonia com a revolução industrial.

A evolução da indústria química no século XIX levou a que Leo Baekeland desenvolvesse a primeira resina sintética quimicamente estável e resistente ao calor, a Baquelite (American Chemical Society).

O grande desenvolvimento dos adesivos deu-se no século XX, durante a 2ª Guerra Mundial devido a avanços tecnológicos e científicos. Nesse período foram introduzidos os elastómeros e as resinas sintéticas (Esteves, 1990).

Atualmente os adesivos usados em aplicações de engenharia são na sua maioria de origem sintética, polímeros (da Silva *et al*, 2007) e têm como objetivo a substituição de outros modos de ligação como soldadura, rebiteagem e aparafusamento. A sua crescente utilização deve-se essencialmente ao fator económico e ao seu bom desempenho. Neste sentido, as ligações coladas são projetadas para serem capazes de suportar cargas da ordem de grandeza dos tipos de ligações mencionadas (Esteves, 1990). Este modo de união de materiais tem vastas aplicações na indústria aeronáutica, aeroespacial e automóvel (Magalhães *et al.*, 2010).

2.2. Polímeros

Um polímero define-se como uma macromolécula cuja sua estrutura molecular consiste na repetição de vários monómeros. Os monómeros são moléculas de baixo peso molecular. Os polímeros são obtidos por polimerização, processo no qual os monómeros se unem através de ligações covalentes formando cadeias moleculares longas (Smith, 1998).

Os polímeros podem ser classificados como:

-Termoplásticos: plásticos com capacidade de amolecer e fluir quando sujeitos a um aumento de temperatura e/ou pressão. Depois de retirados destes processos, mantêm a sua forma. Ao serem reaquecidos voltam a ter a capacidade de amolecer e fluir sem perder as suas propriedades. São constituídos por cadeias moleculares longas, ligadas entre si através de ligações secundárias. Exemplos: Polietileno, Polipropileno, Poliamidas (Smith, W. F., 1998).

-Termoendurecíveis: plásticos que durante o processamento amolecem uma vez para tomar a forma final. Sofrendo o processo de cura (reação química permanente ou por adição de calor e/ou pressão) não podem voltar a ser reaquecidos visto degradarem-se ou decomporem-se. Os polímeros termoendurecíveis têm uma estrutura molecular reticulada de ligações primárias covalentes e formam ligações cruzadas covalentes durante o processo de cura. As ligações cruzadas impedem que se restaure o estado fluido que o material inicialmente tinha (Smith, 1998; Santos,2005). Exemplos: Fenólicos, Resinas Epoxídicas, Resinas tipo amina (Smith, 1998).

-Elastómeros: Os elastómeros são o intermédio entre os termoplásticos e os termoendurecíveis. A densidade de ligações cruzadas não é suficientemente alta a ponto de os tornar rígidos e a cadeia principal é flexível (Santos, 2005). Exemplos: Borracha natural, Borracha sintética, Elastómeros termoplásticos de poliuretano (Smith, 1998).

Existem 2 tipos de estruturas que caracterizam os polímeros: amorfa ou semi-cristalina. A estrutura amorfa é caracterizada por cadeias moleculares desorganizadas, característica de polímeros termoendurecíveis (resinas epoxídicas e resinas fenólicas)

No presente trabalho foi utilizada uma resina termoendurecível, mais concretamente uma resina epóxida denominada Araldite 420 A/B.

2.3. Adesão e Coesão

Ao depositar o adesivo sobre os materiais a unir, aderentes, este inicialmente permanece fluido até que devido a mudanças físicas e químicas se solidifica. O adesivo deve aderir aos materiais com boa coesão e adesão no sentido de ser capaz de suportar as solicitações mecânicas a que é sujeito (Santos, 2005).

A adesão está associada à atração entre diferentes partículas ou superfícies devido às forças intermoleculares (da Silva *et al.*, 2007.) A coesão por sua vez está relacionada com a estrutura molecular de uma só substância. É a propriedade que as moléculas têm de se manterem unidas através das forças intermoleculares (da Silva *et al.*, 2007).

2.3.1. Teorias da Adesão

A união de materiais no seu conceito mais básico pode ser visto como uma ligação química (da Silva *et al.*, 2007). Esta desempenha o papel fulcral de suportar as forças exteriores ao qual o material está sujeito impedindo que se separe.

As ligações químicas dividem-se em:

- Ligações primárias - ligações iónicas, covalentes ou metálicas
- Ligações secundárias (van der Waals)
- Ligações de hidrogénio

Segundo da Silva *et al.*, (2007) as ligações primárias estão relacionadas com a atração entre partículas devido às forças de Coulomb (ligação iónica) e à partilha de pares de eletrões ou eletrões livres entre partículas caso se trate de ligação covalente ou metálica (respetivamente). As ligações secundárias estão associadas à ligação entre dipolos permanentes e/ou não-permanentes entre moléculas. As ligações de hidrogénio são o meio-termo entre as primárias e as secundárias, visto terem propriedades intermédias.

Existem diversos aspetos que condicionam o fenómeno da adesão. A rugosidade de uma superfície é um deles. Para uma superfície aderir a outra, é necessário que um adesivo, no seu estado líquido, estabeleça contacto com toda a superfície de um material de modo estabelecer forças de ligação. Contudo, para que a ligação se torne resistente é essencial que ocorra uma mudança de fase do adesivo. A mudança de fase é alcançada, por exemplo, pela perda de solvente devido à aplicação de calor.

A molhagem de uma superfície durante a fase líquida do adesivo condiciona a adesão. Este conceito, ilustrado na Figura 2.1 relaciona o um ângulo de contacto entre a superfície do aderente e a tangente à superfície do líquido, θ , equação (2.1):

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (2.1)$$

em que γ_{LV} é a tensão superficial do líquido em equilíbrio com o vapor, γ_{SL} a tensão entre sólido e líquido e γ_{SV} é a tensão superficial do sólido (Loureiro, 1995).

O ângulo θ deve ser superior a 1 para que ocorra molhagem da superfície:

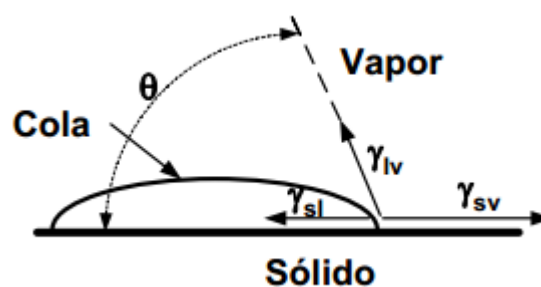


Figura 2.1. Molhagem de uma superfície (Loureiro, 1995).

A explicação do fenómeno de adesão é complexo e envolve forças mecânicas, físicas e químicas (da Silva *et al.*, 2007). Existem 4 teorias que o tentam explicar:

- Teoria mecânica

Nesta teoria o adesivo penetra nas irregularidades/rugosidade das superfícies ficando agarrado mecanicamente. Funciona como se houvesse uma “ancoragem”.

- Teoria da adsorção

A adesão é baseada nas forças de superfície. Através da aproximação entre o adesivo e aderente estabelecem-se ligações de van der Waals.

- Teoria da difusão

É aplicável apenas a materiais poliméricos (adesivo e aderente). Na interface entre o adesivo e aderente, as cadeias moleculares de ambos os materiais difundem-se uma na outra formando um ponte. Os materiais têm de ser miscíveis e compatíveis.

- Teoria eletrostática

Baseia-se na existência de uma força proveniente da transferência de elétrons através da interface entre adesivo e aderente.

2.4. Condicionantes da Resistência de uma Junta Colada

A complexidade, referida ao longo deste trabalho, do estudo da resistência mecânica de juntas coladas deve-se a variados fatores que devem ser tidos em conta.

Segunda da Silva *et al.* (2007) as propriedades mecânicas do adesivo e aderente, as características geométricas de ambos, a temperatura e a preparação da superfície devem ser meticulosamente analisados para produzir uma junta colada com qualidade.

Em relação às propriedades mecânicas do adesivo deve ser tido em conta a sua ductilidade, flexibilidade, resistência mecânica e módulo de elasticidade. Um adesivo mais dúctil apresenta tensões limite elásticas mais baixas, contudo deforma-se mais plasticamente. Este comportamento traduz-se numa maior resistência da junta colada em relação a adesivos mais duros, mas mais frágeis. Um aumento do módulo elasticidade do adesivo conduz a distribuição de tensões menos uniformes (da Silva *et al.*, 2007).

Relativamente às propriedades do aderente, segundo Adams *et al.* (1987) a utilização de aderentes que conduzam a menores deformações plásticas, ou seja, mais rígidos é mais vantajosa. Estes diminuem a concentração de tensões nas extremidades da sobreposição que podem originar rotura prematura da mesma. Na Figura 2.2 é apresentado um esquema de uma junta colada, neste caso sem “*taper*”.

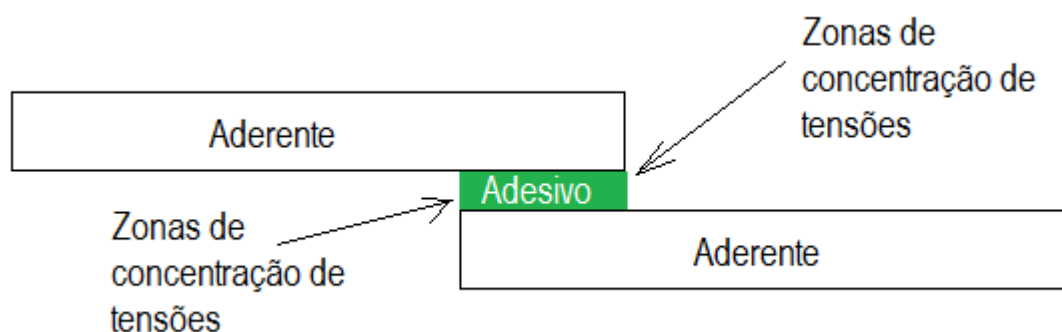


Figura 2.2. Zonas de concentração de tensões em junta sobreposta simples.

Caraterísticas geométricas como a espessura de adesivo são condicionantes da resistência mecânica. Arenas *et al.*, (2009) utilizaram uma distribuição estatística de Weibull para prever qual a espessura que melhora a resistência mecânica de adesivos estruturais. Estes autores concluíram que esse valor rondaria os 0,5mm que se insere na gama de intervalo ótima (0,1mm-0,5mm) segundo o autor da Silva *et al.* (2007). Espessuras de adesivos superiores conduziram, segundo Gleitch *et al.*, (2001) e da Silva *et al.* (2007) ao aumento de tensão de corte na interface entre adesivo e aderente. As espessuras de adesivos menores obtiveram distribuição de tensões mais uniformes.

O comprimento de sobreposição é outro dos fatores geométricos que deve ser tido em conta. A análise de Banea *et al.* (2009) concluiu que os adesivos duros e frágeis aumentam a sua resistência mecânica em função do aumento do comprimento de sobreposição até determinado limite. Por outro lado, os adesivos dúcteis elevam linearmente a resistência o comprimento de sobreposição.

A utilização de “taper” nas juntas coladas influencia a sua resistência mecânica. Conforme já referido ao longo do trabalho, numa junta colada a concentração de tensões ocorre nas extremidades da zona de sobreposição, mais concretamente, na interface entre o adesivo e o aderente. Segundo diversos autores (da Silva *et al.*, 2007 e Adams *et al.*, 1987) a utilização de “taper” conduz a uma redução na concentração de tensões nessas mesmas zonas. Na Figura 1.1 está apresentado o “taper” de uma junta colada.

Ao efetuar a seleção do adesivo deve ser tido em conta a diferença entre coeficiente de dilatação térmica do adesivo e aderente (da Silva *et al.*, 2007). Esta diferença, conduz ao aparecimento de tensões de origem térmica no arrefecimento. A diminuição das mesmas é feita através da seleção de adesivo e aderente com coeficientes de dilatação térmica o mais próximos possíveis.

2.4.1. Preparação da Superfície

A preparação de uma superfície de colagem é um parâmetro importante para que a junta seja obtida com qualidade. Os materiais metálicos contêm na sua superfície impurezas e óxidos que impedem a molhagem adequada do adesivo devido à sua baixa energia superficial (da Silva *et al.*, 2007). Assim, é necessário que haja um tratamento da superfície de modo a remover esses elementos antes da colagem. O tipo de tratamento vai depender do material em questão. Num alumínio, por exemplo, existem óxidos à superfície pelo que a desoxidação com recurso a lixa se torna essencial para a colagem.

2.5. Classificação dos Adesivos

Os adesivos podem ser classificados de diferentes formas, quanto à sua estrutura molecular, custos, origem, processo de endurecimento e desempenho. O modo mais recorrente é segundo o seu desempenho, que classifica os adesivos como estruturais ou não estruturais.

Dentro dos adesivos estruturais, a classificação é subdividida em epóxidos, poliuretanos, poliamidas, fenólicos e acrílicos. (Branco *et al.*, 2005).

As principais propriedades a ter em conta nos adesivos estruturais são (Esteves, 1990):

- Apresentação
- Resistência ao corte
- Temperatura máxima de utilização
- Resistência à fluência
- Resistência ao arrancamento
- Resistência a Choques
- Resistência a solventes

Dependendo das necessidades do utilizador é necessário selecionar qual o adesivo que se adequa para cada caso.

2.6. Distribuição de Tensões nas Juntas Coladas.

A crescente utilização de juntas coladas conduziu a uma necessidade de entendimento do comportamento mecânico deste modo de união de materiais, tendo sido vários os autores que se propuseram a fazê-lo.

A Figura 2.3 ilustra as principais tensões a que uma junta colada se encontra sujeita: corte, arrancamento, clivagem e tração ou compressão (da Silva *et al.*, 2007).

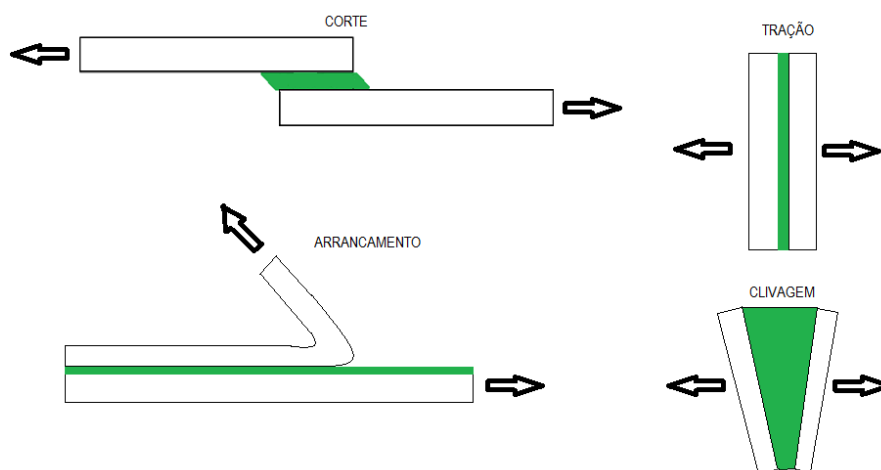


Figura 2.3. - Tensões numa junta colada sobreposta.

As tensões de corte são aquelas a que uma junta colada consegue resistir melhor. Toda a área de sobreposição contribui para a resistência mecânica da junta. As tensões de arrancamento e clivagem são as mais prejudiciais. Quando existe um carregamento que conduz a estas tensões, os aderentes têm tendência a ser separados. O arrancamento e a clivagem provocam uma concentração de tensões mais elevada numa das extremidades da sobreposição. Tal conduz a que a área resistente seja muito pequena ocorrendo rotura prematura da junta colada.

2.6.1. Análise Bi-dimensional Elástica

Volkersen (1938) foi um dos primeiros autores que se propôs a investigar a resistência de juntas coladas através de uma análise teórica, na qual considerava deformações longitudinais de tração nos aderentes e deformações de corte na camada de adesivo. Este autor concluiu que as tensões máximas de corte seriam nas extremidades do adesivo. Neste estudo foi negligenciado o efeito do momento fletor que surge devido ao carregamento excêntrico.

Com o intuito de melhorar a solução de Volkersen, surgiram outros autores que tiveram em conta o efeito do momento fletor, como Goland e Reissner, (1944). Desenvolveram um modelo que definia um fator do momento fletor, k , que se relacionava diretamente com o momento fletor, M , na extremidade do aderente para uma carga P aplicada, segundo a equação (2.2):

$$M = \frac{kPt}{2} \quad (2.2)$$

onde t é a espessura do aderente.

Sempre que existir rotação da junta, o valor de k diminuí e conseqüentemente o momento também devido ao alinhamento da linha de ação de carga. Se não houver rotação, o valor de k aproxima-se de 1.

Mais tarde, Hart-Smith, (1973) apontou as limitações desta teoria ao verificar que o comportamento plástico dos adesivos estaria a ser descurado. Assim foi proposto um modelo que estudasse a resistência mecânica de um adesivo considerando um comportamento elasto-plástico. A resistência mecânica foi aferida através da energia de deformação. Este autor concluiu que a utilização de adesivos dúcteis aumenta a resistência mecânica das juntas coladas.

Lang e Mallick (1997) optaram por estudar a influência de 8 geometrias diferentes de “*tapers*” em adesivo, Figura 2.4, na distribuição de tensões de corte, normais e superficiais em provetes com comprimento de sobreposição de 12,7mm.

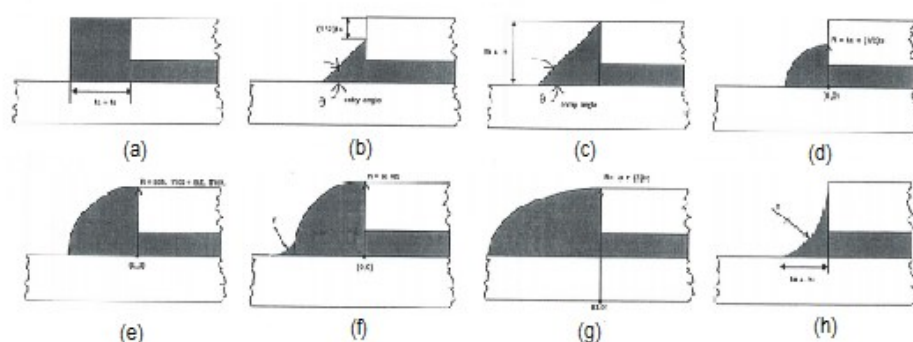


Figura 2.4. (a)- Quadrado, (b)- Meio triangular, (c)- Triangular, (d)- Meio redondo, (e)- Redondo, (f)- Redondo com fillet, (g)- Oval, (h)- Com raio.

Ao testarem o adesivo quadrado, os autores verificaram que à medida que se afastavam do centro da sobreposição (segundo o comprimento) havia um aumento dos valores relativos às tensões. Observaram ainda que também ao longo da espessura do adesivo

existem variações nos valores de tensões. No centro do adesivo as tensões são inferiores às tensões desenvolvidas na interface adesivo/aderente (tensão superficial). O máximo das tensões foram obtidos na extremidade do adesivo.

Estes autores concluíram que a diminuição do ângulo de “taper”, ângulo β na Figura 1.1, diminui significativamente as tensões de corte, normais e superficiais. Esta diminuição das tensões é explicada pelo aumento de quantidade de “taper” que por sua vez irá suportar parte das cargas às quais a junta se encontra exposta.

A Figura 2.5 ilustra uma distribuição típica das tensões: normais (σ_{xx}), superficiais (σ_{yy}) e de corte (τ_{xy}).

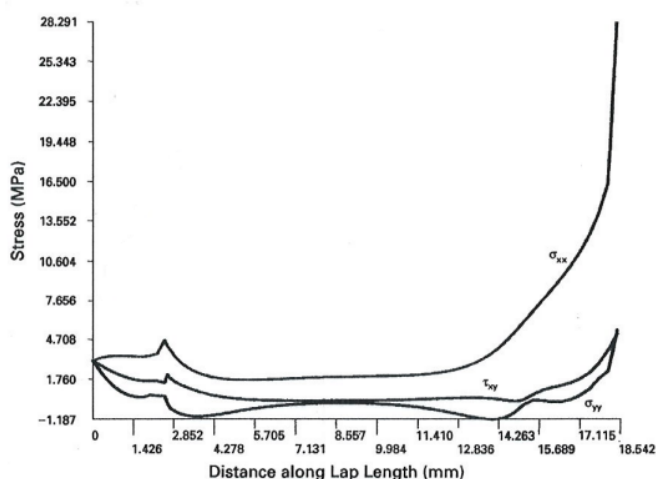


Figura 2.5. Distribuição de tensões ao longo do comprimento de sobreposição de uma junta colada.

Sawa et al. (2000) estudaram as tensões geradas na interface do adesivo e diferentes aderentes, através da teoria bidimensional da elasticidade. Tiveram em conta a influência da espessura do adesivo na concentração de tensões nas extremidades, o rácio entre módulos de Young dos aderentes e entre as espessuras dos aderentes. Concluíram que a concentração de tensões seria maior no aderente que apresentasse menor módulo de elasticidade e localizar-se-ia na sua extremidade na zona de interface com o adesivo. Chegaram ainda à conclusão que existe uma espessura que minimiza as tensões geradas, sendo que não podia esta ser muito fina ou muito espessa, uma vez que aumentava as tensões nas extremidades. O aderente com menor espessura foi o que registou maior concentração de tensões.

O tipo de análise aqui referida é válida para adesivos frágeis com pouca ou nenhuma deformação plástica (da Silva *et al.*, 2008).

2.6.2. Análise Bi-dimensional Elasto-plástica

O desenvolvimento da tecnologia permitiu que surgissem novos modelos de estudo dos adesivos. A análise teve tendência a ser realizada com recurso a modelação não linear (devido às elevadas deformações plásticas do adesivo ou do aderente) através do método dos elementos finitos (da Silva *et al.*, 2008).

Adams e Harris (1984) consideraram que era necessário ter em conta os seguintes fatores na análise de juntas coladas:

- Propriedades não lineares do adesivo e aderente;
- Grandes deslocamentos não lineares da junta sob carregamento (rotação);
- Variações das tensões e módulo de elasticidade segundo a espessura do adesivo;
- Geometria do “*taper*” do adesivo.

Estes mesmos autores estudaram o efeito do “*taper*” no adesivo na distribuição de tensões e modo de falha. Verificaram que a utilização de “*taper*” conduzia a melhorias de resistência da junta, visto que o “*taper*” de adesivo seria capaz de suportar parte do carregamento da junta. Constataram que o modo típico de iniciação de falha é o ilustrado na Figura 2.6.

