



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Estudo da Influência do Ângulo de *Taper* em Juntas Coladas**

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

**Autor**

**Inês Filipa Cardoso Marques**

**Orientadores**

**Professora Doutora Ana Paula Betencourt Martins Amaro**

**Professor Doutor 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

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

**Coimbra, julho, 2014**



*If you're not winning, you're not trying.*

Colin Chapman, fundador da Lotus.

Dedicado aos meus pais.



## Agradecimentos

O meu primeiro obrigado dirige-se aos meus dois orientadores, Prof<sup>a</sup> Doutora Ana Paula Amaro e Prof. Doutor Altino Loureiro, que “embarcaram” comigo nesta aventura: obrigado por toda a disponibilidade, apoio, pelas condições de trabalho e conhecimentos que me facultaram. Sem ambos, a realização deste trabalho seria absolutamente impossível.

Agradeço aos professores António Magalhães e Mário Pereira, do ISEP e IPL respetivamente, pela contribuição com os provetes. Agradeço também ao Prof. Doutor Amílcar Ramalho, pela contribuição com o microscópio eletrónico de varrimento. Agradeço também à Prof<sup>a</sup> Doutora Marta Oliveira, pelo auxílio com as formatações do *template* e à engenheira Fátima Paulino, pelas encorajadoras palavras ao longo do semestre. Ao Joel e ao Carlos, pela ajuda com o ARAMIS. E peço desculpa pela minha insistente insistência!

Agradeço ainda ao senhor Fernando, das oficinas do DEM-FCTUC, que muito alumínio cortou, e à D. Isabel, funcionária da secretaria, que tantas vezes evitou que o alarme do laboratório disparasse.

Deixo aqui o agradecimento à minha família por me ter aturado e por ter transformado, tanta vez, os mais humildes cantinhos em verdadeiros locais de estudo, concentração e desarrumação. Em particular, um grande obrigado aos meus pais. A eles devo toda a minha essência e todo o meu percurso, ainda que curto. Muito obrigado por todo o apoio, principalmente ao longo desta caminhada que agora vemos chegar ao fim. Obrigado por me mostrarem que, com algum trabalho, alguma tenacidade e resiliência, é possível alcançar os nossos objetivos.



## Resumo

Este trabalho estuda a influência do ângulo de *taper* na resistência estática de juntas coladas com um adesivo epóxico. Para isso, foram preparados provetes em alumínio, com vários ângulos de *taper*, 0°, 30°, 45° e 60°, diretamente no adesivo. Foram ainda produzidos *tapers* com as mesmas inclinações, por biselamento do alumínio. Todos os provetes foram sujeitos a ensaios de tração, sendo os deslocamentos registados em simultâneo por uma técnica de correlação digital de imagem. A caracterização dos mecanismos de rotura foi feita com a ajuda de microscopia eletrónica de varrimento.

Foi possível concluir que o principal mecanismo de rotura presente nos provetes foi a rotura por adesão. Verificou-se também que os *tapers* de adesivo não influenciam a resistência da junta. Do estudo efetuado, pode-se concluir que a variação do ângulo de *taper* permite variar o comprimento de sobreposição. Além disso, verificou-se que a rotura das juntas se inicia nas extremidades da zona colada, propagando-se posteriormente para a zona central.

**Palavras-chave:** Ângulo de *taper*, Juntas coladas, Correlação digital de imagem, Ensaios de tração.



## Abstract

This work studies the influence of the angle of taper on the static strength of bonded joints with an epoxy adhesive. For this, samples were prepared in aluminum with various taper angles of 0°, 30°, 45° and 60°, directly on the adhesive. Tapers were also produced with the same angles, by beveling of aluminum. All specimens were subjected to tensile tests, with the displacements recorded simultaneously by a technique of digital image correlation. The characterization of the mechanisms of rupture was done with the help of scanning electron microscopy.

It was concluded that the main mechanism of this rupture in bonded specimens was adhesive fracture. It was also found that the tapers done in the adhesive do not influence the strength of the joint. The present study allows to conclude that the angle of taper greatly influence the overlap length. Furthermore, it was found that the rupture in bonded joints starts at the ends of the bonded area, spreading later to the central part of this area.