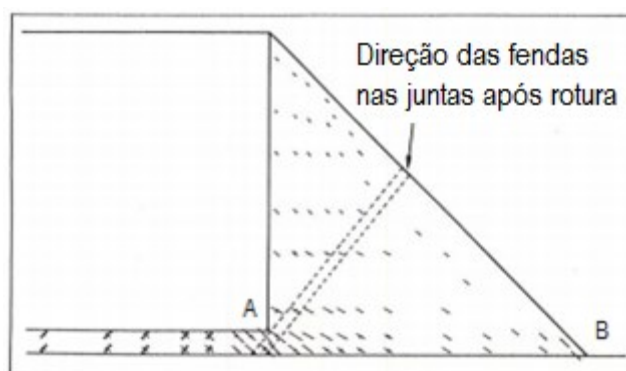


Figura 2.6. Modo típico de iniciação de falha.

A análise realizada permitiu concluir que a utilização de diferentes aderentes condicionava a localização das tensões no adesivo. Foram estudados 3 aderentes em ligas de alumínio com diferentes tensões de cedência: 2L73 ($\sigma_c = 430\text{MPa}$) liga de alta resistência, BB2hh ($\sigma_c = 220\text{MPa}$) liga intermédia e BB2s ($\sigma_c = 110\text{MPa}$) liga com um comportamento mais dúctil. Verificaram que para o caso da liga 2L73 o aumento de

carregamento fazia com que a tensão principal máxima no adesivo fosse localizada no ponto mais próximo da extremidade do aderente (ponto A) tal como ilustra a Figura 2.6.

No caso em que foram utilizadas as ligas BB2hh e BB2s, inicialmente as tensões principais máximas estavam localizadas no ponto A, mas após iniciação da deformação plástica passaram a localizar-se no ponto B. As modificações na localização das tensões podem ser justificadas devido às deformações dos aderentes.

O tipo de “taper” utilizado influencia a resistência mecânica da junta. Foi nesse sentido que Adams *et al.* (1987) se propuseram a estudar diferentes configurações, Figura 2.7.

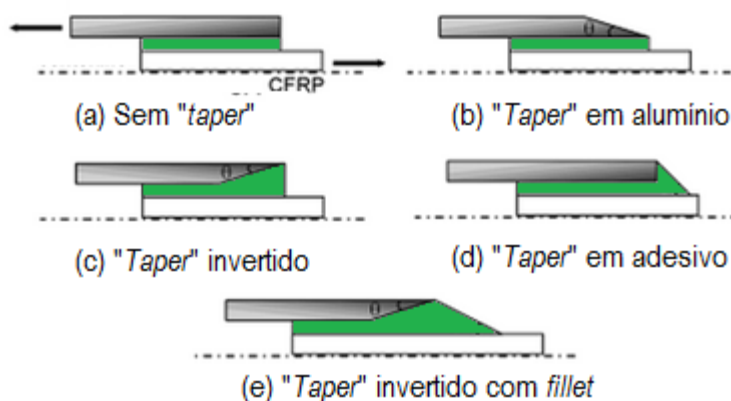


Figura 2.7. Diferentes geometrias de “taper”: (a)- quadrado, (b)- no aderente, (c)- invertido, (d)- no adesivo, (e)- no adesivo e aderente.

Com esta análise os autores descobriram que nos casos em que foi realizado “taper” nos aderentes (Fig. 3(b), (c)) não houve melhoria significativa na resistência mecânica da junta. Por sua vez, a utilização do “taper” em cola (Fig. 3 (d)) reduzia as tensões de corte na junta na ordem dos 75%. A utilização de uma junta com “taper” no adesivo e aderente (Fig. 3 (e)) foi a que demonstrou melhores resultados, com uma redução nas tensões de corte da junta na ordem dos 87%.

Contrariamente aos resultados de Adams *et al.* (1987) no caso do “taper” no aderente (Figs. 3(b)), Borgmeier e DeVries (1993) concluíram que a utilização deste tipo de junta diminuía as tensões de corte nas extremidades da sobreposição. Nesse sentido havia uma distribuição de tensões mais uniforme e aumento da resistência da junta.

Solamaz e Turgut (2011) estudaram o efeito do ângulo de “taper” no adesivo e do comprimento de sobreposição na distribuição de tensões e modo de falha de juntas coladas. O material utilizado foi um polímero reforçado com fibra de carbono e foi simulado

numericamente através do método dos elementos finitos e testado experimentalmente. Os ângulos de “taper” analisados foram 0°, 15°, 30°, 45°, 60° e 75°. Os comprimentos de sobreposição foram 25,4mm e 38,1mm.

Os resultados deste estudo permitiram concluir que o ângulo de “taper” que melhora a resistência das juntas é o de 15° e ainda que a junta com maior comprimento de sobreposição resistiu a um carregamento maior.

Hildebrand (1992) utilizou o método dos elementos finitos para estudar o efeito da modificação das geometrias das extremidades de juntas coladas entre metal e plástico reforçado com fibra (FRP). Foram ensaiados 4 tipos de provetes: com “taper” em cola; com “taper” invertido no aderente e adesivo; extremidade arredondada; indentação. Os provetes foram estudados para diferentes ângulos de “taper”, 30°, 45° e 60°. As principais conclusões foram que o ângulo de “taper” de 30° foi o que demonstrou melhores resultados a nível da resistência das juntas e que os “tapers” com geometrias arredondadas e com indentação melhoraram entre 90% a 150% a resistência mecânica da junta.

A análise bidimensional elasto-plástica conduz a resultados mais próximos dos verificados experimentalmente para o caso de adesivos dúcteis (10% ou mais de deformação ao corte para que ocorra falha). Contudo, a análise deste comportamento é mais complexa e demorada (da Silva *et al* 2008).

2.7. Vantagens das juntas coladas

De acordo com alguns autores, (Branco *et al.*,2005; Esteves, 1990), as vantagens de utilização das juntas coladas são:

- União de materiais com diferentes composições;
- Redução da concentração de tensões que surge quando se utilizam outros modos de união como rebiteagem ou aparafusamento;
- Redução de peso do componente;
- Possibilidade de união de materiais com geometrias complexas;
- Melhoria do aspeto de ligação;
- Melhoria na distribuição de tensões;
- Redução de custos;
- Melhoria na resistência à corrosão;

- Capacidade de vedação;

No entanto, as juntas coladas não apresentam apenas vantagens, podendo-se enumerar algumas desvantagens associadas a este modo de ligação (Branco *et al.*, 2005; Esteves, 1990):

- Preparação de junta especial;
- Baixa resistência à temperatura;
- Incerteza relativa à sua durabilidade quando exposta a condições ambientais severas;
- Podem existir tensões residuais devido a diferentes coeficientes de expansão térmica;
- Dificuldade de inspeção;
- Peças não separáveis sem que ocorra dano.

2.8. Principais Conclusões

Da literatura pode-se concluir que o tipo de solicitação mais estudado em juntas coladas sobrepostas é o ensaio de tração. Os picos de tensões desenvolvem-se nas extremidades das juntas coladas na zona de sobreposição, surgindo tensões de corte e superficiais.

Lang e Mallick (1997) concluíram que a utilização de “taper” em adesivo, presente na Figura 2.7(d), melhora a resistência das juntas coladas. Verificaram, ainda, que a utilização de um ângulo de “taper” mais baixo conduz a melhores resultados ao nível das tensões geradas.

Segundo Adams *et al.* (1987) a utilização do “taper” em alumínio, como demonstrado na Figura 2.7(b), não se traduz numa melhoria significativa da resistência mecânica da junta colada. Contrariamente, Borgmeier e DeVries (1993) concluíram que haveria melhoria da resistência da junta colada com este tipo de aderente visto haver uma distribuição de tensões mais uniforme.

Adams *et al.* (1987) verificaram que a utilização dos provetes com “taper” em aderente invertido, com a geometria presente na Figura 2.7(c), não conduzia a melhorias na resistência mecânica das juntas coladas.

Tendo em consideração os resultados aferidos após a análise da bibliografia neste trabalho é proposto analisar o efeito na resistência mecânica da junta que 3 geometrias diferentes de “*taper*” produzem. As geometrias de “*taper*” em estudo são: no adesivo, invertido no adesivo e no aderente

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

De acordo com o referido ao longo deste trabalho, o estudo da influência do “*taper*” em juntas coladas foi realizado tendo em conta as diferentes geometrias ilustradas na Figura 3.1. O “*taper*” foi produzido no aderente e no adesivo. Foram estudados os ângulos de “*taper*” de 30°, 45° e 60° para cada caso. Em todos os casos, o comprimento de sobreposição entre os aderentes foi de 20mm. Os resultados obtidos foram comparados com os referentes aos provetes sem “*taper*”.

Efetuada a colagem, os provetes foram submetidos a ensaios de tração e análise de deformação no sentido de se avaliar a resistência mecânica das juntas.

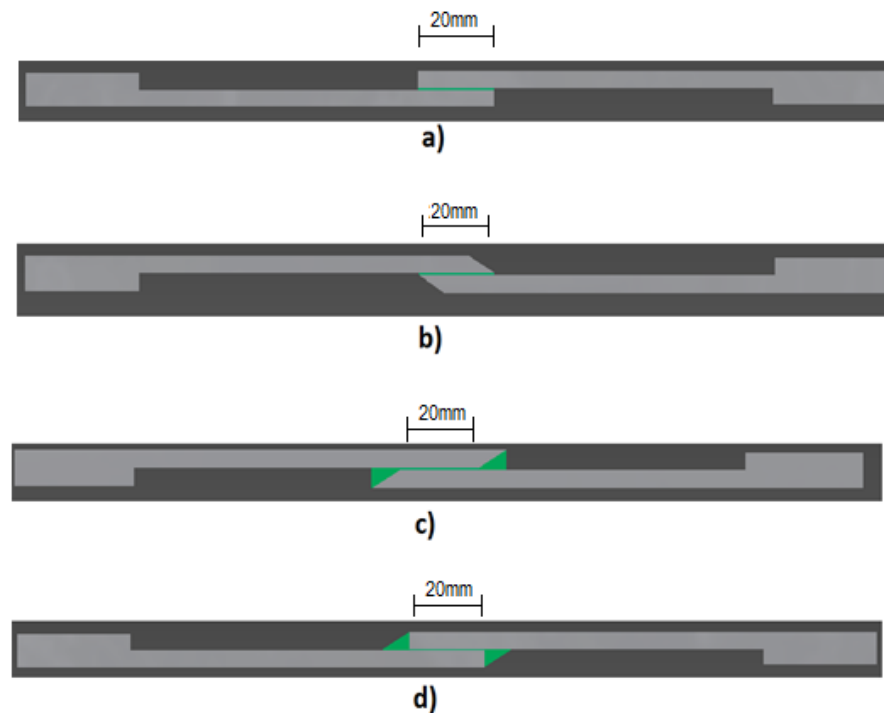


Figura 3.1. Geometria dos provetes: (a) Sem “*taper*”, (b) Taper no aderente, (c) Taper de adesivo invertido, (d) Taper no adesivo.

3.1. Materiais

Os materiais utilizados foram uma liga de alumínio 5083-H111, para os aderentes, com 4mm de espessura, e uma resina epóxi Araldite 420 A/B, como adesivo. São em seguida apresentadas as propriedades destes materiais.

3.1.1. Aderentes

O alumínio é amplamente utilizado em aplicações de engenharia devido à sua boa combinação de propriedades. Possui uma baixa densidade, boa resistência à corrosão, as suas ligas podem ter elevada resistência mecânica, não é tóxico, possui excelentes propriedades elétricas e é relativamente barato (Smith, 1998). As ligas de alumínio são utilizadas no sentido de melhorar as propriedades originais do alumínio. As ligas de alumínio da série 5xxx são ligas para trabalho mecânico sem tratamento térmico. O principal elemento de liga é o magnésio, adicionado em quantidades até 5% com o objetivo de promover o endurecimento por solução sólida. As principais aplicações desta liga são no sector automóvel e naval (Smith, 1998). As propriedades desta liga são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Propriedades mecânicas e composição química da liga de Alumínio 5083 (Davis, 1993).

Elemento	% em peso	Propriedade	Valor
Al	92,4 - 95,6	Densidade a 20°C	2660 [Kg/m ³]
Cr	0,05 - 0,25	Tensão de Cedência a 25°C	155 [MPa]
Cu	Max 0,1	Tensão de Tração a 25°C	310 [MPa]
Fe	Max 0,4	Módulo de Elasticidade	70,3 [GPa]
Mg	4 - 4,9	Coeficiente Expansão Térmica	[23,8µm/m/°C]
Mn	0,4 - 1	Condutividade Térmica a 25°C	117[W/m.K]
Si	Max 0,4		
Ti	Max 0,15		
Zn	Max 0,25		
Outros, cada	Max 0,05		
Outros, total	Max 0,15		

3.1.2. Adesivo

As especificações completas do adesivo utilizado são apresentadas no ANEXO A. É uma resina epóxi termoendurecível, de 2 componentes obtida através da mistura do componente A com o componente B na fração de 100/40 em peso.

Posteriormente à aplicação do adesivo, este pode ser curado à temperatura ambiente ou em estufa, neste último caso melhorando as propriedades do mesmo. A aplicação de uma pressão uniforme durante o processo de cura melhora as propriedades da colagem.

Segundo o fabricante, para provetes de alumínio ensaiados segundo a norma ISO 4587, ou seja provetes com 25mm de largura e 12,5mm de comprimento de sobreposição, obtiveram-se tensões de corte na ordem dos 24MPa antes de ocorrer a rotura.

As principais características deste adesivo são a sua ductilidade e elevada resistência às tensões de corte e superficiais.

3.2. Preparação da Junta e Colagem

Na análise experimental foram ensaiados 30 provetes. Para a realização da colagem nos provetes com “*taper*” no aderente e “*taper*” de adesivo invertido foi necessário efetuar a preparação dos aderentes, a qual consistiu no biselamento das superfícies de modo a obter os ângulos de “*taper*” pretendidos. De seguida os provetes foram desoxidados com uma lixa de água fina com 320 *mesh* e limpos com uma solução de álcool.

A preparação do adesivo foi efetuada com recurso a uma balança digital com precisão à décima de milésimo. Foram utilizadas as recomendações do fabricante no que diz respeito à fração de peso de resina do tipo A e catalisador do tipo B. Foram utilizadas 14 gramas de adesivo, traduzidas em 10 gramas de resina Araldite A (cor amarela) e 4 gramas de catalisador B (cor azul). O adesivo foi de seguida bem misturado adquirindo uma tonalidade verde escura.

O recurso a “*gabarits*” permitiu dispor os provetes de modo a obter um comprimento de sobreposição entre os aderentes de 20mm. À exceção dos provetes invertidos, o comprimento entre extremidades dos provetes colados, isto é, o comprimento total dos provetes a ensaiar foi de 228mm. No caso dos provetes de “*taper*” invertidos no adesivo a variação de ângulo influencia o comprimento entre extremidades. Para os ângulos de 30°, 45° e 60° os comprimentos foram de 214mm, 220mm e 223mm, respetivamente. Na Figura 3.2 é apresentado um dos “*gabarits*” utilizados na colagem.



Figura 3.2. “Gabarits” utilizados para garantir o 20mm de comprimento de sobreposição entre aderentes.

A colagem dos provetes foi realizada em duas fases. Na primeira foi colado um dos lados do “taper” em todos os provetes e foram ao forno curar. Na segunda fase foi efetuado o “taper” do outro lado dos provetes e foram novamente submetidos ao processo de cura. Este procedimento deveu-se à impossibilidade de colocar o adesivo em ambos os lados de uma só vez.

O equipamento utilizado no processo de cura foi a estufa *Digiheat* do fabricante JP Selecta. A temperatura e tempo de cura foram 50° durante 4 horas.

De seguida os provetes foram limpos manualmente e com recurso à fresadora foi removido o excesso de adesivo, tendo sido aplicados os batentes nos mesmos. O recurso à utilização dos batentes tem como objetivo minorar a excentricidade da carga, ou seja, diminuir o efeito do momento fletor, logo a rotação da junta durante o ensaio de tração. O decremento no momento fletor leva à redução das tensões superficiais nas extremidades da camada de adesivo (Adams. e Harris, 1984)), ficando o provete sujeito apenas a tensões de corte na junta, e reduzindo a possibilidade de arrancamento prematuro na junta.

3.3. Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados recorrendo ao equipamento Instron 4206. O equipamento de correlação de imagem digital (DIC) que permitiu mapear os deslocamentos, foi o ARAMIS do fabricante GOM.

O ARAMIS utiliza uma técnica ótica não invasiva, sem contacto e independente do material (Moreira, D., *et al.*, 2014). Permite medir deslocamentos, velocidades, tensões, propriedades dos materiais e efetuar análise/otimização de elementos finitos.

Para que o mapeamento fosse possível foi aplicado uma camada de *spray* branco nos provetes e após secagem (30 minutos) foi aplicada uma camada de *spray* preta. Esta última com o intuito dispersar pequenos pontos sobre a camada de *spray* branca que facilitasse o reconhecimento dos provetes.

Os ensaios de tração seguiram a norma ASTM D1002. De acordo com a norma foi utilizada uma velocidade de travessão constante foi de 1,3mm/min.

No decorrer de cada ensaio são captadas pelo ARAMIS imagens do provete a ser tracionado. O equipamento permite, através da comparação das imagens obtidas, medir as deformações, deslocamentos, rotações e permite obter as curvas de tensão-deformação locais e globais pelo mapeamento das tensões globais aplicado aos campos de tensão locais que lhes correspondem (Leitão *et al.*, 2011). A aquisição de imagens foi feita de dois em dois segundos, sendo todos os testes realizados à temperatura ambiente.

A caracterização das superfícies de fratura foi realizada com a ajuda de uma máquina fotográfica com lente supermacro, de forma a se conseguir distinguir as zonas de rotura por adesão das zonas de rotura por coesão, que ocorreram no adesivo. O mapeamento das zonas de rotura foi feito sobre as fotografias das superfícies de fratura com recurso ao *software AxioVision*, da *Carl Zeiss*.

A morfologia da junta após rotura foi avaliada por recurso a um microscópio eletrónico de varrimento (SEM). Muito simplificada, o funcionamento deste microscópio é baseado na emissão de eletrões sobre a superfície das amostras. Um recetor capta os eletrões e gera uma imagem de alta resolução que permite perceber a profundidade. Uma característica deste microscópio é exigir que as amostras sejam condutoras. Nesse sentido, os provetes foram inicialmente cortados na zona adjacente ao adesivo. De seguida foram utilizados ultrassons durante 5 minutos de modo a remover impurezas. Após secagem foram revestidos por uma camada fina de ouro, cerca de 10nm, por pulverização catódica no adesivo tornando-se eletricamente condutores. O equipamento SEM utilizado tem a referência Philips XL30.

4. RESULTADOS

4.1. Morfologia dos provetes

A qualidade da colagem é fundamental para garantir uma boa resistência mecânica da junta. Na generalidade dos casos a qualidade das juntas coladas a nível de aspeto visual foi bom tal como se apresenta na Figura 4.1.

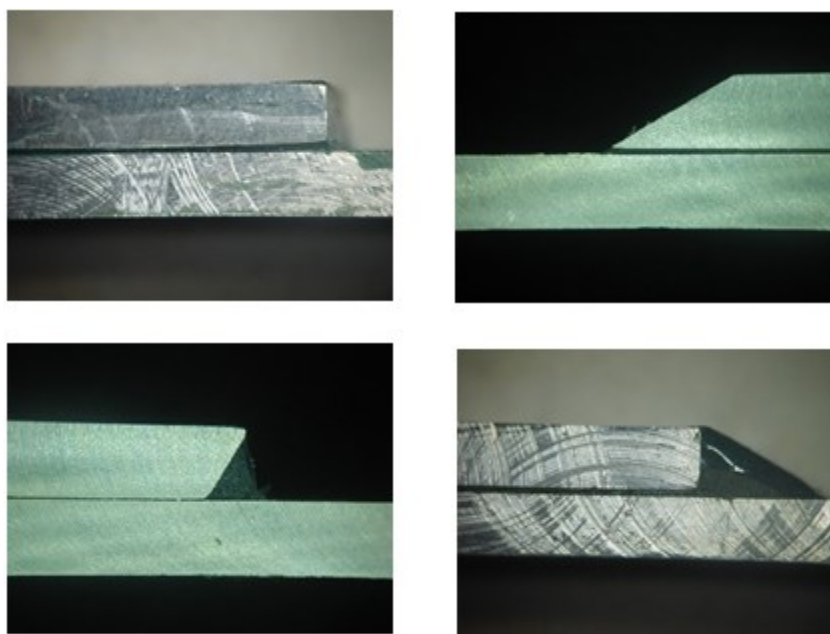


Figura 4.1. Alguns dos provetes após colagem.

Contudo existiram dificuldades durante o procedimento de colagem ao nível do alinhamento dos provetes tendo-se também detetado a existência de falta de “*taper*” (falta de adesivo) no caso dos provetes com “*taper*” no adesivo. A Figura 4.2 ilustra-se o caso de um provete com “*taper*” em alumínio no qual ocorreu falha de alinhamento e a Figura 4.3 ilustra a situação de falta de “*taper*”.

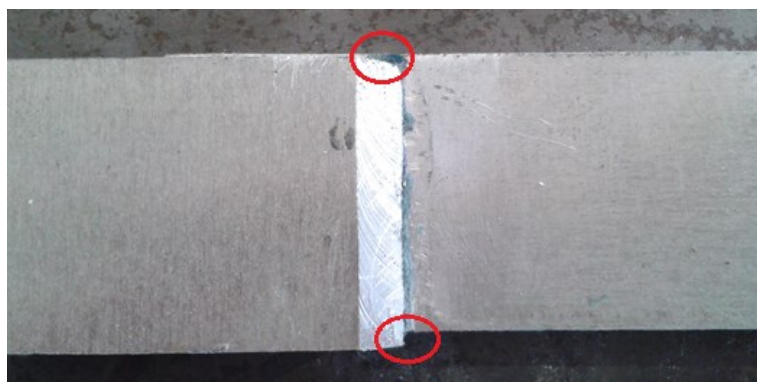


Figura 4.2. Provete desalinhado.

As diferenças entre o “taper” expectável e o real deveram-se ao facto do adesivo se encontrar no estado líquido durante a colagem. Isso fez com que este escorresse por ação da gravidade. Segundo a literatura, ponto 2, a diminuição da quantidade de adesivo no “taper” conduz a resistências menores devido à diminuição da quantidade de material que resiste à solicitação.

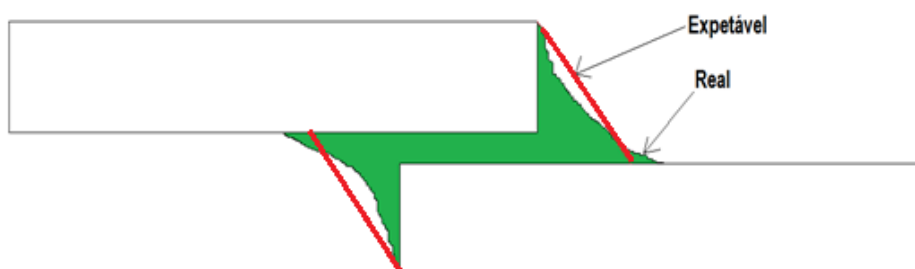


Figura 4.3. Falta de adesivo num provete com “taper” no adesivo.

A distribuição do adesivo ao longo da largura dos provetes não foi uniforme tal como é visível na Figura 4.4. Uma distribuição de adesivo deste género pode conduzir a concentração de tensões mais elevadas.

Durante a operação de remoção do excesso de material por fresagem (ver ponto 3.2 – Preparação de Junta e colagem) um dos provetes com “taper” em adesivo de 60° ficou sem parte do adesivo devido ao contacto com a ferramenta de corte. Devido a este facto quaisquer resultados obtidos com este provete não poderiam ser considerados válidos, pelo que o mesmo não foi utilizado.

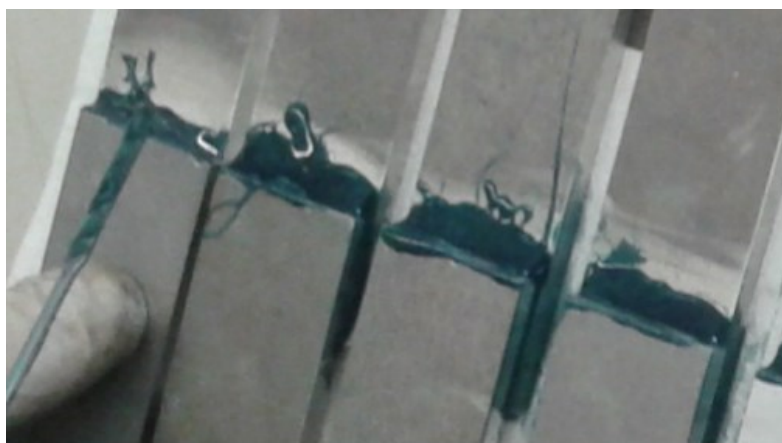


Figura 4.4. Distribuição não uniforme do adesivo.

Após a remoção dos excessos de adesivo foram medidas as áreas de todos provetes. No APÊNDICE A são apresentadas áreas médias de sobreposição e desvios padrão.

As médias dos comprimentos de sobreposição são disponibilizados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Média de comprimentos de sobreposição.

Geometria	Média Comprimento Sobreposição [mm]
Sem "taper"	21,6
"Taper" em adesivo 30	31,43
"Taper" em adesivo 45	29,8
"Taper" em adesivo 60	26,25
"Taper" em alumínio 30	22
"Taper" em alumínio 45	21,47
"Taper" em alumínio 60	21,43
"Taper" em invertido 30	37,93
"Taper" em invertido 45	29,83
"Taper" em invertido 60	28,2

4.2. Rotura dos provetes

A rotura dos provetes terá sido causada pela concentração de tensões nas extremidades da junta. A iniciação da rotura ocorreu, maioritariamente, nas extremidades e propagou-se até ao meio da junta.

4.2.1. Provetes Sem “taper”

Na Figura 4.5 é apresentado um provete após rotura. Em todos os provetes sem “taper” ocorreu separação total dos aderentes.



Figura 4.5. Rotura do provete sem “taper”.

4.2.2. Provetes Com “taper” em Adesivo

Na maioria dos provetes de 30° de “taper” a rotura iniciou-se na extremidade de um dos “tapers” (ponto A na Figura 4.6). A propagação da rotura foi feita segundo a interface adesivo/aderente e terminou no aderente (ponto B na Figura 4.6). Apenas num dos 3 provetes não ocorreu separação total da junta. Os “tapers” triangulares, 30°, 45° e 60° ficaram, em todos os casos, agarrados a um dos aderentes, Figura 4.6. Nas figuras são apresentadas as escalas de deformações.

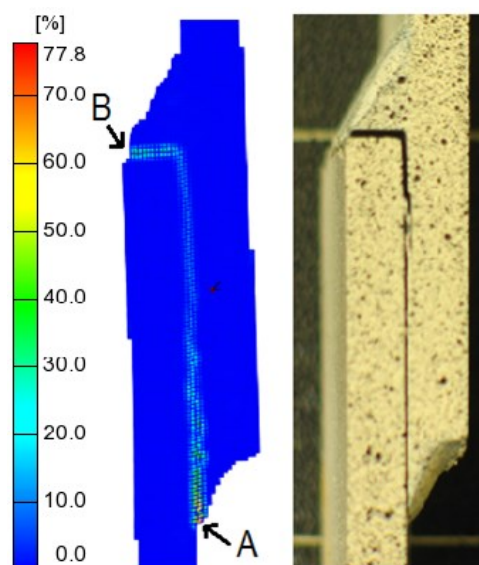


Figura 4.6. Rotura do provete com “taper” em adesivo de 30°. Na figura é apresentada a escala de deformação.

Na generalidade dos provetes com 45° de “taper” verificou-se que a rotura se iniciou nas extremidades do “taper” e a propagação deu-se até ao meio da junta. A Figura 4.7 permite visualizar esse tipo de rotura. Num destes houve separação total da junta, nos restantes não.

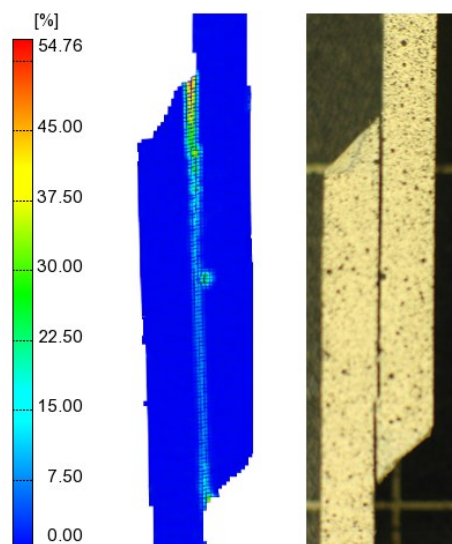


Figura 4.7. Rotura do provete com “taper” em adesivo de 45°.

Nos provetes com “taper” em adesivo de 60° a rotura ocorreu de igual modo ao caso dos provetes com 30°, tendo-se observado a separação total dos aderentes. Contudo, a iniciação e propagação foram inversas aos provetes de 30°. Iniciou-se no ponto B e terminou

no ponto A (Figura 4.8). Tal como nos provetes de 30° os “*tapers*” ficaram agarrados a um dos aderentes.

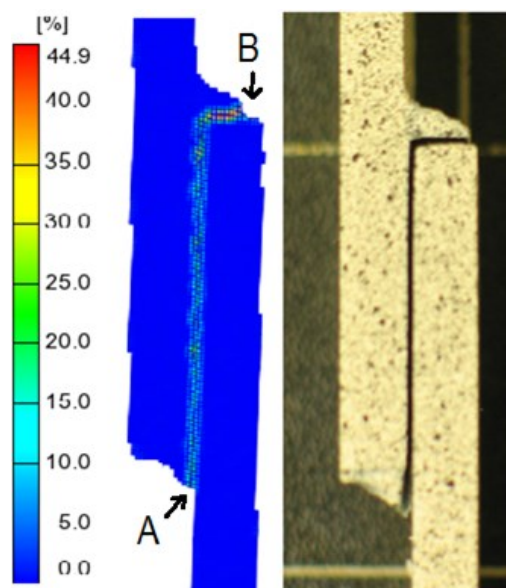


Figura 4.8. Rotura do provete com “*taper*” em adesivo de 60°.

4.2.3. Provetes Com “*taper*” no Aderente

A rotura dos provetes com “*taper*” no aderente iniciou-se nas extremidades e propagou-se até ao meio da junta. Nos provetes com “*taper*” de 45° e 60° observou-se a separação total da junta, enquanto que no caso dos “*tapers*” de 30° tal não se verificou. Na Figura 4.9 visualiza-se a separação para um provete com “*taper*” de 30°.

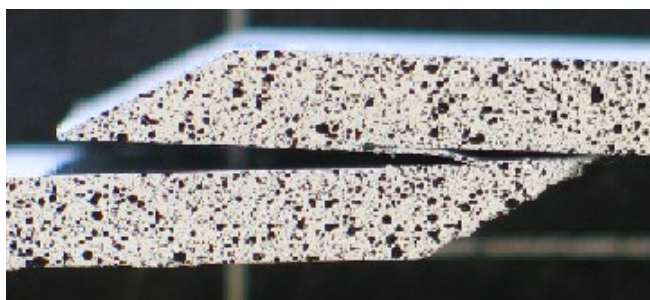


Figura 4.9. Rotura do provete com “*taper*” no aderente de 30°.

4.2.4. Provetes Com “*taper*” de Adesivo Invertido

A rotura neste tipo de provetes foi igual nos casos com “*taper*” de adesivo de 30° e 60°. A iniciação da mesma ocorreu nas extremidades da sobreposição (no “*taper*”) e progrediu até ao centro da junta. A Figura 4.10 ilustra uma rotura deste tipo. Nestes provetes existiu separação total da junta tendo o “*taper*” ficado agarrado a um dos aderentes.

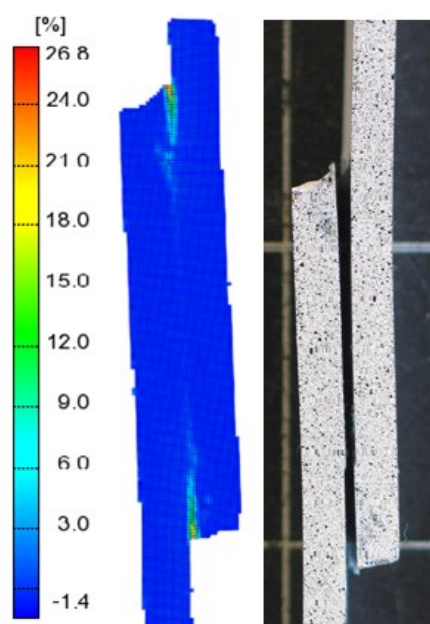


Figura 4.10. Rotura do provete com "taper" invertido de 30°.

Na generalidade dos provetes com 45° a rotura também se iniciou nas extremidades do "taper", mas progrediu segundo a linha de rotura como se pode ver na Figura 4.11.

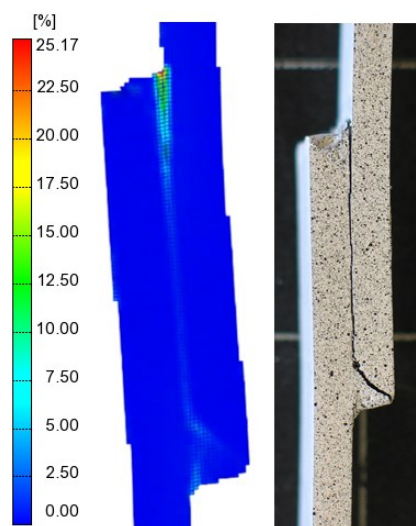


Figura 4.11. Rotura do provete com "taper" invertido de 45°.

As fotos referentes à rotura dos restantes provetes encontram-se no APÊNDICE

B.

4.3. Morfologia da superfície de rotura

O estudo da superfície de rotura foi efetuado por forma a permitir tirar conclusões sobre a resistência mecânica das juntas. De acordo com o referido ao longo do presente trabalho, a rotura dos adesivos pode ser adesiva ou coesiva. Num provete ideal, no qual a preparação dos aderentes e a molhagem do adesivo é boa, teoricamente a rotura seria apenas coesiva. Segundo Loureiro (1995) o trabalho exterior necessário para que ocorra rotura por coesão é inferior ao trabalho necessário para que ocorra rotura por adesão. Contudo, mesmo tomando o maior cuidado durante a preparação e colagem das juntas é impossível garantir que os provetes tenham a qualidade pretendida. Nas superfícies dos provetes verificou-se os 2 tipos de roturas. Na maioria dos provetes houveram roturas puramente adesivas, nos restantes mistura de roturas coesiva e adesiva.

A rotura por coesão é caracterizada por aparentar um tom mais claro (esbranquiçado) e relevo na superfície. Uma rotura por adesão (tom esverdeado) é caracterizada pelo arrancamento do adesivo junto à superfície do aderente.

A medição das áreas de coesão foi efetuada em todos os provetes em estudo, tendo-se relacionado as mesmas com as respetivas áreas totais. Através das áreas obtidas foi calculada a percentagem de rotura por coesão em cada junta. A diferença entre a percentagem de rotura por coesão e 100% (rotura total) indica-nos a percentagem de rotura por adesão. Assim, nos provetes com rotura exclusivamente adesiva a percentagem de adesão é 100% e não existe coesão.

Na Tabela 4.2 são apresentadas as percentagens de rotura por coesão médias de cada provete.

Os provetes que registaram roturas mistas foram os sem “taper” e 4 provetes com “taper” em adesivo (dois de 30°, um de 45° e outro de 60°). Nos provetes com “taper” invertido e em alumínio a rotura deu-se sempre por adesão.

Tabela 4.2. Médias das percentagens de coesão.

Geometria	Média da percentagem de Coesão [%]
Provete 1 sem “taper”	42,6
Provete 2 sem “taper”	39,5
Provete 3 sem “taper”	15,6
Provete 2 com “taper” em adesivo de 30°	15,0
Provete 3 com “taper” em adesivo de 30°	4,6
Provete 1 com “taper” em adesivo de 45°	2,7
Provete 1 com “taper” em adesivo de 60°	11,2

A Figura 4.12 ilustra um caso em que ocorreu uma rotura do tipo coesiva e adesiva, identificada como rotura mista, salientando a área de rotura coesiva num provete sem “taper”.

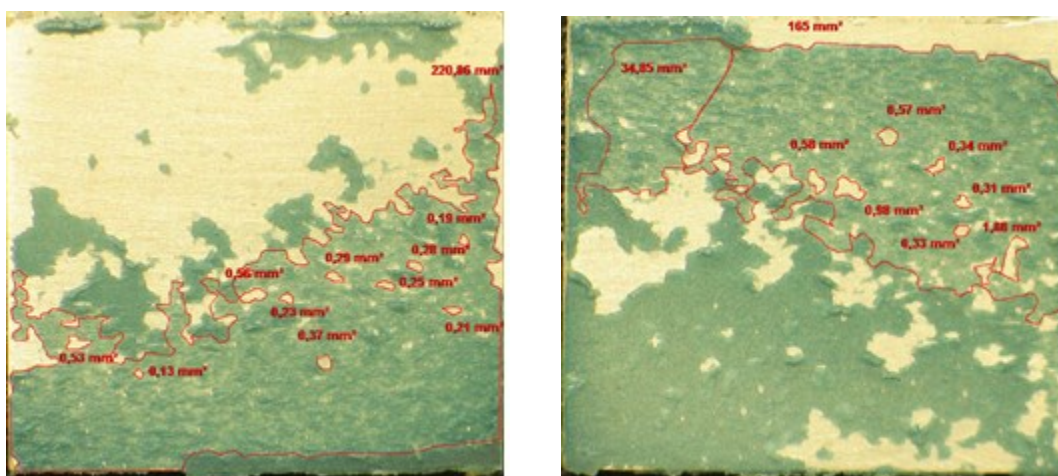


Figura 4.12. Superfície de rotura mista do provete 2 sem “taper”.

As roturas apresentadas nos restantes provetes sem “taper” foram semelhantes à apresentada na Figura 4.12. Pode-se ver que o adesivo ficou dividido em ambas as superfícies, nas zonas de coesão. A percentagem de coesão nestes provetes foi a mais elevada.

Na Figura 4.13 são apresentadas as superfícies de rotura mista de um provete com “taper” em adesivo. Verifica-se que neste a área de coesão é inferior ao provete anteriormente apresentado.

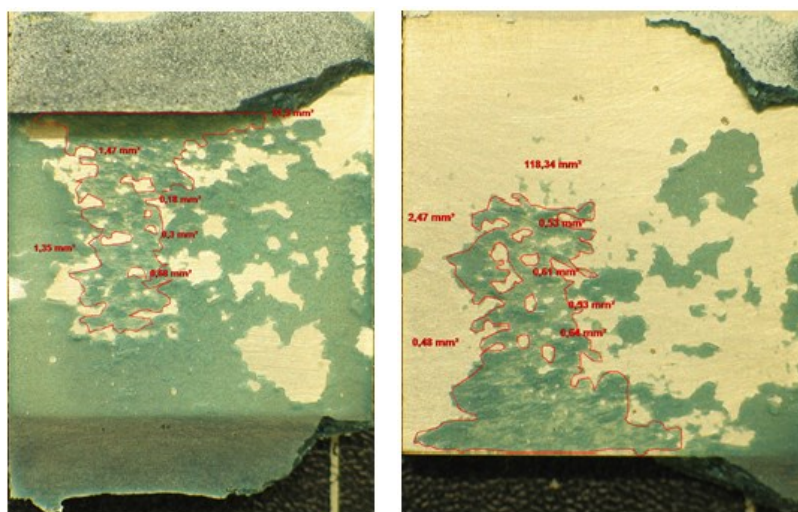


Figura 4.13. Superfície de rotura mista do provete 2 com “taper” no adesivo de 30°.

Os provetes com uma superfície de rotura mista foram, comparativamente aos provetes com o mesmo ângulo e geometria, os que obtiveram maior resistência. A presença de roturas coesivas pode indicar então que a qualidade da colagem é melhor. A Figura 4.14 mostra outro provete com rotura mista.

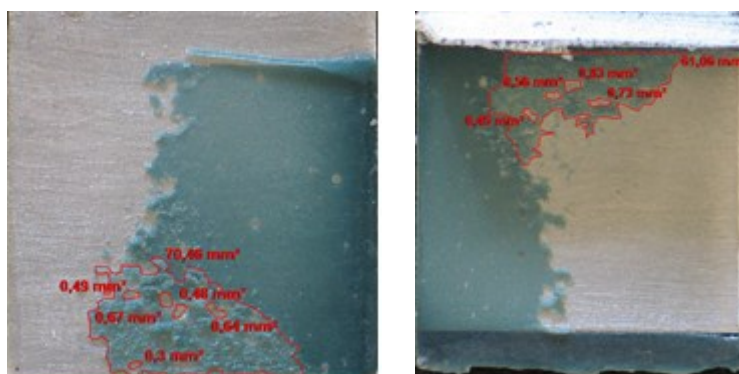


Figura 4.14. Rotura mista no provete 1 com “taper” em adesivo de 60°.

Nos provetes com maior resistência de junta (“taper” de adesivo invertido) a rotura ocorreu sempre por adesão. Ainda assim, a maior resistência dos mesmos é explicada pela influência do comprimento de sobreposição como se verá mais à frente.

A rotura total por adesão leva a querer que o adesivo não aderiu convenientemente à superfície do aderente. A Figura 4.15 apresenta um caso evidente deste tipo de rotura. Nesta figura é visível a ausência total de rotura por coesão

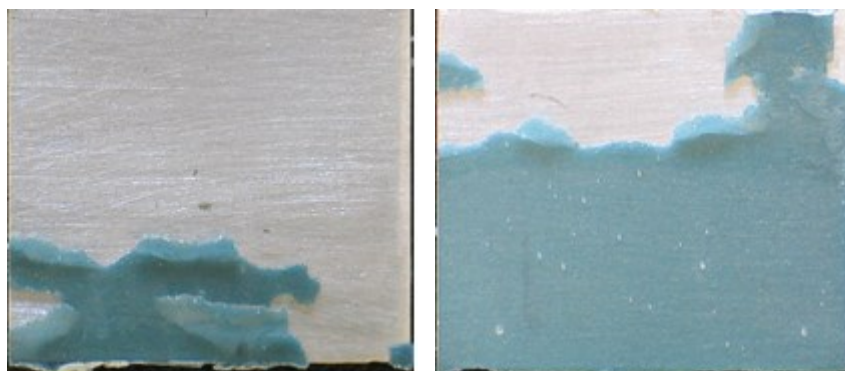


Figura 4.15. Rotura por adesão no provete 1 com “*taper*” em alumínio de 30°.

O adesivo ficou maioritariamente num dos aderentes. Este tipo de rotura foi característico da generalidade dos provetes com “*taper*” em alumínio.

Tal como no caso dos provetes com “*taper*” em alumínio, também no caso dos provetes com “*taper*” de adesivo invertido se verificou apenas rotura por adesão. Contudo, a distribuição do adesivo nas superfícies dos aderentes foi mais dispersa, quando comparada com os provetes com “*taper*” no alumínio. A Figura 4.16 apresenta a rotura num destes provetes.

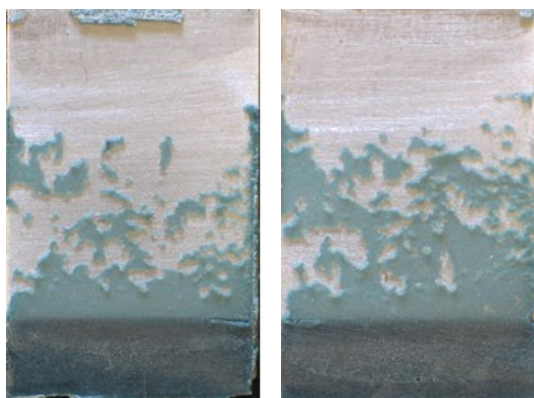


Figura 4.16. Rotura por adesão no provete 2 com “*taper*” invertido de 30°.

As superfícies de rotura foram analisadas com mais detalhe no microscópio *Stemi 2000-C* da *Zeiss*. Na Figura 4.17 constata-se uma rotura mista para um provete sem “*taper*” e na Figura 4.18 pode-se observar a rotura por adesão no caso de um provete com “*taper*” no adesivo a 45°.



Figura 4.17. Rotura mista no provete sem “taper” (vista de microscópio).



Figura 4.18. Rotura por adesão no provete com “taper” em adesivo com 45° (vista de microscópio).

A utilização do microscópio permitiu ainda visualizar bolhas de ar existentes na camada de adesivo como se pode verificar na Figura 4.19. A presença das mesmas constitui um defeito e pode prejudicar a resistência das juntas.