**Keywords** Angle of taper, Single lap bonded joints, Digital Image Correlation, Tensile tests.



---

## Índice

Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tabelas .....	xiii
Siglas .....	xv
1. Introdução .....	1
2. Revisão Bibliográfica .....	3
2.1. Sobre as Juntas Coladas .....	3
2.2. O Fenómeno da Adesão .....	7
2.3. Os Adesivos.....	8
Epóxidos .....	8
Poliimididas .....	9
Poliuretanos .....	9
Acrílicos.....	9
Fenólicos.....	10
2.4. Preparação de Superfície .....	10
2.5. Conceção e Projeto de Junta.....	11
3. Procedimento Experimental.....	15
3.1. Material Utilizado .....	15
3.1.1. Liga de alumínio .....	15
3.1.2. Adesivo Araldite 420 A/B.....	16
3.1.3. Geometria e Colagem dos Provetes .....	17
3.2. Ensaio de Tração.....	18
3.3. Caracterização das Superfícies de Fratura .....	21
4. Apresentação e Discussão de Resultados .....	23
4.1. Introdução.....	23
4.2. Sequência de Rotura .....	23
4.3. Caracterização das Superfícies de Fratura .....	27
4.4. Aspeto Fratográfico .....	30
4.5. Resistência Estática das Ligações.....	33
4.5.1. Análise de Deformações Locais .....	39
5. Conclusões e Propostas de Trabalho Futuro.....	47
5.1. Conclusões .....	47
5.2. Propostas de Trabalho Futuro.....	47
Referências Bibliográficas .....	49
ANEXO A .....	51
APÊNDICE A - Sequência de Rotura.....	55
APÊNDICE B - Caracterização das Superfícies de Fratura.....	57
APÊNDICE C - Aspeto Fratográfico.....	61

APÊNDICE D - Imagens das Deformações Locais ..... 65

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ângulo de <i>taper</i> . .....	1
Figura 2.1. Curva de distribuição de tensões numa junta de sobreposição simples (Hattori, 1991). .....	12
Figura 3.1. Esquema ilustrativo da geometria dos provetes, e respetivas medidas. ....	17
Figura 3.2. Aspeto final da junta, num provete de 0°. .....	19
Figura 3.3. Malhagem da junta pelo sistema ARAMIS. ....	19
Figura 3.4. (a) Pintura dos provetes (b) Pormenor pintura (padrão). .....	20
Figura 3.5. Equipamento utilizado: Instron e ARAMIS. ....	21
Figura 4.1. Rotura num provete de 30°. .....	24
Figura 4.2. Rotura num provete de 45°. .....	24
Figura 4.3. Rotura num provete de 60°. .....	25
Figura 4.4. Rotura num provete de 30°. .....	25
Figura 4.5. Rotura num provete de 45°. .....	26
Figura 4.6. Rotura num provete de 60°. .....	26
Figura 4.7. Rotura nos provetes (a) 0° (b) 0°. .....	26
Figura 4.8. Fotografia da rotura no provete, com desintegração total das placas. ....	27
Figura 4.9. Imagem do <i>AxioVision</i> , que permite diferenciar as áreas de adesão e coesão. .	28
Figura 4.10. Provede de 30°(a) Placa 1 (b) Placa 2. ....	28
Figura 4.11. Provede de 45°(a) Placa 1 (b) Placa 2. ....	29
Figura 4.12. Provede de 60°(a) Placa 1 (b) Placa 2. ....	29
Figura 4.13. Amostras revestidas a ouro. ....	31
Figura 4.14. Amostra de 30°, 500x ampliação (a) zona de coesão (b) zona de adesão. ....	31
Figura 4.15. Amostra de 45°(a) 20x ampliação (b) 200x ampliação. ....	32
Figura 4.16. Amostra de 60°(a) 20x ampliação (b) 200x ampliação. ....	32
Figura 4.17. Evolução da extensão em função da força aplicada pela Instron. ....	34
Figura 4.18. Evolução da força máxima com o ângulo de <i>taper</i> , Adesivo – com <i>taper</i> de adesivo; Al – com <i>taper</i> de Al; ST – sem <i>taper</i> . ....	35
Figura 4.19. Influência do comprimento de sobreposição na resistência da ligação. ....	36
Figura 4.20. Evolução da deformação a nível global com o ângulo de <i>taper</i> . ....	38
Figura 4.21. Influência do comprimento de sobreposição na deformação global. ....	39