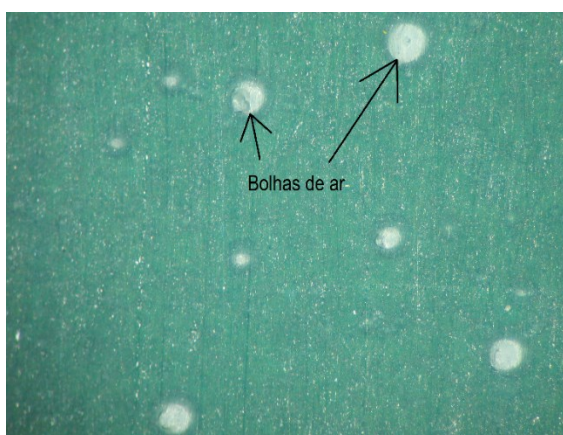


Figura 4.19. Bolhas de ar existentes no provete com “taper” em adesivo de 30° (vista de microscópio).

As restantes imagens das superfícies de rotura são disponibilizadas no APÊNDICE C.

4.4. Morfologia da superfície de rotura em alta definição

A utilização de um microscópio eletrónico de varrimento (SEM) permitiu analisar com mais detalhe as superfícies de rotura dos provetes.

Na Figura 4.20 é apresentada a superfície de um provete sem “*taper*” obtida por SEM com uma ampliação de 20x.

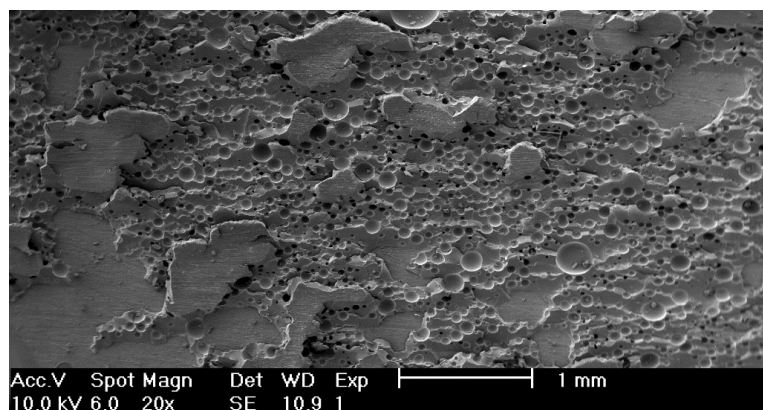


Figura 4.20. Zona de rotura mista no provete 2 sem “*taper*”.

Conforme se verifica existem zonas claramente distintas na Figura 4.20. A zona de adesão apresenta uma superfície mais lisa, enquanto nas zonas de coesão a superfície apresenta uma forma nodular. Na Figura 4.21 são apresentadas ambos os tipos de rotura com uma ampliação de 200x.

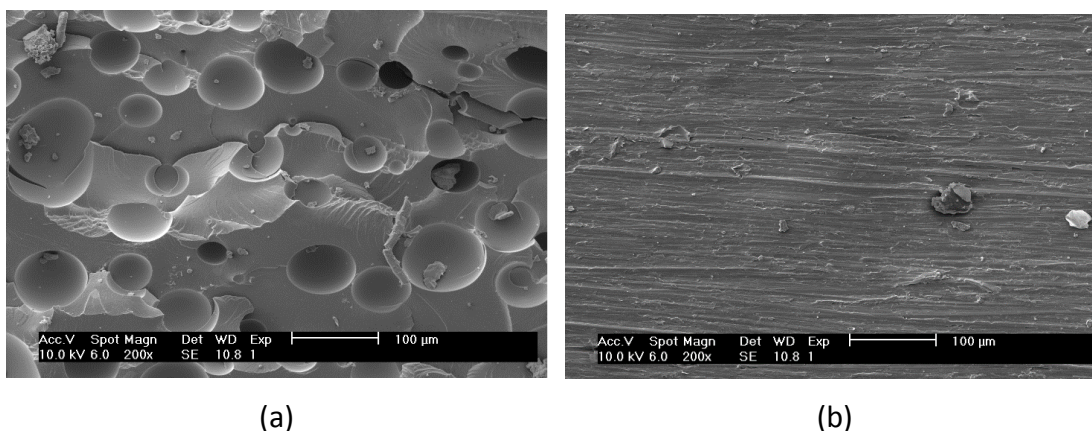


Figura 4.21. Zonas de rotura no provete 2 sem “*taper*”. Rotura por coesão(a), rotura por adesão(b).

Na zona de rotura por coesão, Figura 4.21(a), a forma nodular do adesivo é explicada pela deformação plástica da junta. Isto é, se a qualidade da colagem é boa, a junta resiste ao aumento do carregamento até que os aderentes se deformem plasticamente (rotação da junta). A deformação plástica dos aderentes leva a que ocorra o arrancamento de pedaços do adesivo (rotura por coesão) que originam a forma nodular do mesmo (Nikbakht *et al.*, 2008).

Por outro lado, na zona de rotura por adesão, Figura 4.21(b), verificou-se que a superfície do outro aderente ficou impressa no adesivo. O aspeto aparentemente lamelar da superfície pode ser justificado devido ao tratamento de desoxidação efetuado durante a preparação da colagem.

Na Figura 4.22, também com ampliação de 200x, é novamente realçado o aspeto da zona de rotura por adesão, mas, num provete com “taper” em adesivo. O adesivo contém a impressão do outro aderente. Para além disso verifica-se um rasgo onde o adesivo rompeu.

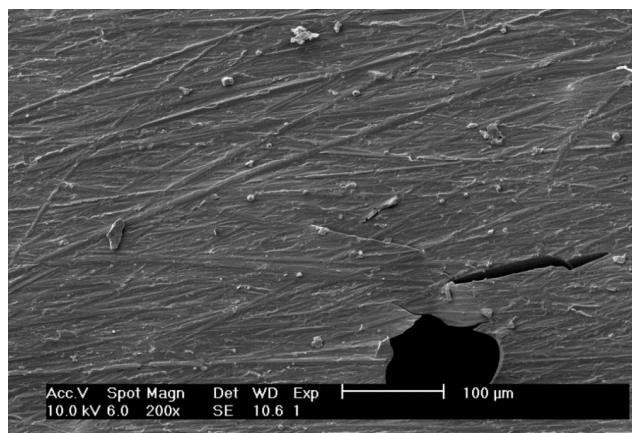


Figura 4.22. Zona de rotura por adesão no provete 2 com “taper” em adesivo de 30°.

A Figura 4.23 corresponde a um provete com “taper” de adesivo invertido no qual ocorreu rotura por adesão. Verifica-se contudo que na interface entre o adesivo e o metal de base a rotura ocorreu por coesão. Ainda assim, a rotura por coesão é muito pequena comparativamente à zona de rotura por adesão. Na zona de rotura por adesão os pontos pretos correspondem a pequenos poros. Por outro lado, na zona de rotura por coesão, foi verificado o adesivo com a forma nodular.

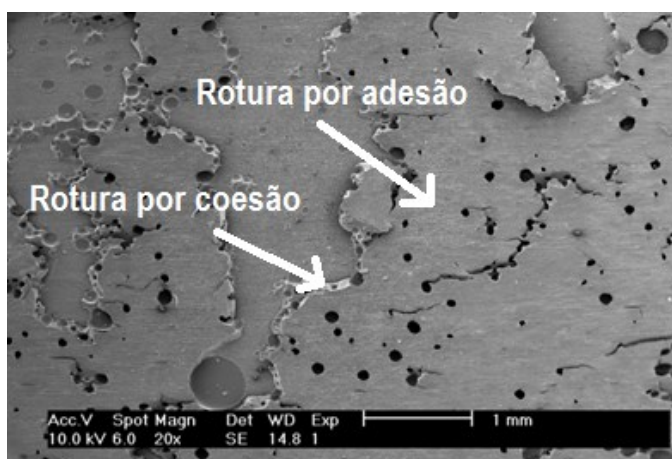


Figura 4.23. Zona de rotura por adesão no provete 3 com “taper” de adesivo invertido de 60°.

4.5. Resistência estática de juntas coladas

Durante a realização dos ensaios de tração o *software* da máquina Instron 4206, permitiu a obtenção da força em função da extensão para cada geometria estudada, conforme Figura 4.24 a Figura 4.29. Os resultados relativos às forças máximas e respectivos desvios padrão, para todos os casos em estudo, são disponibilizados no APÊNDICE D.

Os dados relativos às forças máximas dos provetes sem “taper” serviram como referência de comparação, Figura 4.24. Os provetes sem “taper” passam a ser designados por ST seguido pelo número do provete.

A média das forças máximas alcançada pelos provetes ST foi 9990N. A resistência ao corte estática dos restantes provetes foi comparada à dos provetes sem “taper”.

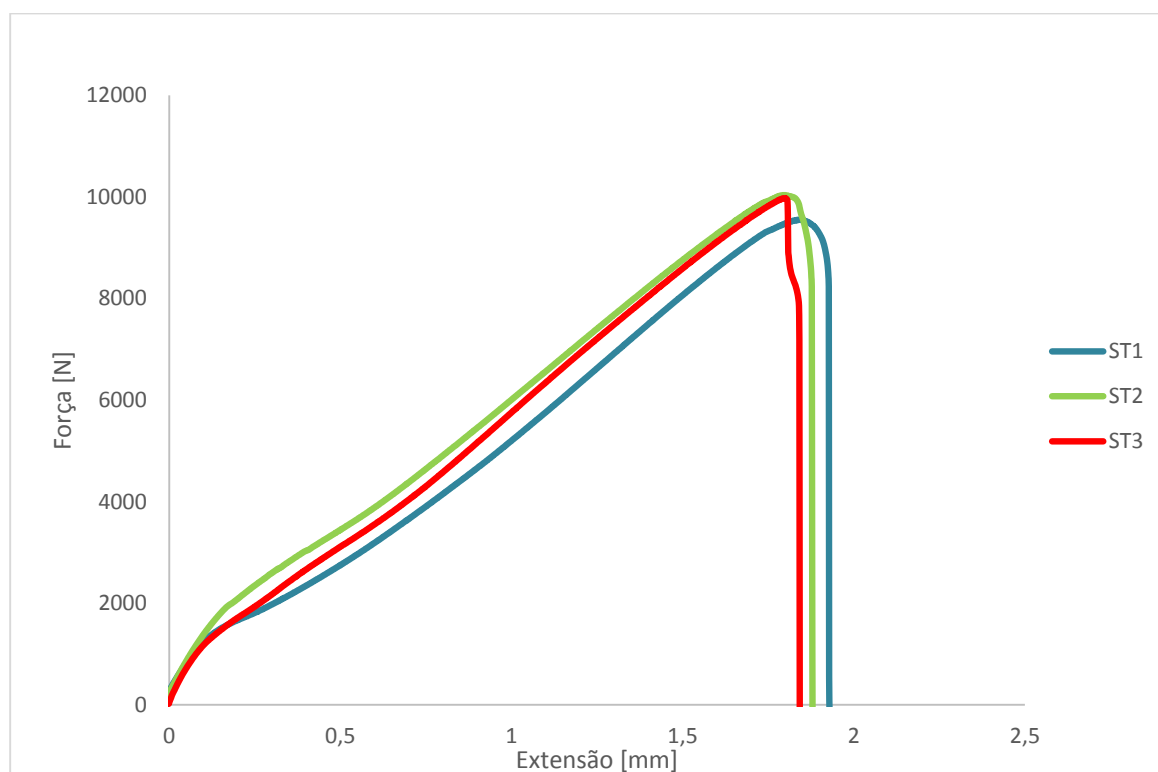


Figura 4.24. Força em função da extensão dos provetes sem “taper”.

Os provetes com “taper” em adesivo são designados pela letra C, seguida do ângulo de “taper”. Caso seja necessário referir um provete em particular será acrescentada a letra P com o número do provete.

Os resultados da força em função da extensão dos provetes com “taper” em adesivo (Figura 4.25) demonstram que os provetes C30 foram os que alcançaram maior resistência ao corte deste grupo. Os provetes C45 obtiveram uma média de forças máximas intermédias. Por fim, os provetes C60 foram os que obtiveram a média das forças máximas

mais baixas e como tal, resistência ao corte inferior. Estes resultados são observados em ambas as situações de rotura: mista e adesiva.

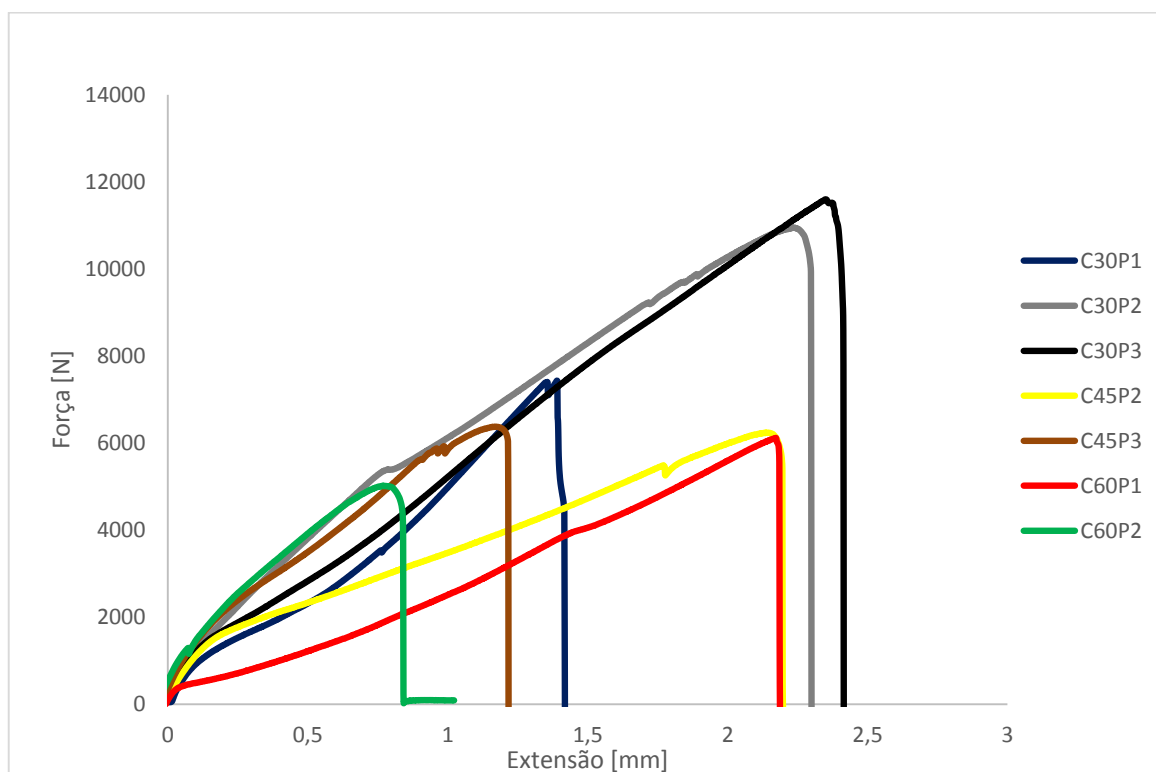


Figura 4.25. Força em função da extensão dos provetes com “taper” em adesivo.

Seria de esperar que os provetes com “taper” em adesivo resistissem tanto ou mais que os provetes sem “taper”. A utilização do “taper” em adesivo aumenta o comprimento de sobreposição da junta comparativamente aos provetes sem “taper”. Por exemplo nos provetes C30 apresentam um comprimento de sobreposição de 32mm, enquanto que para os provetes C60 esse valor é de 26mm (Tabela 4.1). Nesse sentido, a resistência da junta aumenta uma vez que se tem maior quantidade de material a resistir à solicitação, o que se verifica na Figura 4.26.

Conforme se pode observar o modo de rotura influencia o valor da resistência mecânica da junta. Se for provocada por falha de coesão e adesão, rotura mista, a resistência mecânica da junta é maior do que no caso de apenas se observar rotura por adesão.

De acordo com Hilderbrand M. (1992) a adição do adesivo teria como finalidade reduzir as tensões arrancamento no aderente e como tal aumentar a resistência da junta. Foi verificado este efeito apenas nos provetes C30P2 e C30P3. Para se conseguir explicar tais resultados é necessário voltar às superfícies de rotura.

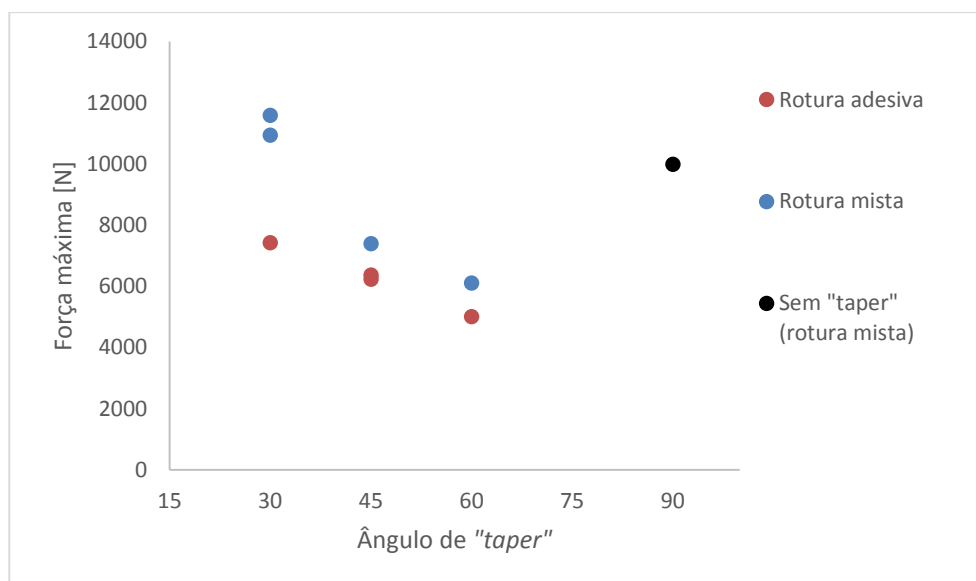


Figura 4.26. Força em função do ângulo de “taper” dos provetes com “taper” em adesivo e provetes sem “taper”.

Os provetes C30P2 e C30P3 tiveram uma rotura mista, o que poderá corresponder a uma melhor qualidade da colagem. Comparando a superfície de rotura de C30P2, Figura 4.13, com outro provete com rotura mista mas ângulo de “taper” diferente, C60P1 - Figura 4.14, verifica-se que em C30P2 as zonas com rotura por adesão são mais dispersas que no provete C60P1. Este fator contribui para a maior resistência de C30P2 e C30P3 (no provete C30P3 verificou-se a mesma situação).

No ângulo de “taper” de 45° o provete C45P1 foi o que obteve maior resistência. Este provete também apresentou uma rotura mista.

A mesma conclusão pode ser retirada para o caso dos provetes com ângulo de “taper” de 60°, em que o provete C60P1 apresenta uma maior resistência em comparação com o provete C60P2 cuja rotura é apenas caracterizada por falha de adesão.

Os provetes com “taper” em alumínio passam a ser designados pela sigla AL seguida do ângulo de “taper”. Caso seja necessário referir um provete em específico será acrescentada a letra P com o número do provete.

Os gráficos da força em função da extensão dos provetes com “taper” em alumínio (Figura 4.27) permitem concluir que estes foram os provetes que resistiram menos à solicitação de tração comparativamente a todos os outros. Neste grupo, os provetes AL60 foram os que obtiveram uma média de forças máximas superiores. Os provetes com AL30 foram os que alcançaram os piores resultados.

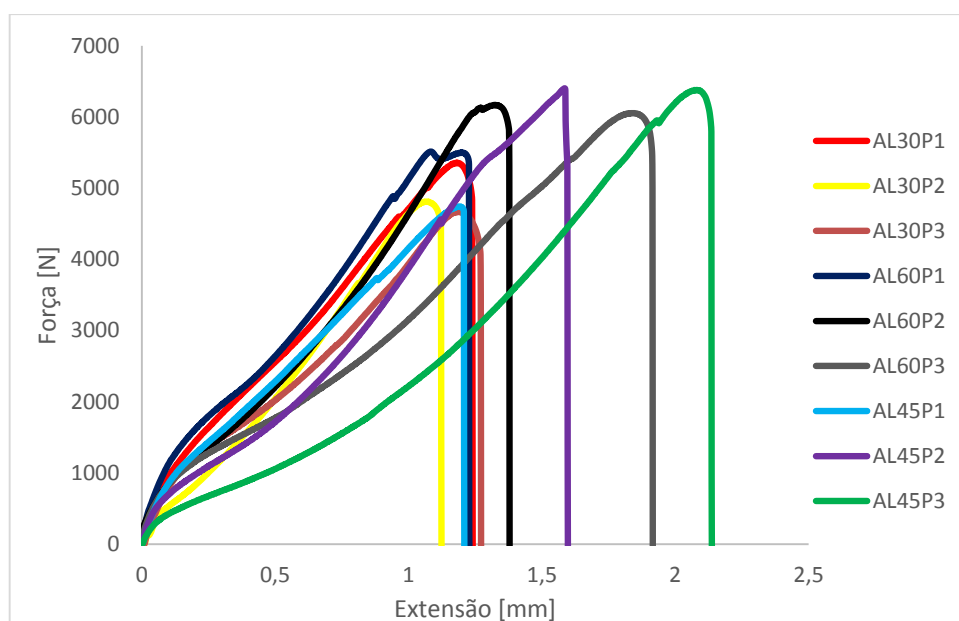


Figura 4.27. Força em função da extensão dos provetes com "taper" em alumínio.

Na Figura 4.28 apresenta-se a evolução da força máxima em função do ângulo de "taper" no aderente.

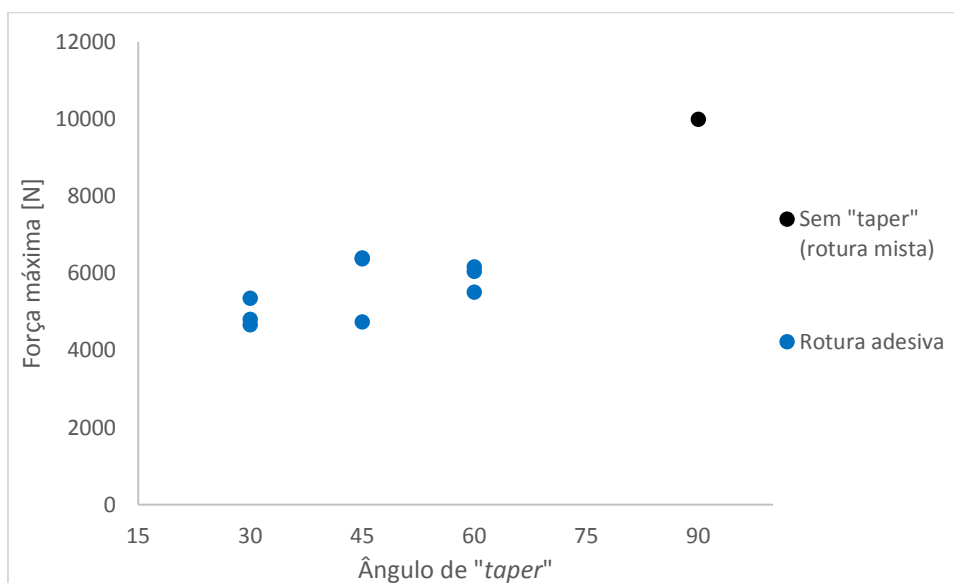


Figura 4.28. Força em função do ângulo de "taper" dos provetes com "taper" em alumínio.

Neste tipo de provetes a rotura ocorre apenas por falha de adesão. O comprimento de sobreposição é igual para todos, pelo que as pequenas diferenças observadas no valor da resistência se deve apenas à maior ou menor rigidez da extremidade da junta. De facto, juntas com "taper" no alumínio de 30° têm menor material logo apresentam menor rigidez, pelo que o valor da resistência é menor.

Os provetes com “taper” invertido passaram a ser designados pela letra I seguida do ângulo de “taper”. Se for necessário referir um provete em específico será acrescentada a letra P com o número do provete.

Os provetes com “taper” invertido (Figura 4.29) alcançaram forças máximas mais elevadas comparativamente a todos o outros. Neste caso, os provetes com média de forças máximas mais elevadas foram os de I30. Os provetes com I45 e I60 obtiveram praticamente as mesmas médias de força máxima, Figura 4.30.

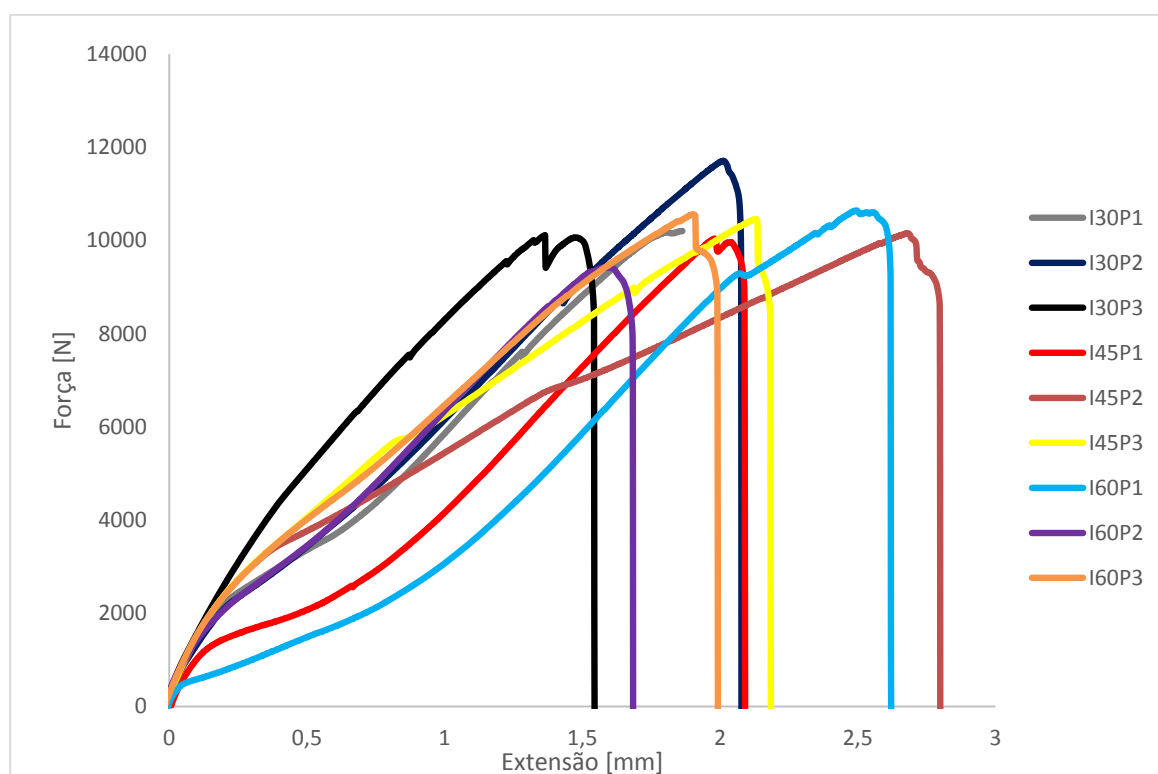


Figura 4.29. Força em função da extensão dos provetes com “taper” de adesivo invertido.

Também neste tipo de juntas o modo de rotura observado é apenas provocado por falha de adesão. Neste caso as diferenças notadas nos valores de resistência máxima podem ser atribuídas ao comprimento de sobreposição. De facto, com o aumento do comprimento de sobreposição, aumenta a resistência da junta (Banea *et al.*, 2009). Segundo estes autores, o aumento do comprimento de sobreposição aumenta a resistência ao corte de uma junta colada.

Verifica-se que ao inverter o provete biselado aumenta-se o comprimento de sobreposição que contém adesivo. Para os provetes I30 este valor é de 38mm, sendo que para o I60 é de 28mm.

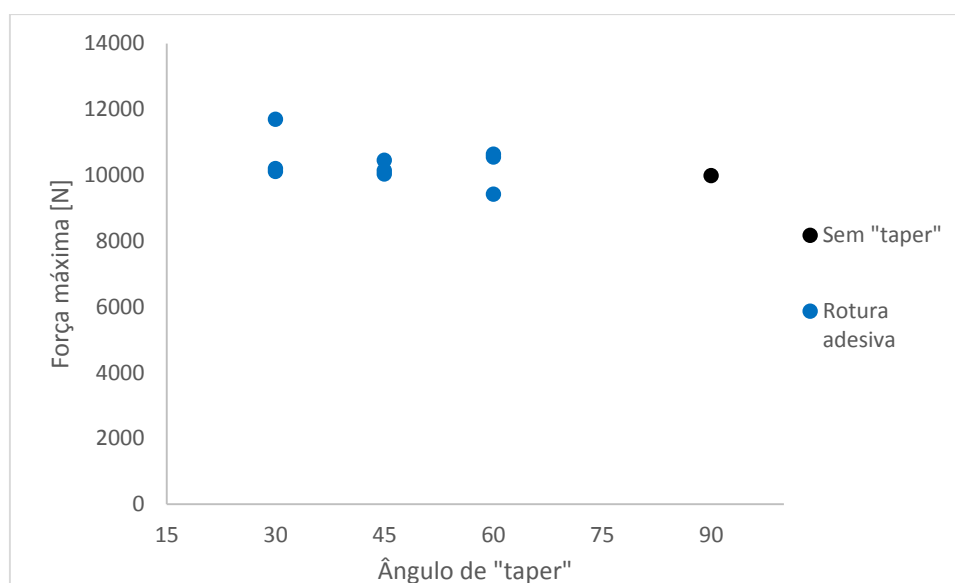


Figura 4.30. Força em função do ângulo de "taper" dos provetes com "taper" de adesivo invertidos.

Na Figura 4.31 constata-se que para além dos 20mm de sobreposição entre o alumínio existe um determinado comprimento remanescente, x , ao qual se adiciona adesivo. Este comprimento depende do ângulo de "taper" do provete. Se o ângulo de "taper" diminui o comprimento x aumenta, se o ângulo aumenta o comprimento x diminui. Este comportamento também é verificado nos provetes com "taper" em adesivo.

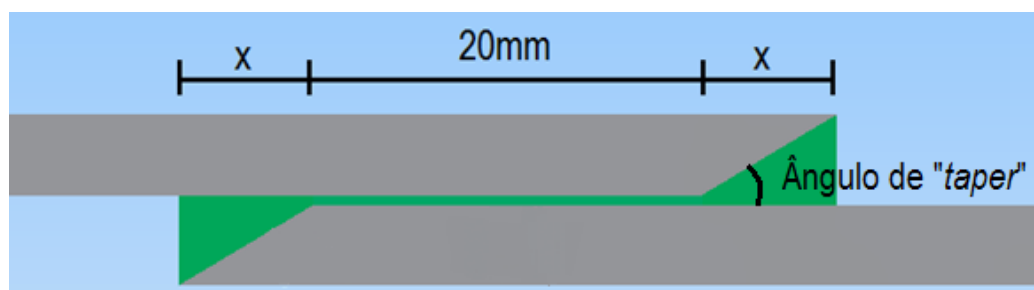


Figura 4.31. Influência do comprimento de sobreposição em provetes com "taper" invertido.

A Figura 4.32 ilustra a força máxima dos provetes em função do comprimento real de sobreposição. É possível verificar que os provetes com maior comprimento de sobreposição, correspondentes aos ângulos C30 e I30, foram os que resistiram mais ao corte. Os restantes provetes com "taper" invertido também alcançaram elevadas forças máximas.

Os provetes em alumínio e os provetes sem "taper" são os que têm o menor comprimento de sobreposição. Os provetes com "taper" em alumínio foram os que resistiram menos. Comparando, os provetes com "taper" em alumínio alcançaram resistências ao corte inferiores, na ordem dos 50%, relativamente aos provetes sem "taper".

Mais uma vez a explicação destes resultados prende-se no fato da rotura ter ocorrido apenas por adesão.

Em relação aos provetes com “taper” em adesivo verificou-se que os provetes com maior comprimento de sobreposição (C30) foram os que obtiveram melhores resultados. Os restantes pioraram a sua resistência comparativamente aos provetes de referência (ST). Seria de esperar que com um maior comprimento de sobreposição que os de referência, estes provetes apresentassem maior resistência. A falta de adesivo no “taper” (mencionada no Capítulo 4.1) em conjunto com o modo de rotura destes provetes são a causa da baixa resistência dos mesmos.

A análise da Figura 4.32 permite também concluir que para comprimentos de sobreposição idênticos, de 30mm, os provetes C45 e I45 obtiveram forças máximas distintas. A resistência dos provetes C45 foi 35% mais baixa. A qualidade dos “tapers” nos provetes de adesivo invertidos foi superior à dos provetes com o “taper” em adesivo. Este acréscimo de qualidade pode ser relacionado com a maior facilidade em distribuir o adesivo na junta durante o procedimento de colagem. Durante o processo de colagem, no caso dos provetes com “taper” de adesivo invertido, procedeu-se à adição do adesivo num espaço triangular com um aderente plano e um biselado. O facto de o aderente biselado ser invertido facilita a aderência do adesivo e a sua permanência nesse espaço. Por outro lado, no caso dos provetes com “taper” em adesivo, o adesivo é depositado nas extremidades da junta com o objetivo de formar o “taper”. Contudo, não existindo material que aja como suporte do adesivo, este escorre por ação da gravidade dificultando a formação adequada do “taper” deste tipo de geometria de junta.

A análise da Figura 4.32 permite concluir que, no geral, a resistência de uma junta depende do comprimento de sobreposição da mesma e conseqüentemente do ângulo de “taper”.

De acordo com o referido ao longo deste ponto pode-se constatar que os valores das forças máximas variam em função dos ângulos de “taper”. À exceção dos provetes com “taper” em alumínio, o aumento do ângulo de “taper” diminui a resistência mecânica das juntas. Este comportamento era o previsto uma vez que a quantidade de material resistente diminui. Contudo, não seria de esperar que a resistência dos provetes fosse inferior à dos sem “taper”. O comprimento de sobreposição é em todos os casos, igual ou superior à destes. O aumento da resistência dos provetes com “taper” em alumínio com o aumento do ângulo

de “taper” deve-se, tal como referido previamente neste ponto, ao aumento da rigidez do aderente na extremidade da sobreposição.

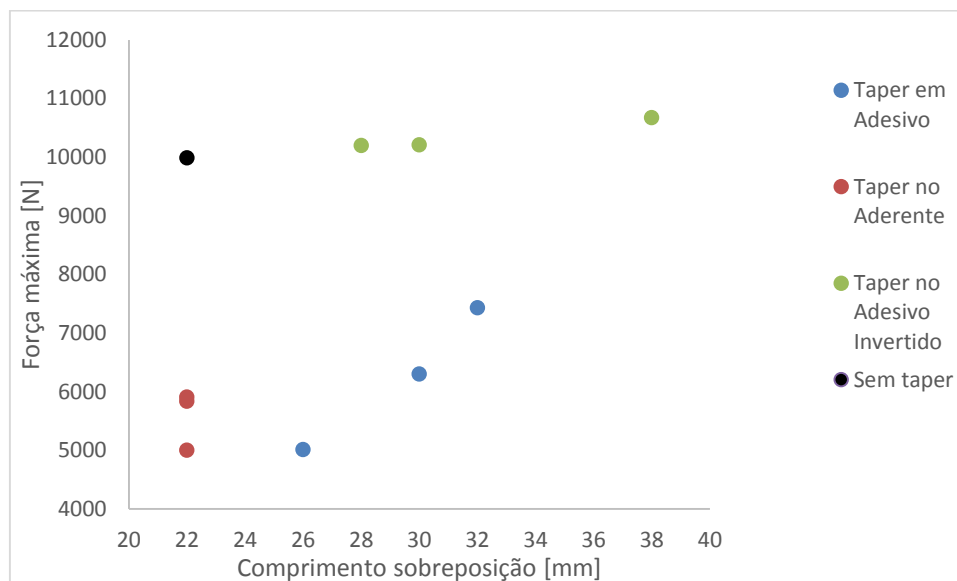


Figura 4.32. Força máxima em função do comprimento de sobreposição da junta.

4.6. Deformações Globais

A manipulação dos dados obtidos no *software* da máquina de ensaios de tração Instron 4206 permite obter as deformações globais dos provetes. Na Tabela 4.3 são apresentadas as médias das deformações e os respetivos desvios padrão.

Tabela 4.3. Média e desvio padrão das deformações globais

Geometria	Média [%]	Desvio Padrão [%]
Sem “taper”	1,26	0,02
“Taper” no adesivo 30°	1,59	0,04
“Taper” no adesivo 45°	1,15	0,06
“Taper” no adesivo 60°	1,02	0,09
“Taper” no aderente 30°	0,79	0,04
“Taper” no aderente 45°	1,27	0,17
“Taper” no aderente 60°	1,10	0,18
“Taper” invertido 30°	1,21	0,19
“Taper” invertido 45°	1,43	0,05
“Taper” invertido 60°	1,21	0,11

As deformações globais são muito reduzidas devido aos baixos deslocamentos entre as extremidades dos provetes.

As médias das deformações globais em função do ângulo de “taper” são apresentadas na Figura 4.33. Através das mesmas é possível analisar que apenas os provetes com “taper” em adesivo demonstram uma tendência decrescente à medida que o ângulo de “taper” aumenta. Esta tendência é explicada pelo facto dos provetes C30 terem maior resistência ao corte que os provetes C45 e C60.

Nos provetes com “taper” invertido e “taper” em alumínio, o ângulo de 30° registou a menor deformação global. O ângulo de 45° foi o que registou maior deformação global e o de 60° teve deformações intermédias. Não é possível afirmar que tenha existido uma tendência nos resultados relativos a estes provetes. Ainda assim, verifica-se que os provetes com maior resistência (provetes invertidos) alcançaram deformações globais maiores como seria de esperar visto que a deformação é função da força.

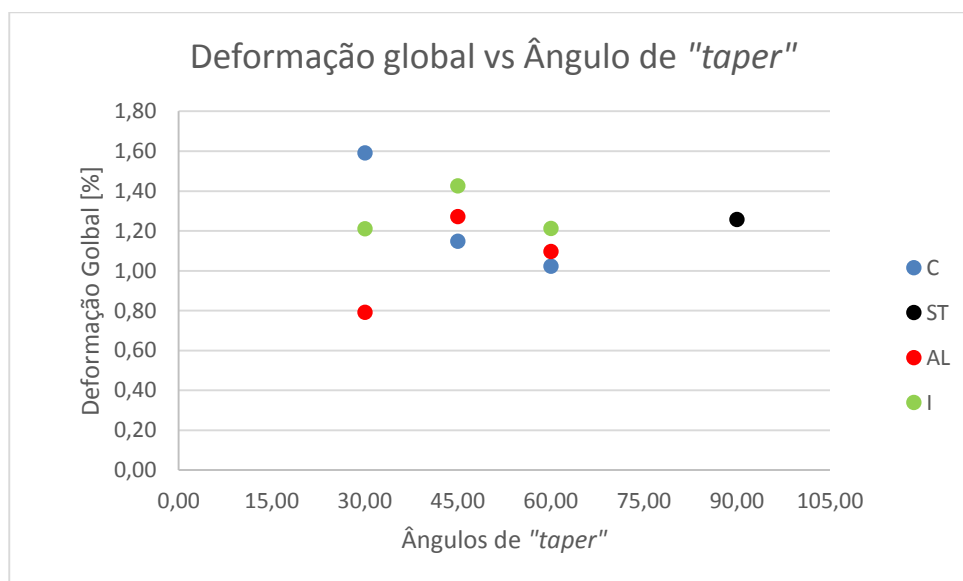


Figura 4.33. Deformações globais medias em função do ângulo de “taper”.

4.7. Deformações locais

A utilização da técnica de correlação de imagem digital (DIC) permite estudar detalhadamente o comportamento dos provetes durante o ensaio de tração no qual se analisa a resistência ao corte. O ARAMIS recolhe imagens do provete durante o ensaio e utiliza a técnica de correlação de imagem digital para as comparar, calcular as forças, deformações, visualizar as sequências de rotura dos provetes e zonas de concentração de tensões.

A grande vantagem da utilização deste sistema é permitir analisar as deformações locais. É possível selecionar uma região de interesse no provete e obter a evolução dos parâmetros, neste caso das forças e das deformações, nessa zona.

A região de maior interesse nos provetes em análise encontra-se nas extremidades da sobreposição metálica (na zona do aderente), concretamente no lado em que se inicia a rotura, Figura 4.34.

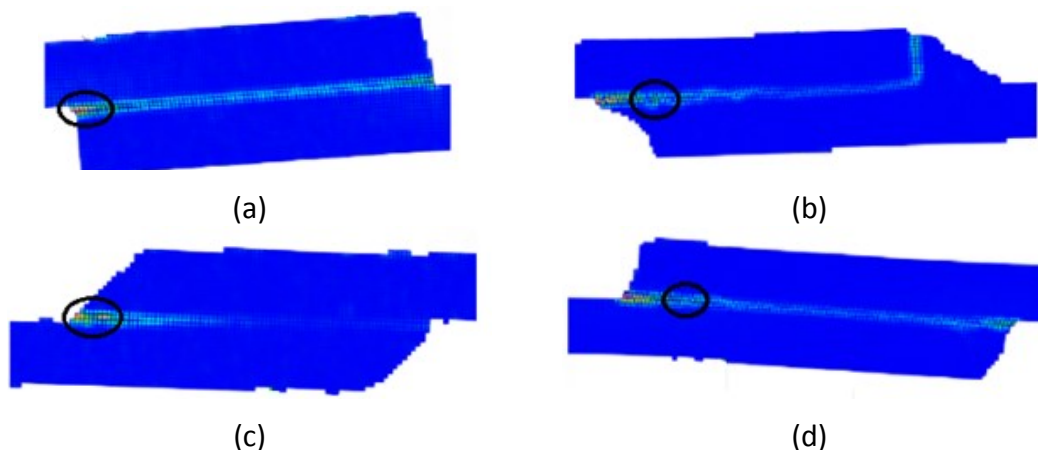


Figura 4.34. Regiões de análise de deformação local. Provette sem “taper” (a) Provete com “taper” em adesivo (b) Provete com “taper” em alumínio (c) Provete com “taper” invertido (d).

Na generalidade dos casos as roturas iniciaram-se nas zonas assinaladas na Figura 4.34.

Na Figura 4.35 é feita uma comparação entre as curvas de força em função da deformação obtidas pelo ARAMIS (local) e pela Instron 4206 (global) num provete com “taper” de 30° no adesivo.

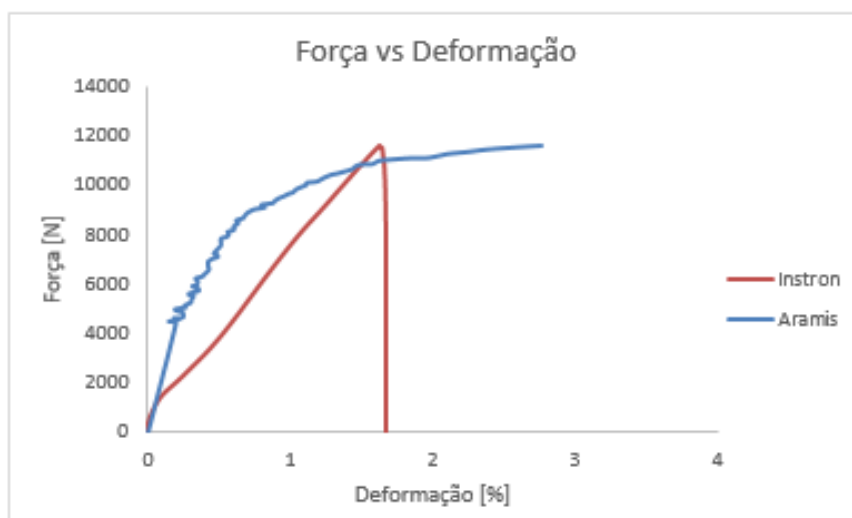


Figura 4.35. Comparação entre deformações locais (ARAMIS) e deformações globais (Instron) no provete C3OP3.

A comparação das curvas obtidas pelo ARAMIS e pelo Instron 4206 permitem concluir que as deformações locais são muito maiores às deformações globais. Esta diferença é atribuída ao facto de as deformações locais serem características do comportamento do adesivo. Por outro lado, as deformações globais caracterizam o comportamento de todo o provete. O adesivo deforma-se mais do que o aderente uma vez que possui uma ductilidade maior. A curva referente ao ARAMIS foi truncada para que fosse possível comparar à curva do Instron 4206. As curvas em causa são ilustrativas do comportamento dos restantes provetes.