Figura 4.22. Comparação entre as curvas obtidas (provete com inclinação de adesivo de 30°).....	40
Figura 4.23. Localização do ponto de medição das tensões e deformações no adesivo. ....	40
Figura 4.24. Provete de 30° (a) Estágio 10 (b) Estágio 16 (c) Estágio 19 (d) Estágio 23) (e) Estágio 24 (f) Estágio 25.....	42
Figura 4.25. Provete de 45° no adesivo (a) Estágio 1 (b) Estágio 30 (c) Estágio 40 (d) Estágio 44 (e) Estágio 46 (f) Estágio 47. ....	43
Figura 4.26. Provete de 0° (a) Estágio 3 (b) Estágio 16 (c) Estágio 22 (d) Estágio 30 (e) Estágio 34 (f) Estágio 39.....	45
Figura 4.27. Provete de 30° no alumínio (a) Estágio 5 (b) Estágio 19 (c) Estágio 27 (d) Estágio 38 (e) Estágio 47 (f) Estágio 50. ....	46

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Composição química e propriedades mecânicas do Alumínio 5083 (Atlas Steels Australia, 2013).....	16
Tabela 3.2. Tabela das áreas coladas em função do ângulo de <i>taper</i> . ....	18
Tabela 3.3. Tabela das áreas coladas em função do ângulo de <i>taper</i> . ....	18
Tabela 4.1. Percentagens médias de perdas por adesão e por coesão nos provetes com ângulo de <i>taper</i> no adesivo. ....	30
Tabela 4.2. Tensão Média de Corte e Deformação Média. ....	37



## **SIGLAS**

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CFRP – *Carbon Fiber Reinforcement Polymer*

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

DIC – *Digital Image Correlation*

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

IPL – Instituto Politécnico de Leiria

ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

SEM – *Scanning Electron Microscopy*

SMC – *Sheet Molding Compound*



## 1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem o objetivo de estudar a influência do ângulo de *taper* na resistência estática de uma junta colada.

O *taper* pode ser considerado como um filete de material que pode ser acrescentado à zona da junta, podendo ser feito no aderente ou no adesivo, conforme se mostra na Figura 1.1. A literatura refere que, quanto maior o ângulo de *taper*, maior é a resistência da junta (Solmaz e Turgut, 2011; Lang e Mallick, 1998).



Figura 1.1. Ângulo de *taper*.

O fenômeno da adesão é hoje aceite como uma ligação entre componentes por meio de um adesivo, capaz de transferir cargas e sem permitir a separação dos componentes. Os adesivos sempre foram utilizados pelo Homem, para as mais variadas aplicações, contudo só agora parece haver um maior conhecimento sobre o processo (a nível das forças que estão envolvidas na ligação, nas teorias que explicam o fenómeno, etc.). Contudo, e apesar de toda a tecnologia existente hoje em dia, este universo parece ainda controverso aos investigadores, uma vez que todas as conclusões explicam apenas de forma parcial o que acontece numa junta adesiva.

Comparativamente com outras formas de obter ligações mecânicas (soldar, aparafusar, rebitar, etc.), as ligações adesivas permitem estruturas igualmente resistentes, embora mais leves. Na maioria das aplicações práticas, é bastante importante a redução de peso, para que os desempenhos alcançados sejam de excelência e o consumo de combustível seja reduzido. No mercado, existe hoje uma vasta gama de adesivos. Apesar de não ultrapassarem a utilização de outras juntas mecânicas, as juntas coladas têm conquistado a confiança de inúmeros projetistas.