4.7.1. Provetes sem “taper”

Na Figura 4.36 são apresentados dois estágios do ensaio num provete sem “taper”: um numa fase inicial e outro antes da rotura. Durante o ensaio a concentração de tensões aumenta nas extremidades da sobreposição até se iniciar a rotura. Nos restantes provetes com esta geometria a evolução da deformação com o aumento da força foi semelhante à aqui apresentada.

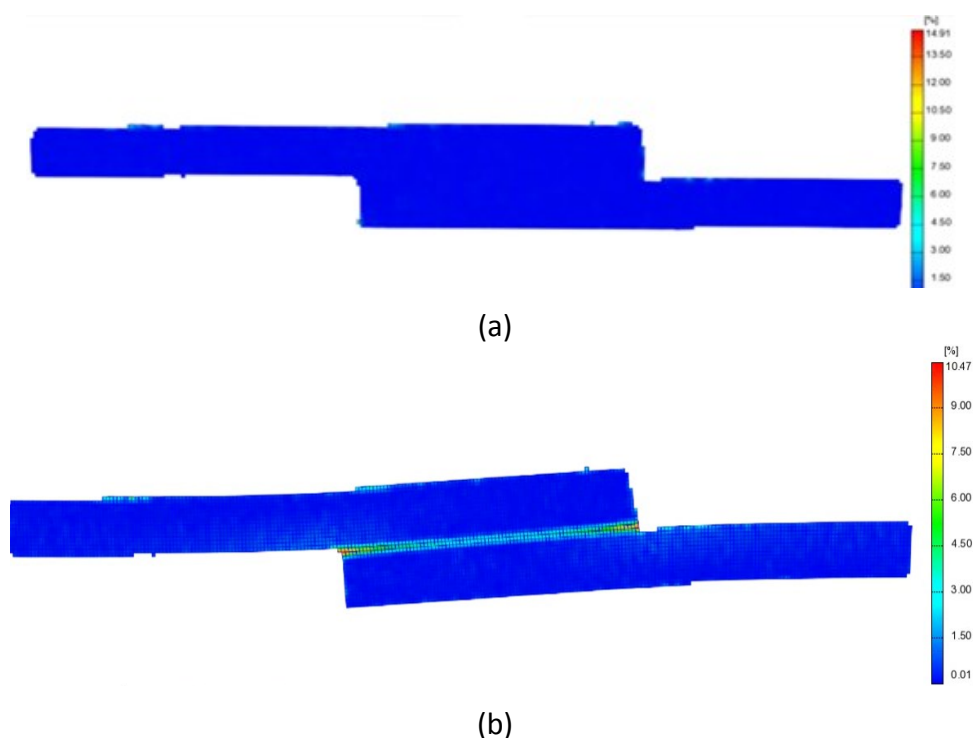


Figura 4.36. Rotura de um provete sem “taper”. Estágio 7 (a) Estágio 87(b).

A rotura nestes provetes foi mista. A análise das imagens dos provetes sem “taper” permite concluir que nestes ocorreu uma rotação da junta significativa. Associou-se a presença de roturas por coesão com a rotação da junta. Conforme é claramente visível na

Figura 4.36 (b), apesar da colocação dos batentes, não se conseguiu evitar a ocorrência de rotação da junta, pelo que para além das tensões de corte surgiram também tensões normais e arrancamento.

4.7.2. Provetes com “taper” em adesivo

Nos provetes deste tipo ocorreram 3 seqüências de roturas diferentes. Na Figura 4.37 ilustra-se um desses casos no estágio antes da rotura. A rotura iniciou-se na extremidade da sobreposição entre metais, na interface entre o “taper” e o aderente. Este modo de rotura verificou-se em ambos os provetes de 60° e num de 30°. Verificou-se ainda que nestes casos, a iniciação deu-se na extremidade que continha maior quantidade de “taper”.

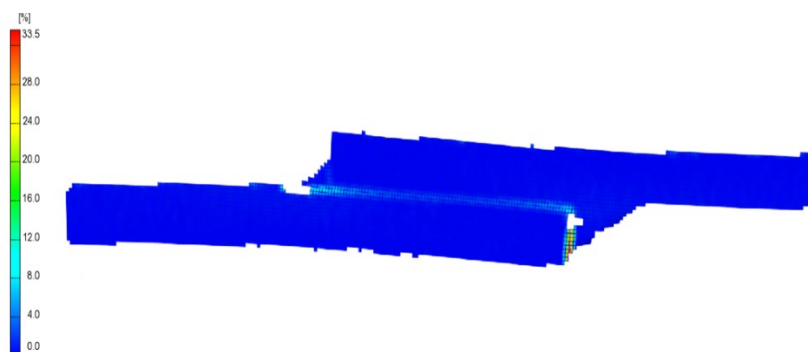


Figura 4.37. Zona de início de rotura de um provete 2 com “taper” em adesivo de 30°. Estágio 106.

A Figura 4.38 permite verificar outro provete no estágio anterior à rotura. Este tipo de rotura ocorreu em 2 provetes de 30° e num de 45°. A rotura começou na extremidade da sobreposição na zona do “taper”. Nestes casos, a rotura iniciou-se na zona com menor quantidade de “taper”.

Os provetes C30P1 e C45P2 iniciaram a rotura tal como apresentado na Figura 4.37. É de mencionar que comparativamente aos mesmos ângulos “taper” foram os que registaram menor resistência, pouca rotação da junta e rotura por adesão. A existência de menor quantidade de material leva a que haja uma maior concentração de tensões na zona de iniciação de rotura.

Por sua vez o provete C30P3, que também iniciou rotura do mesmo modo dos anteriores, foi o que alcançou maior resistência dos três. Neste provete ocorreu maior deformação plástica dos aderentes e rotura mista, o que sugere uma melhor qualidade da colagem.

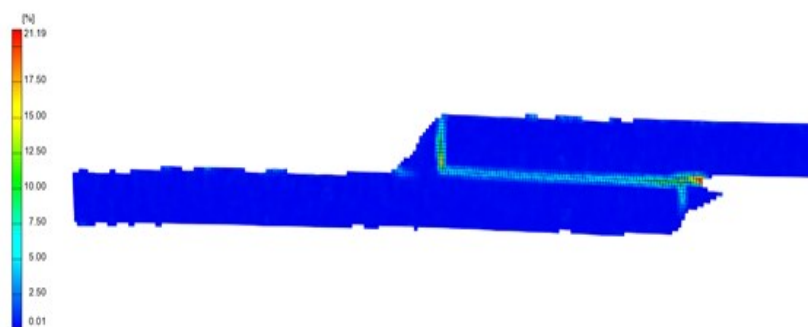


Figura 4.38. Zona de início de rotura de um provete 2 com “taper” em adesivo de 45°.

O ultimo tipo de sequência de rotura destes provetes é o apresentado na Figura 4.39. Esta ocorreu nos 2 provetes de 45° com maior resistência. A iniciação da rotura deu-se nas extremidades do “taper” e percorreu toda a interface entre adesivo e aderente ao meio da junta

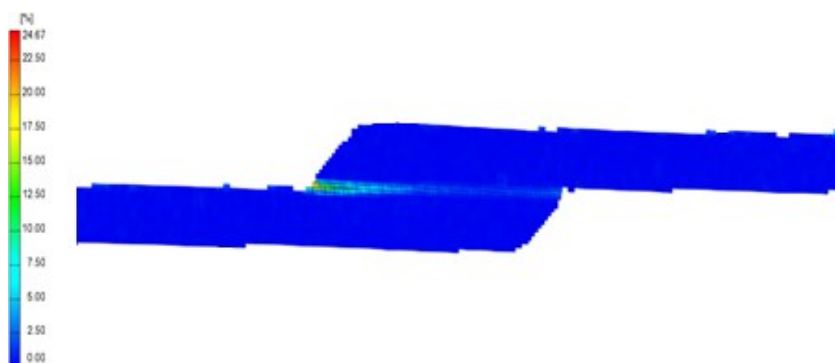


Figura 4.39. Zona de início de rotura de um provete com “taper” em adesivo de 45°.

4.7.3. Provetes com “taper” em alumínio

Nos provetes com “taper” em alumínio a rotura evoluiu na interface entre o aderente e o adesivo, Figura 4.40. As roturas destes provetes ocorreram por falha de adesão. Tal como foi referido durante o trabalho a menor resistência destes provetes está associada a este modo de rotura e à geometria da própria junta.

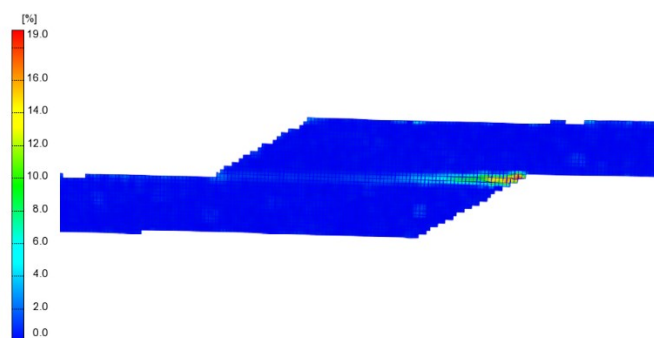


Figura 4.40. Zona de início de rotura de um provete com “taper” no aderente de 30°.

4.7.4. Provetes com “taper” invertido

Na generalidade dos casos nesta geometria de “tapers” a rotura iniciou-se nas extremidades da sobreposição e progrediu até ao centro da junta. A Figura 4.41 é ilustrativa deste tipo de roturas.

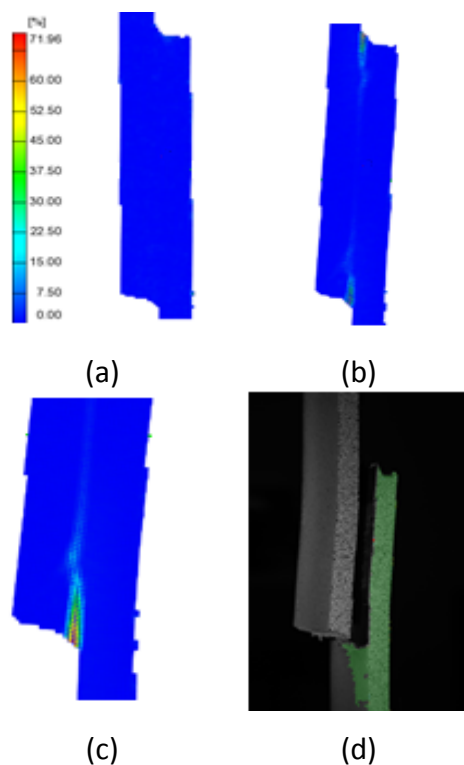


Figura 4.41. Rotura de um provete com “taper” invertido. Estágio 2(a) Estágio 84(b) Estágio 102(c) Estágio 103(d).

Um dos provetes com 45° de “taper” apresentou uma sequência de rotura diferente. A rotura iniciou-se nas extremidades e progrediu até ao centro da junta. A Figura 4.42 demonstra esse tipo de rotura.

A análise destas imagens em conjunto com as imagens das superfícies de rotura permitiram concluir que nas juntas sem “taper” e algumas juntas com “taper” em adesivo existiu maior rotação da junta. Nestas a rotura foi mista, podendo ser justificado pela melhor qualidade de colagem que possibilitou a deformação dos aderentes.

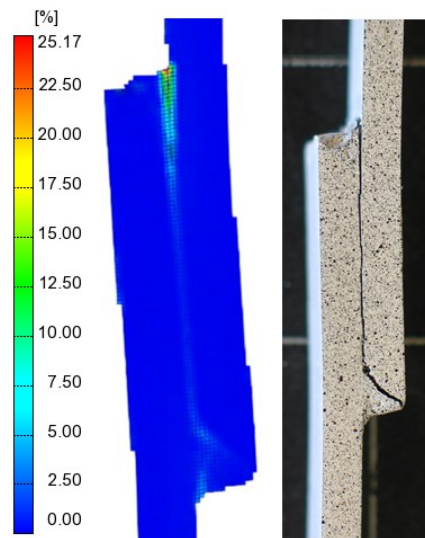


Figura 4.42. Rotura do provete 1 com “taper” invertido de 45°. Estágio 102.

As juntas com “taper” invertido também sofreram elevada rotação. Contudo a rotura foi por adesão. Estes factos permitem afirmar que este tipo de geometria melhora a resistência da junta. A utilização deste tipo de “taper” diminui a concentração de tensões nas extremidades da sobreposição, permitindo deste modo uma resistência mais elevada. Assim sendo, prevê-se que existindo maior qualidade da colagem na junta com “taper” invertido a resistência seria significativamente aumentada.

5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS

5.1. Conclusões

Os dados obtidos durante a realização deste trabalho permitem retirar as seguintes conclusões:

- A qualidade da colagem é determinante na resistência das juntas coladas.
- Foram registadas roturas mistas (adesiva e coesiva) apenas nos provetes sem “*taper*”, em dois provetes com “*taper*” em adesivo de 30° e, num provete de 45° e outro de 60°. Nos restantes as roturas foram 100% adesivas.
- Os provetes com roturas mistas foram os que alcançaram resistência maior comparativamente a outros da mesma geometria de “*taper*” e do mesmo ângulo.
- Os provetes com “*taper*” de adesivo invertido foram os mais resistentes à solicitação de corte.
- Os provetes com “*taper*” em alumínio foram os que menos resistiram.
- O aumento do comprimento de sobreposição aumenta a resistência das juntas coladas.
- A utilização de “*taper*” não aumenta significativamente a resistência das juntas.

5.2. Propostas para futuros trabalhos

- Estudar resistência mecânica de diferentes geometrias de “*taper*”: *fillet* arredondado e indentação.

- Estudar resistência mecânica de provetes com as mesmas características geométricas utilizando adesivo dúctil.
- Estudar a influência da espessura de adesivo na resistência mecânica de juntas coladas

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, R. D. e Harris, J. A., “Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods”, *International Journal of Adhesives*, Vol.4 N°2, 1984.
- Adams, R. D. e Harris, J.A., “The influence of local geometry on the strength of adhesive joints”, *Materials Engineering Research Laboratories Ltd, University of Bristol, UK*, 1987.
- American Chemical Society, consultado em 21/09/2014 “Bakelite: The World’s First Synthetic Plastic” em *National Historic Chemical Landmarks*.
- Arenas, J. M.; Narbón, J. J.; Alía, C., “Optimum adhesive thickness in structural adhesives joints using statistical techniques based on Weibull distribution”, *Polytechnic University of Madrid*, 2009.
- Banea, M. D. e da Silva, L.F.M., “Mechanical Characterization of Flexible Adhesives”, *Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto*, 2009.
- Borgmeier, P. R. e DeVries, K. L., “A Fracture Mechanics Analysis of the Effects of Tapering Adherends on Strength of Adhesive Lap Joints” em “*Journal of Adhesion Science and Technology*”, 1993.
- Branco, M. Ferreira, M., Costa, J., Ribeiro, S., “*Projecto de Órgãos de Máquinas*”. Editora Calouste Gulbenkian, 2005
- da Silva, L.; Lima, R.; Teixeira, R.; Puga, A., “Closed-form solutions for adhesively bonded joints”, *Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto*, 2008.
- da Silva, L. F. M.; Adams, R. D.; Ochmer, A., “*Handbook of Adhesion Technology*”, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 124-125, 2011.
- da Silva, L.F.M., de Magalhães, A.G. e de Moura, M.F.S.M., *Juntas Adesivas Estruturais*, Publindústria, Edições Técnicas , Porto, 2007.

- Davis, J., “ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys”, ASM International, 1993.
- Delmonte, J., “The Technology of Adhesives”, Reinhold, Nova Iorque, 1947.
- Esteves, J., “Estudo do comportamento de adesivos estruturais”, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1990.
- Gleich, D. M., Van Tooren, M. J. L., Beukers A. Journal of Adhesion Science Technology, 15, 1091, 2001
- Goland, M. e Reissner, E., “The stresses in cemented joints.” J Appl Mech, 1944.
- Hart-Smith, L. J., “Adhesive-bonded single laps joints”, NASA Report, CR-112236, Langley Research Center, Hampton, 1973.
- Hildebrand, M., “Non Linear analysis and optimization of adhesively bonded single lap joints between fiber-reinforced plastics and metals”, Technical Research Centre of Finland Manufacturing Technology, Finland, 1992
- Keimel, F. A., “Historical Development of Adhesives and Adhesive Bonding”, Marcel Dekker, Inc, Nova Iorque, 2003.
- Lang, T. P. e Mallick, P. K., “Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints”, Mechanical Engineering Department, University of Michigan-Dearborn, Dearborn, 1997.
- Leitão, C., Galvão, I., Leal, R.M., Rodrigues, D.M., “Determination of Local Constitutive Properties of Aluminum Friction Stir Welds Using Digital Image Correlation”, Elsevier Science Publishers Ltd, Coimbra, Portugal, 2011.
- Loureiro, A. J. R, Ligações adesivas, Universidade de Coimbra, 1995
- Luo, Q. e Tong, L., “Analytical solutions for adhesive composite joints considering large deflection and transverse shear deformation in adherends”, School of Aerospace, Mechanical and Mechatronic Engineering, The University of Sydney, Sydney, 2006.

- Magalhães, M., da Silva, L., Marques, E., “Adhesive joint development for aerospace applications”, Departamento Engenharia Mecânica, Universidade do Porto, 2010.
- Marques, I. “Estudo da Influência do Ângulo de Taper em Juntas Coladas”, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, 2014.
- Moreira, D. C., Nunes, L. C. S., “Experimental Analysis of Bonded Single Lap Joint With Flexible Adhesive”, *Applied Adhesion Science*, 2014, 2:1.
- Mazza, P; Martini, F; Sala, B; Magi, M; Colombini, M; Giachi, G; Landucci, F; Lemorini, C.; Modugno, F. e Ribechini, E. "A new Palaeolithic discovery: tarhafted stone tools in a European Mid-Pleistocene bone-bearing bed", *Journal of Archaeological Science*. Dipartimento di Scienze della Terra e Museo di Storia Naturale, Sezione di Geologia e Paleontologia, Università di Firenze, Florence, 2006.
- Nikbakht, M e Choupani, N., “Experimental investigation of mix mode fracture behaviour of woven laminated composite”, Mechanical Engineering Department, Sahand University of Technology, 2008.
- Sancaktar, E. e Nirantar, P., “Increasing strenght of single lap joints of metal adherends by taper minimization”, Department of Polymer Engineering, The University of Akron, 2002
- Santos, A. F., “Avaliação do comportamento mecânico de um adesivo estrutural epóxi utilizado na indústria automobilística”, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- Sawa, T.; Liu, J.; Nakano, K.; Tanaka, J., “A two-dimensional stress analysis of single-lap adhesive joints of dissimilar adherends subjected to tensile loads”, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2000.
- Solmaz, M. Y. e Turgut, A., “An experimental and numerical study on the effects of taper angles and overlap length on the failure and stress distribution of adhesively-bonded single-lap joints”, Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Firat University, Elazig, 2011.
- Smith, W. F., “Principles of Materials Science and Engineering”, McGraw-Hill, 1998.

Volkersen, O., “Die Niet kraftverteilung in Zugbeanspruchten mit Konstanten Laschenquerschnitten”, Luftfahrtforschung, 1938.

ANEXO A



Advanced Materials

Araldite® 420 A/B

Structural Adhesives

ARALDITE® 420 A/B

Two component epoxy adhesive system

Key properties

- Very high lap shear and peel strength
- Bonds a wide variety of materials (metal, composite and thermoplastics)
- Good moisture resistance
- Extremely tough and resilient adhesive

Description

ARALDITE® 420 A/B is a two-component room temperature curing, epoxy adhesive paste of high strength and toughness. Performances can be enhanced by post-curing at elevated temperature. It is suitable for bonding a wide variety of metals, ceramics and many other substrates in common use.

Product data

Property	Araldite 420 A	Araldite 420 B	Mixed Adhesive
Colour (visual)	Yellow	Blue	Dark green
Specific gravity	1.2	1.0	approx. 1.1
Viscosity at 25°C (Pa.s)	100-300	0.6-1.4	35-45
Pot Life (100 gm at 25°C)			60 min

Processing

Pretreatment

The strength and durability of a bonded joint are dependent on proper treatment of the surfaces to be bonded. At the very least, joint surfaces should be cleaned with a good degreasing agent such as acetone, iso-propanol (for plastics) or other proprietary degreasing agents in order to remove all traces of oil, grease and dirt. Low grade alcohol, gasoline (petrol) or paint thinners should never be used. The strongest and most durable joints are obtained by either mechanically abrading or chemically etching ('pickling') the degreased surfaces. Abrading should be followed by a second degreasing treatment.

Mix ratio	Parts by weight	Parts by volume
Araldite 420 A	100	100
Araldite 420 B	40	50

The resin and hardener should be blended until they form a homogeneous mix. Araldite® 420 A/B is available in cartridges incorporating mixers and can be applied as ready to use adhesive with the aid of the tool recommended by Huntsman Advanced Materials.

Figura AN.1. Folha número 1 de especificação do adesivo Araldite 420 A/B.



Application of adhesive

The resin/hardener mix is applied with a spatula, to the pretreated and dry joint surfaces.
 A layer of adhesive 0.05 to 0.10 mm thick will normally impart the greatest lap shear strength to the joint.
 The joint components should be assembled and clamped as soon as the adhesive has been applied. An even contact pressure throughout the joint area will ensure optimum cure.

Mechanical processing

Specialist firms have developed metering, mixing and spreading equipment that enables the bulk processing of adhesive.
 We will be pleased to advise customers on the choice of equipment for their particular needs.

Equipment maintenance

All tools should be cleaned with hot water and soap before adhesives residues have had time to cure. The removal of cured residues is a difficult and time-consuming operation.
 If solvents such as acetone are used for cleaning, operatives should take the appropriate precautions and, in addition, avoid skin and eye contact.

Times to minimum shear strength

Temperature	°C	23	40	60	100
Cure time to reach	hours	7.5			
LSS > 1N/mm ²	minutes		100	35	< 5
Cure time to reach	hours	11	2	1	
LSS > 10N/mm ²	minutes				20

LSS = Lap shear strength.

Typical cured properties

Unless otherwise stated, the figures given below were all determined by testing standard specimens made by lap-jointing 114 x 25 x 1.6 mm strips of aluminium alloy. The joint area was 12.5 x 25 mm in each case.
 The figures were determined with typical production batches using standard testing methods. They are provided solely as technical information and do not constitute a product specification.

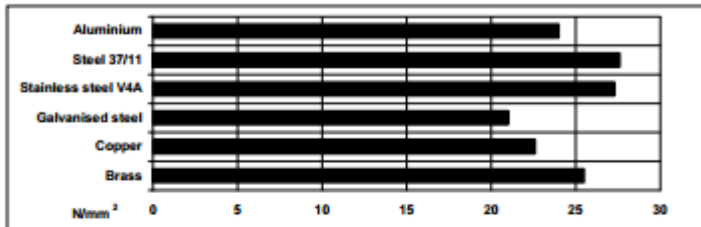
Note: The data in this edition is based on recent retesting of the product.

Figura AN.2. Folha número 2 de especificação do adesivo Araldite 420 A/B.



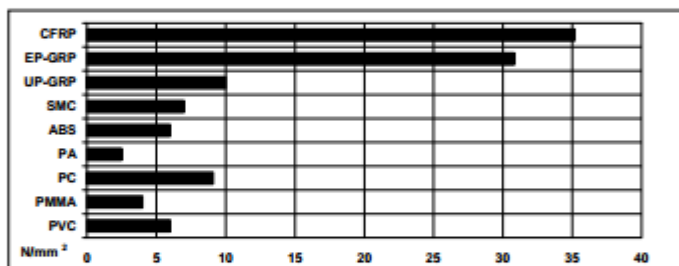
Average lap shear strengths of typical metal-to-metal joints (ISO 4587)

Cured for 16 hours at 40°C and tested at 23°C
 Pretreatment - Sand blasting



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

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



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

A: Cure: 4 hours at 50°C B: cure: 7 days at RT

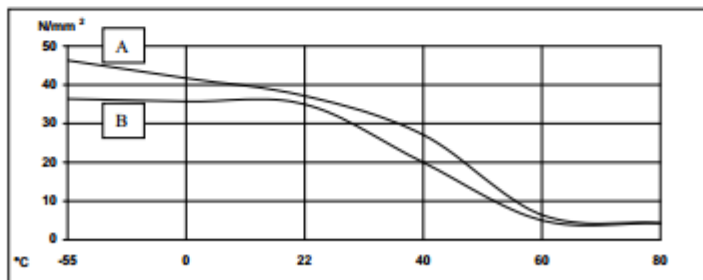


Figura AN.3. Folha número 3 de especificação do adesivo Araldite 420 A/B.

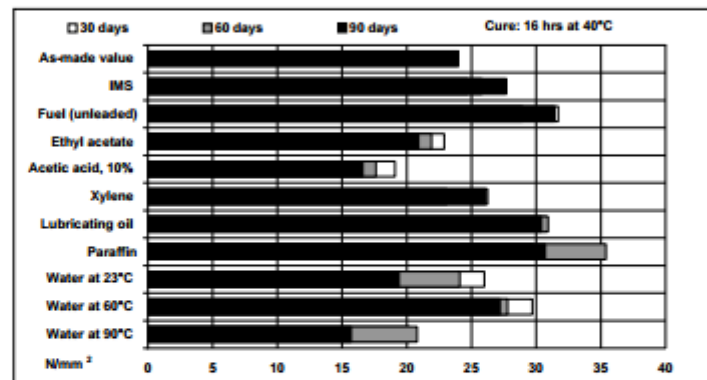
Glass transition temperature

Cure: 16 hours at 40°C

56 °C by DMA

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

Unless otherwise stated, L.S.S. was determined after immersion for 30,60 and 90 days at 23 °C



Tensile strength at 23°C (ISO 527)

29 MPa

E-modulus

1495 MPa

Elongation at break

4.6 %

Shore Hardness (D scale) (ISO 868/03)

75 D

Cure 16 hours/ 40°C, tested at 23°C,

50%RH

Shear modulus G' (ISO 6721)

Cure: 16 hours/ 40°C

-20°C - 1.00 GPa

0°C - 880 MPa

23°C - 730 MPa

60°C - 74 MPa

90°C - 5.5 MPa

Figura AN.4. Folha número 4 de especificação do adesivo Araldite 420 A/B.



Storage	ARALDITE® 420A and Araldite® 420 B may be stored for up to 3 years at room temperature provided the components are stored in sealed containers. The expiry date is indicated on the label.
Handling precautions	<p>Caution</p> <p>Our products are generally quite harmless to handle provided that certain precautions normally taken when handling chemicals are observed. The uncured materials must not, for instance, be allowed to come into contact with foodstuffs or food utensils, and measures should be taken to prevent the uncured materials from coming in contact with the skin, since people with particularly sensitive skin may be affected. The wearing of impervious rubber or plastic gloves will normally be necessary; likewise the use of eye protection. The skin should be thoroughly cleansed at the end of each working period by washing with soap and warm water. The use of solvents is to be avoided. Disposable paper - not cloth towels - should be used to dry the skin. Adequate ventilation of the working area is recommended. These precautions are described in greater detail in the Material Safety Data sheets for the individual products and should be referred to for fuller information.</p>
Huntsman Advanced Materials	<p>All recommendations for the use of our products, whether given by us in writing, verbally, or to be implied from the results of tests carried out by us, are based on the current state of our knowledge. Notwithstanding any such recommendations the Buyer shall remain responsible for satisfying himself that the products as supplied by us are suitable for his intended process or purpose. Since we cannot control the application, use or processing of the products, we cannot accept responsibility therefor. The Buyer shall ensure that the intended use of the products will not infringe any third party's intellectual property rights. We warrant that our products are free from defects in accordance with and subject to our general conditions of supply.</p> <p>Huntsman Advanced Materials warrants only that its products meet the specifications agreed with the buyer. Typical properties where stated, are to be considered as representative of current production and should not be treated as specifications.</p> <p>The manufacture of materials is the subject of granted patents and patent applications; freedom to operate patented processes is not implied by this publication.</p> <p>While all the information and recommendations in this publication are, to the best of our knowledge, information and beliefs accurate at the date of publication, NOTHING HEREIN IS TO BE CONSTRUED AS A WARRANTY, EXPRESS OR OTHERWISE.</p> <p>IN ALL CASES, IT IS THE RESPONSIBILITY OF THE USER TO DETERMINE THE APPLICABILITY OF SUCH INFORMATION AND RECOMMENDATIONS AND THE SUITABILITY OF ANY PRODUCT FOR ITS OWN PARTICULAR PURPOSE.</p> <p>The behaviour of the products referred to in this publication in manufacturing processes and their suitability in any given end-use environment are dependent upon various conditions such as chemical compatibility, temperature, and other variables, which are not known to Huntsman Advanced Materials. It is the responsibility of the user to evaluate the manufacturing circumstances on the final product under actual end-use requirements and to adequately advise and warn purchasers and users thereof.</p> <p>Products may be toxic and require special precautions in handling. The user should obtain Safety Data Sheets from Huntsman Advanced Materials containing detailed information on toxicity, together with proper shipping, handling and storage procedure and should comply with all applicable safety and environmental standards.</p> <p>Hazards, toxicity and behaviour of the products may differ when used with other materials and are dependent on manufacturer's circumstances or other processes. Such hazards, toxicity and behaviour should be determined by the user and made known to handlers, processors and end users.</p> <p>Except where explicitly agreed otherwise, the sale of products referred to in this publication is subject to the general terms and conditions of sale of Huntsman Advanced Materials LLC or of its affiliated companies including without limitation, Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA, Huntsman Advanced Materials Americas Inc., and Huntsman Advanced Materials (Hong Kong) Ltd.</p> <p>Huntsman Advanced Materials is an international business unit of Huntsman Corporation. Huntsman Advanced Materials trade through Huntsman affiliated companies in different countries including but not limited to Huntsman Advanced Materials LLC in the USA and Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA in Europe.</p> <p>Araldite is a registered trademark of Huntsman Corporation or an affiliate thereof.</p> <p>Copyright © 2009 Huntsman Corporation or an affiliate thereof. All rights reserved.</p>
<p>Huntsman Advanced Materials (Switzerland) GmbH Kölbeckstrasse 200 4057 Basel Switzerland</p> <p>Tel: +41 (0)61 299 11 11 Fax: +41 (0)61 299 11 12</p> <p>www.huntsman.com/advanced_materials Email: advanced_materials@huntsman.com</p>	
March 2009	ARALDITE® 420 A/B
	Page 5 of 1

Figura AN.5. Folha número 5 de especificação do adesivo Araldite 420 A/B.

APÊNDICE A – MÉDIA DE ÁREAS DE SOBREPOSIÇÃO

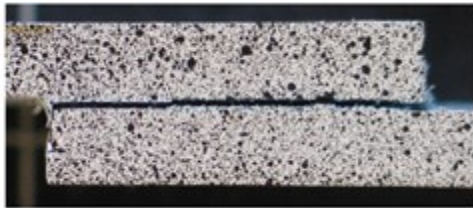
Tabela A.1. Médias de áreas de sobreposição e desvios padrão.

Geometria	Média da Áreas de sobreposição [mm²]	Desvios padrão das áreas [mm²]
Sem "taper"	530	11,6
"Taper" em adesivo 30	783	20,1
"Taper" em adesivo 45	732	27,2
"Taper" em adesivo 60	629	4,6
"Taper" em alumínio 30	532	19,6
"Taper" em alumínio 45	507	4,8
"Taper" em alumínio 60	517	13,9
"Taper" em invertido 30	935	26,1
"Taper" em invertido 45	737	8,3
"Taper" em invertido 60	693	20,4

APÊNDICE B – ROTURA DOS PROVETES

(Capítulo 4.2)

Provetes sem “taper”:



(a)

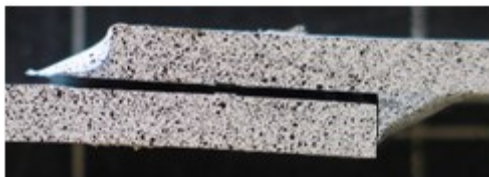


(b)

Figura B.1. Provetes sem “taper”. Amostra 1(a), Amostra 3 (b).

Provetes com “taper” em adesivo:

30°:



(a)



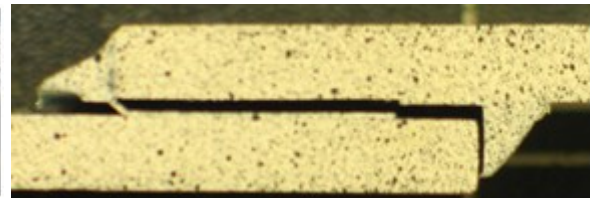
(b)

Figura B.2. Provetes com “taper” em adesivo de 30°. Amostra 2(a), Amostra 3 (b).

45°:



(a)



(b)

Figura B.3. Provetes com “taper” em adesivo 45°. Amostra 1(a), Amostra 2 (b).

60°:

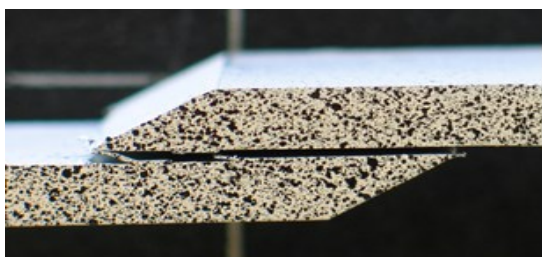


(a)

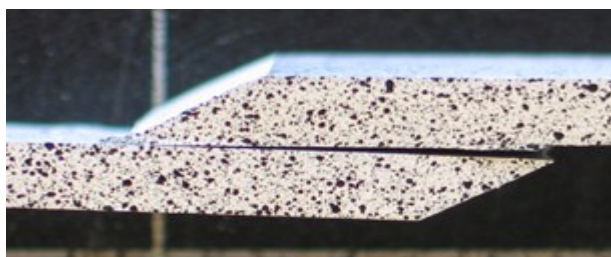
Figura B.4. Provetes com “taper” em adesivo 60°. Amostra 1(a).

Provetes com “taper” em alumínio:

30°:



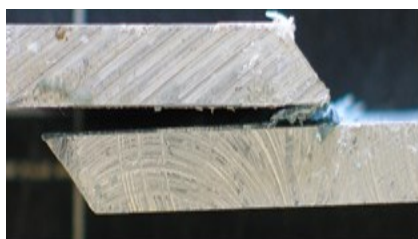
(a)



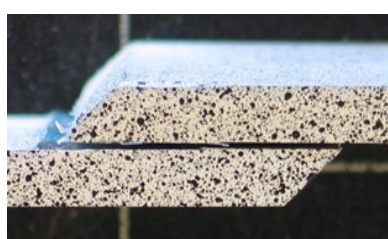
(b)

Figura B.5. Provetes com “taper” no aderente 30°. Amostra 1(a), Amostra 3 (b).

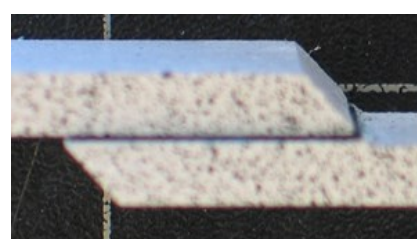
45°:



(a)



(b)



(c)

Figura B.6. Provetes com “taper” no aderente 45°. Amostra 1(a), Amostra 2 (b), Amostra 3(c).

60°:



(a)

(b)

(c)

Figura B.7. Provetes com “taper” no aderente 60°. Amostra 1(a), Amostra 2 (b), Amostra 3(c).

Provetes com “taper” invertido:

30°:

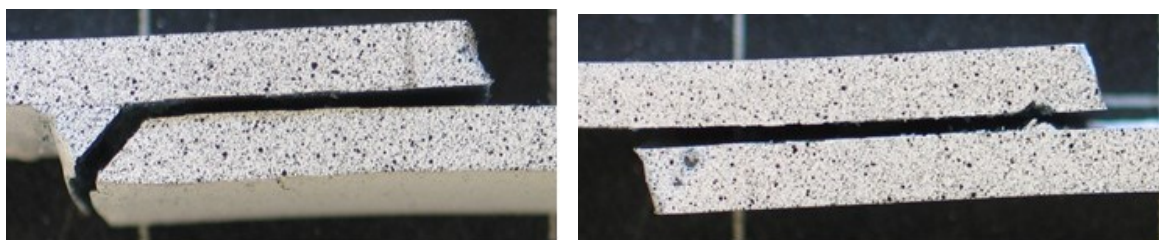


(a)

(b)

Figura B.8. Provetes com “taper” de adesivo invertido 30°. Amostra 2(a), Amostra 3 (b).

45°:



(a)

(b)

Figura B.9. Provetes com “taper” de adesivo invertido 45°. Amostra 1(a), Amostra 2 (b).

60°:



(a)

(b)

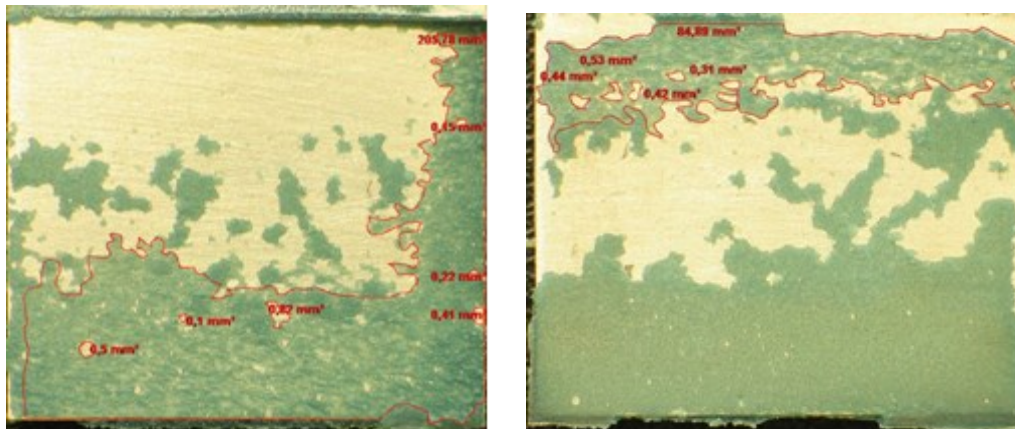
(c)

Figura B.10. Provetes com "taper" de adesivo invertido 60°. Amostra 1(a), Amostra 2 (b), Amostra 3(c).

APÊNDICE C – SUPERFÍCIES DOS PROVETES APÓS ROTURA

(Capítulo 4.3)

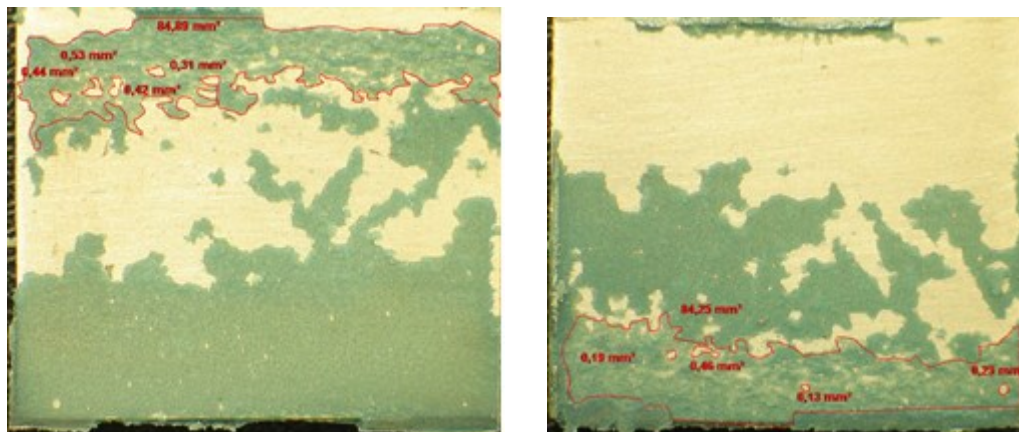
Provetes sem “taper”:



(a)

(b)

Figura C.1. Provette 1 sem “taper”. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).



(a)

(b)

Figura C.2. Provette 3 sem “taper”. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).

Provetes com “taper” em adesivo:

30°:

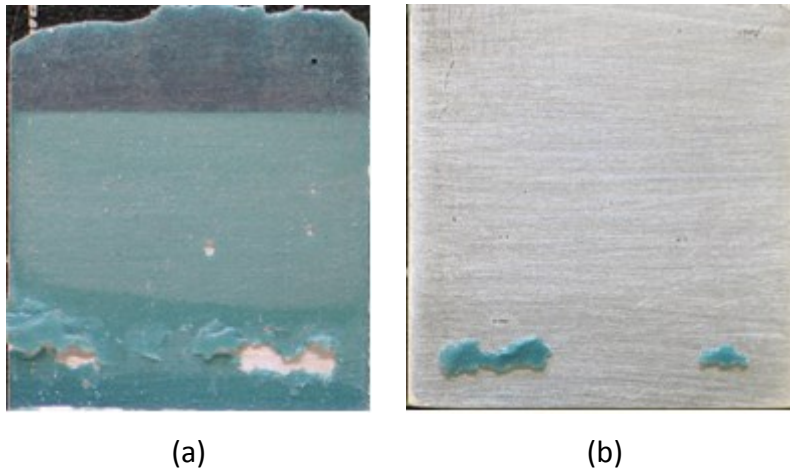


Figura C.3. Provete 1 com "taper" em adesivo 30°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).

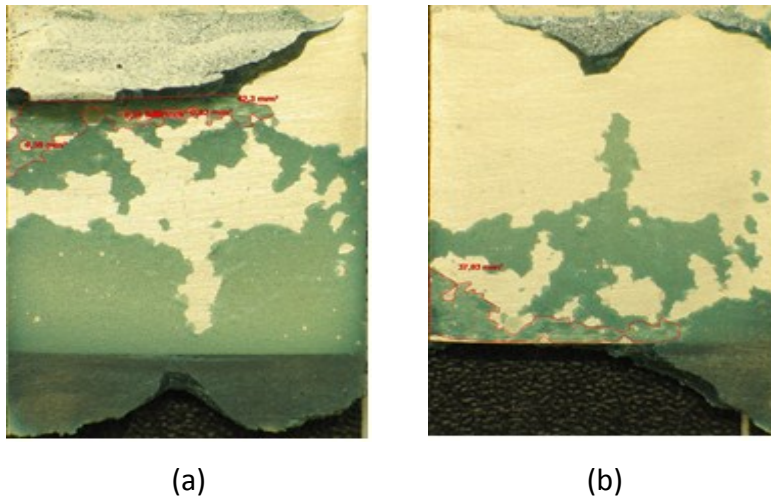


Figura C.4. Provete 2 com "taper" em adesivo 30°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).

45°:

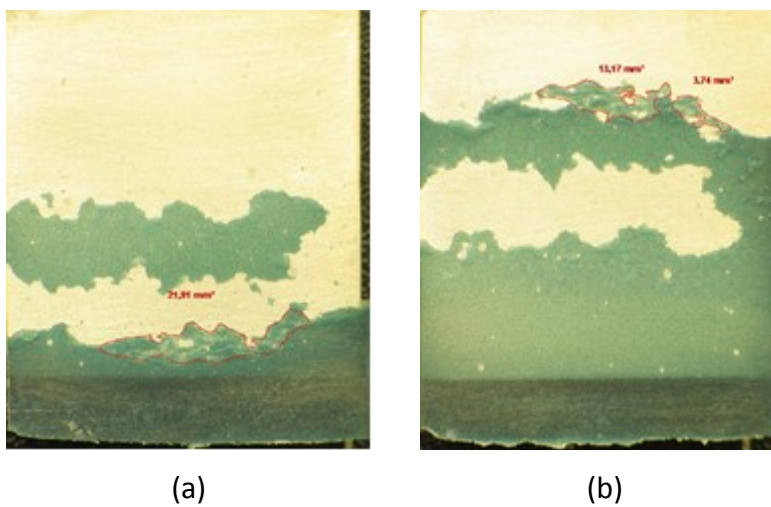


Figura C.5. Provete 1 com "taper" em adesivo 45°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).

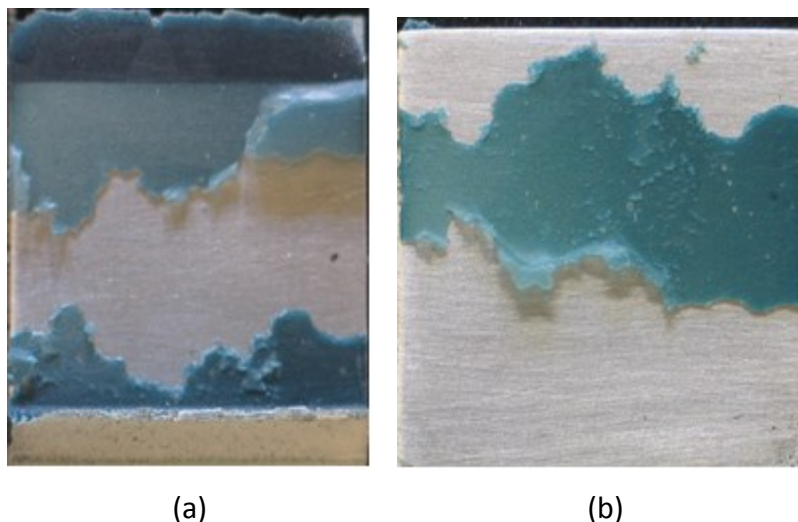


Figura C.6. Provete 2 com “taper” em adesivo 45°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).

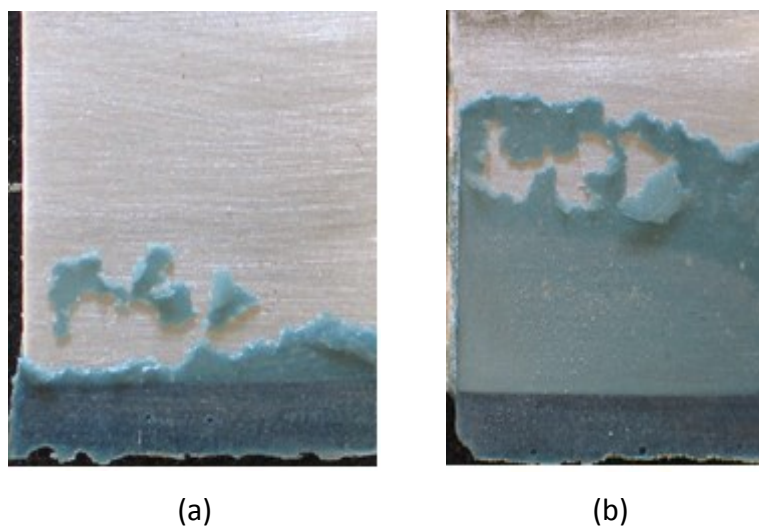


Figura C.7. Provete 3 com “taper” em adesivo 45°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).

60°:

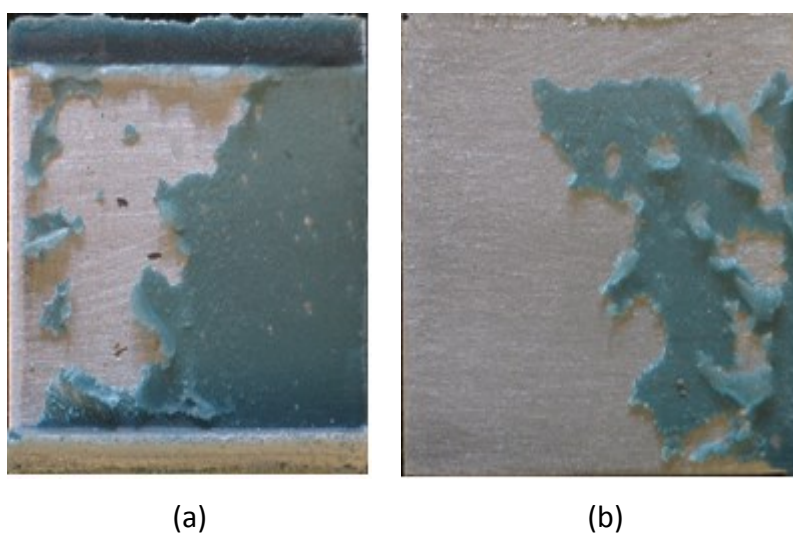
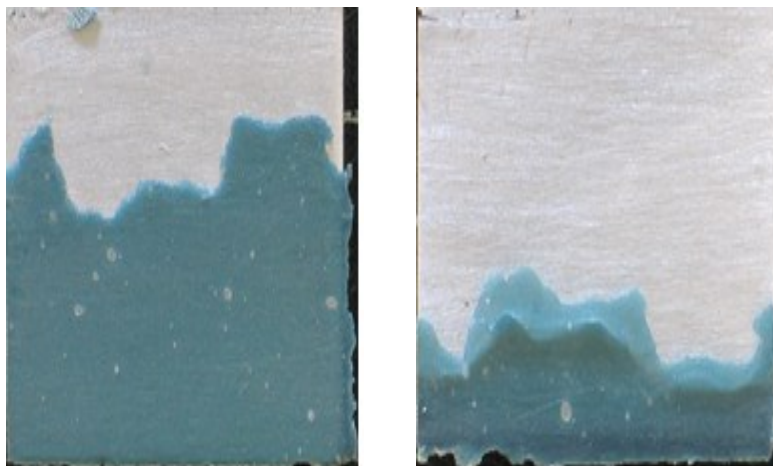


Figura C.8. Provete 2 com “taper” em adesivo 60°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).

Provetes com “taper” em alumínio:

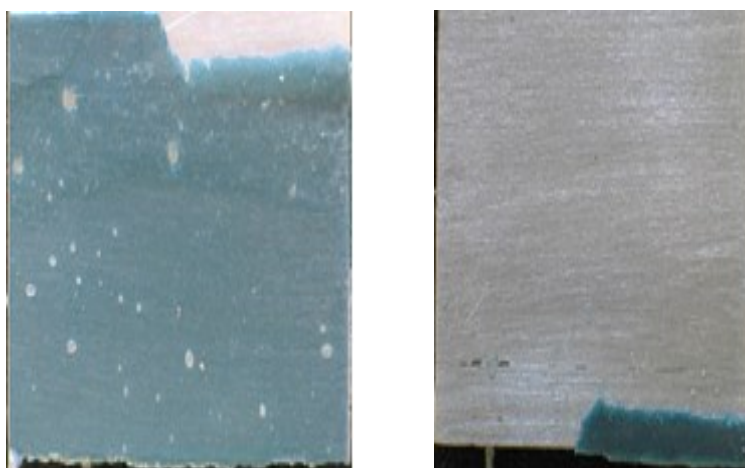
30°:



(a)

(b)

Figura C.9. Provete 2 com “taper” em aderente 30°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).



(a)

(b)

Figura C.10. Provete 3 com “taper” em aderente 30°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).

45°:

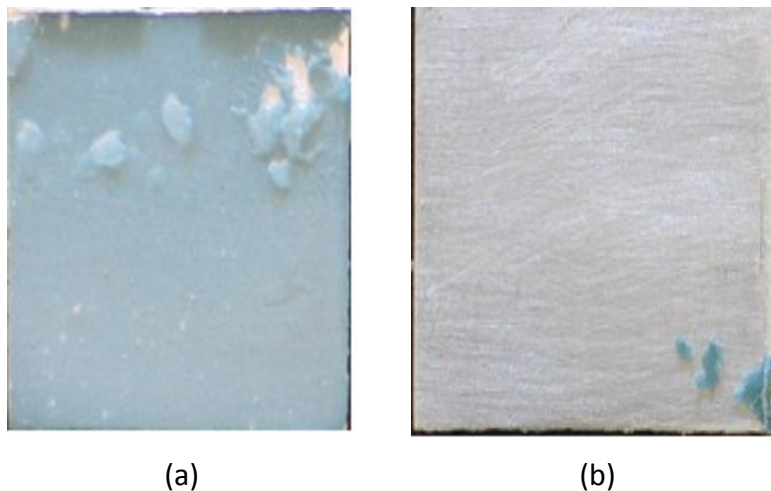


Figura C.11. Provete 1 com “taper” em aderente 45°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).

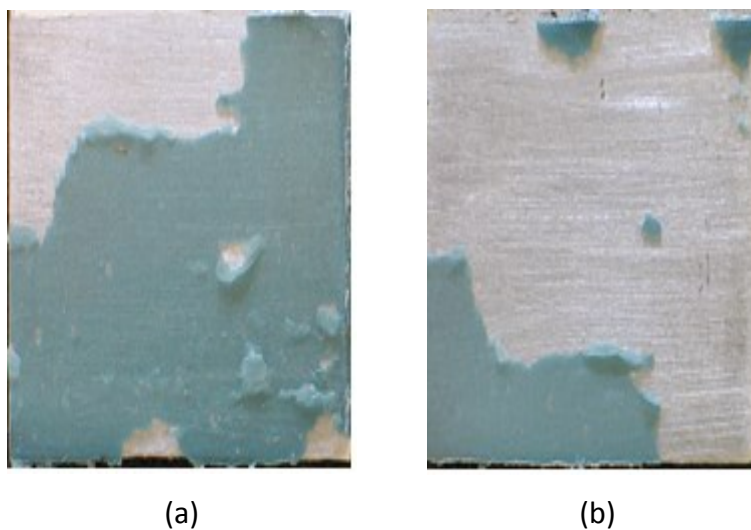


Figura C.12. Provete 2 com “taper” em aderente 45°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).

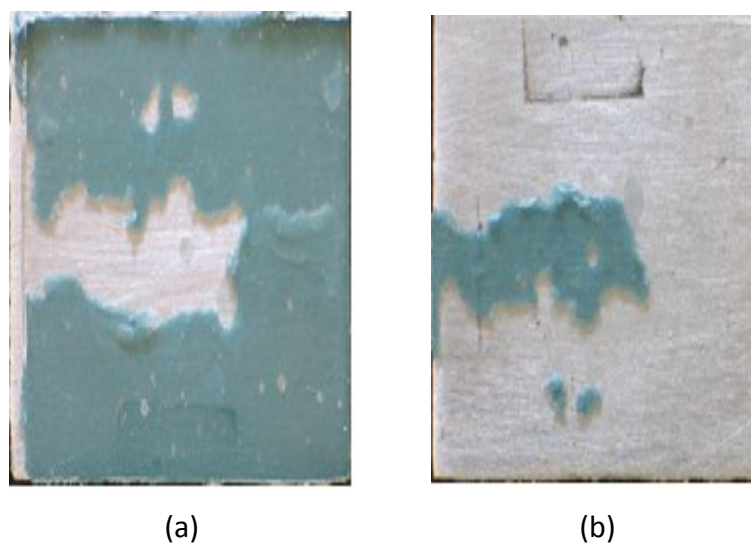
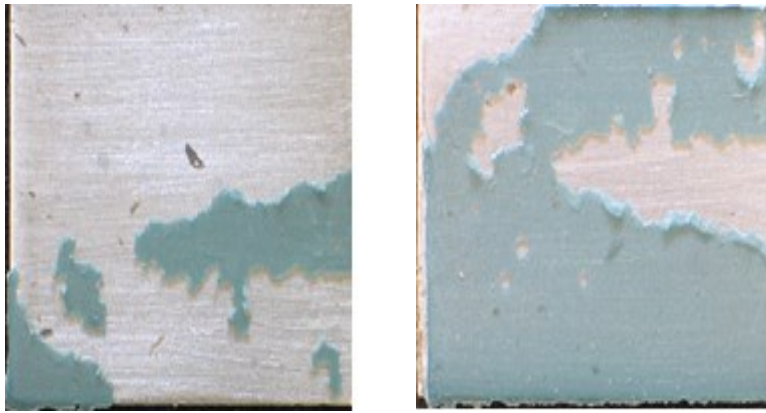


Figura C.13. Provete 3 com “taper” em aderente 45°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).

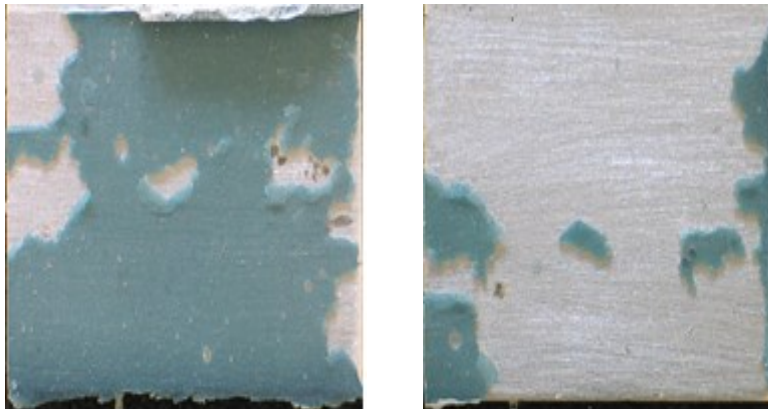
60°:



(a)

(b)

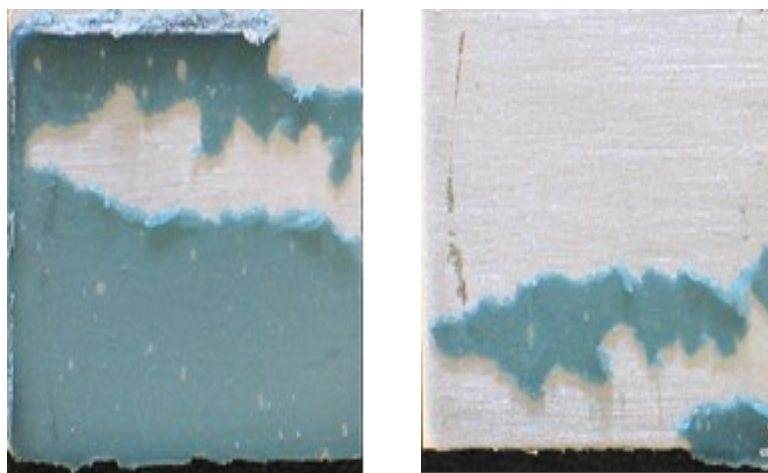
Figura C.14. Provete 1 com “taper” em aderente 60°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).



(a)

(b)

Figura C.15. Provete 2 com “taper” em aderente 60°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).



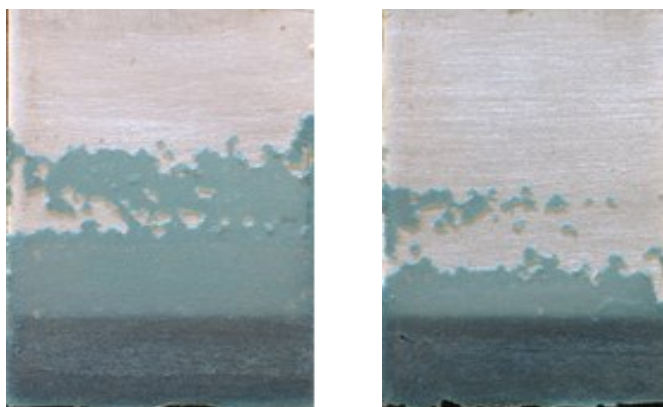
(a)

(b)

Figura C.16. Provete 3 com “taper” em aderente 60°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).

Provetes com “taper” invertido:

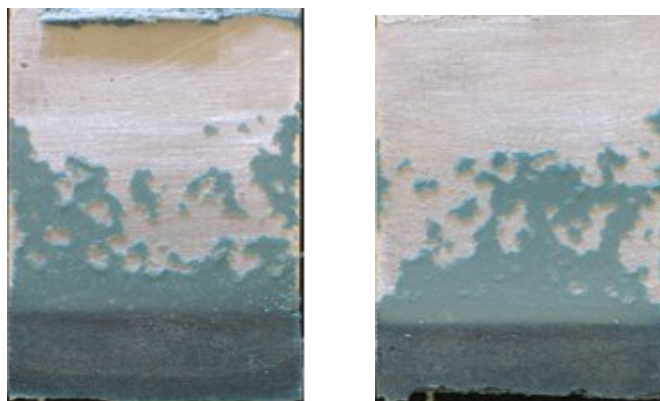
30°:



(a)

(b)

Figura C.17. Provete 1 com “taper” de adesivo invertido 30°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).

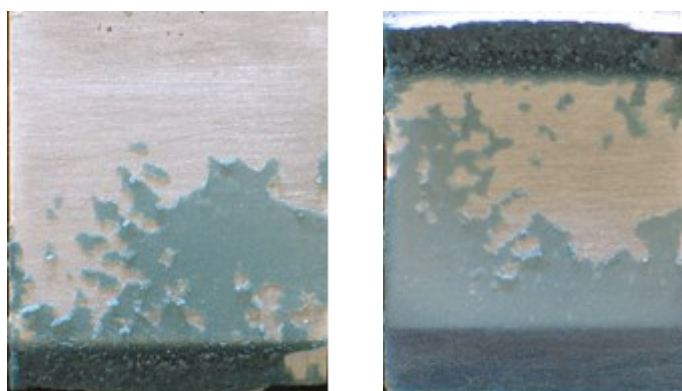


(a)

(b)

Figura C.18. Provete 3 com “taper” de adesivo invertido 30°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).

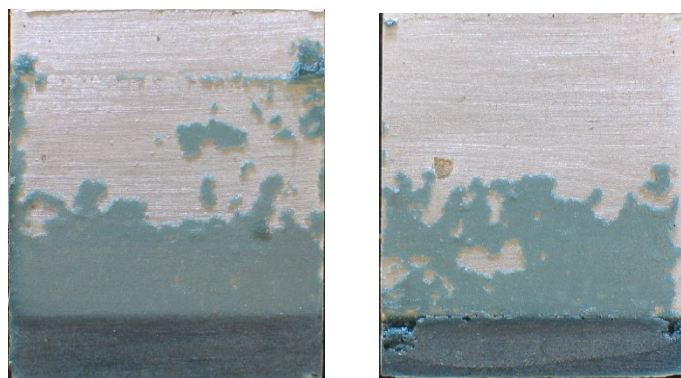
45°:



(a)

(b)

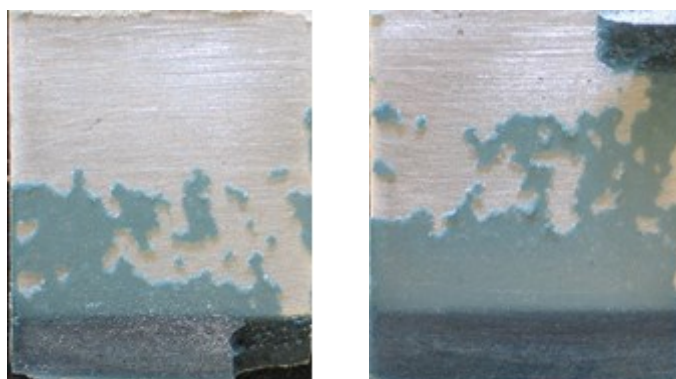
Figura C.19. Provete 1 com “taper” de adesivo invertido 45°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).



(a)

(b)

Figura C.20. Provete 2 com "taper" de adesivo invertido 45°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).

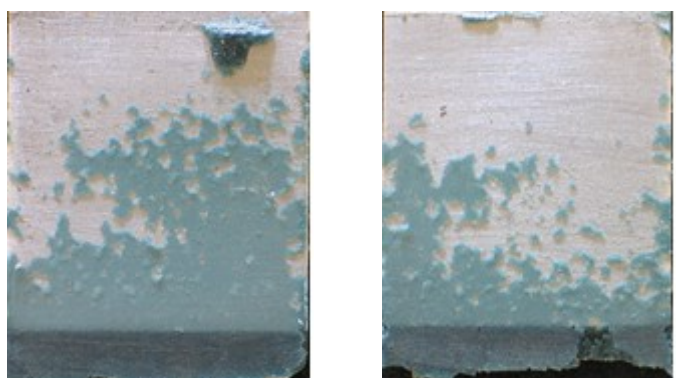


(a)

(b)

Figura C.21. Provete 3 com "taper" de adesivo invertido 45°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).

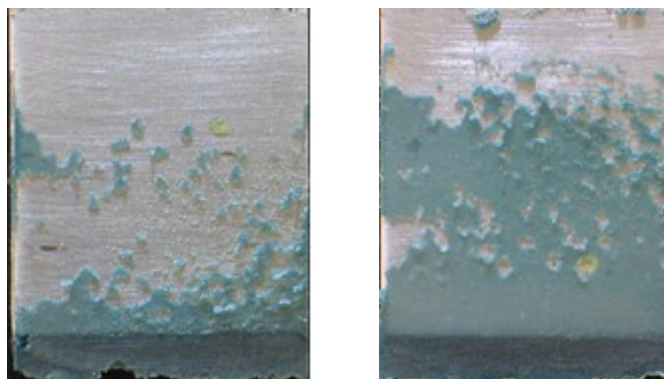
60°:



(a)

(b)

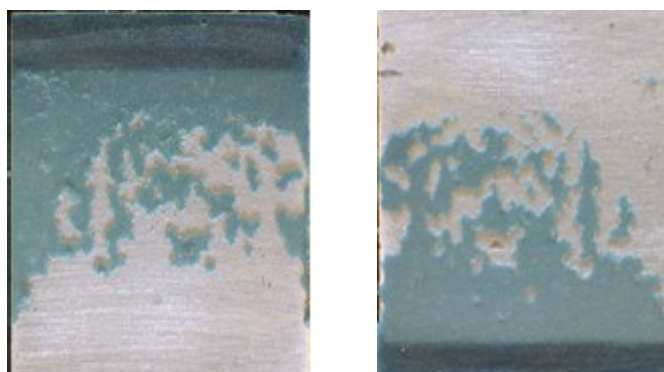
Figura C.22. Provete 1 com "taper" de adesivo invertido 60°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).



(a)

(b)

Figura C.23. Provet 2 com “taper” de adesivo invertido 60°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).



(a)

(b)

Figura C.24. Provet 3 com “taper” de adesivo invertido 60°. Superfície 1(a), Superfície 2 (b).

APÊNDICE D – FORÇAS MÁXIMAS, MÉDIA E DESVIO PADRÃO DOS RESULTADOS

(Capítulo 4.4)

Tabela D.1. Forças máximas dos provetes sem “taper”.

Geometria	Ângulo [°]	Força Máx. [N]
Sem “taper”	90	9951
		10043
		9975

Tabela D.2. Forças máximas dos provetes com “taper” em adesivo.

“Taper” no adesivo	30	7433
		10947
		11597
	45	7395
		6238
		6375
	60	6118
		5017

Tabela D.3.Forças máximas dos provetes com “taper” no aderente

“Taper” no aderente	30	5535
		4810
		4665
	45	4743
		6402
		6378
	60	5514
		6169
		6053

Tabela D.4.Forças máximas dos provetes com “taper” invertido

“Taper” invertido	30	10206
	30	11709
	30	10115
	45	10040
	45	10153
	45	10459
	60	10641
	60	9428
	60	10555

Tabela D.5. Média e desvio padrão dos resultados das forças máximas.

Geometria	Ângulo	Média [N]	Desvio Padrão [N]
Sem <i>"taper"</i>	90	9990	39
<i>"Taper"</i> no adesivo	30	9992	1829
	45	6669	516,2
	60	5568	550,5
<i>"Taper"</i> no aderente	30	4943	297,1
	45	5841	776,5
	60	5912	285,3
<i>"Taper"</i> invertido	30	10677	731
	45	10217	177
	60	10208	552,7