Os próprios fabricantes de adesivos, cientes da importância do seu produto, investem cada vez mais na qualidade, na diversificação e fazem com que estes sejam de

fácil utilização para o comum usuário. É importante que haja maior informação e evolução nesta área, para erradicar o ceticismo que ainda resta a nível de projeto.

Especialmente para aplicações de elevada responsabilidade, não basta escolher o melhor adesivo: uma pequena falha pode constituir a ruína de uma ligação adesiva. Como tal, é necessário antes de mais saber projetar uma junta, de forma a evitar as solicitações que causam a rotura de forma previsível. Além disso, é fatual saber limpar de forma adequada uma superfície, sempre que o adesivo assim o exigir. Esta limpeza pode ocorrer em maior ou menor grau, dependendo da função final da junta. Os adesivos podem ser classificados das mais variadas formas. A classificação mais abrangente é a de adesivos estruturais e não estruturais, sendo que os primeiros são os mais importantes para as aplicações de engenharia. Por esse motivo, os adesivos não estruturais não serão devidamente explanados nesta dissertação. Além de todos estes fatores importantes à conceção da junta, existem muitos outros que condicionam a sua resistência: entre eles, encontram-se fatores associados ao adesivo e ao aderente, ou ainda fatores externos, associados ao meio ambiente onde a junta será inserida, como a temperatura ou a humidade. O capítulo dois pretende dar um conhecimento geral sobre este tipo de ligação.

É certo que o alumínio tem sofrido uma utilização crescente e que os adesivos epóxicos estão no topo do mercado. No capítulo três são apresentados os procedimentos experimentais utilizados e no capítulo quatro são apresentados e discutidos os principais resultados. As principais conclusões são apresentadas no capítulo cinco. Quanto maior for o conhecimento sobre juntas coladas, maior é o grau de confiança com que estas ligações podem ser usadas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado o estado da arte no que concerne à classificação e caracterização de adesivos e aos diversos fatores que condicionam a resistência de ligações coladas, dando particular importância aos adesivos estruturais.

### 2.1. Sobre as Juntas Coladas

Um adesivo, de acordo com a entidade americana *Adhesive Sealant Council*, é definido como um “*material usado para colagem que exhibe fluidez enquanto é aplicado*” (Packer, 1990). Da Silva *et al.* (2007) define-o como sendo “*um material polimérico que, quando aplicado em superfícies pode ligá-las e resistir à sua separação*”. Täljsten (2005) considera-o como uma substância capaz de estabelecer ligação entre os materiais através da absorção das moléculas desse mesmo adesivo pelos aderentes.

Desde cedo, o Homem percebeu a utilidade de unir objetos. Esse facto prova-se pela primeira evidência do uso de adesivos, no ano 4000 a.C. (Nicholson *et al.*, 1991), ou pelas colagens dos olhos das estátuas dos templos da Babilónia (Nicholson *et al.*, 1991; Täljsten, 2005). Os sarcófagos egípcios eram colados de forma a unir o material de que eram construídos (árvore de sicómoro) (Täljsten, 2005), com um adesivo de gesso (Esteves, 1990). Os egípcios utilizavam ainda adesivos feitos com base em farinhas, para unir as fibras de *papyrus*, que funcionavam mais tarde como tecidos (Täljsten, 2005).

A primeira referência bibliográfica acerca deste tema descreve um procedimento simples de fabrico e utilização, e data de 200 a.C. Os gregos e romanos fizeram uso das técnicas de colagem, entre 1 e 500 d.C., para colar finas camadas de madeira e para reparar fendas nos cascos dos navios (com cera de abelha) (Nicholson *et al.*, 1991). Na mitologia grega, relata-se ainda a existência do episódio entre *Daedalus* e o seu filho, *Icarus*, em que o adesivo não funcionou. *Daedalus* projetou asas para voar, contudo *Icarus* não conseguiu completar o seu voo, porque o adesivo que unia as penas das asas foi incapaz de sobreviver à temperatura e humidade (da Silva *et al.*, 2007). Entre 1500 e 1700 d.C., a utilização de adesivos caiu em desuso, sendo recuperada pelos fabricantes de

mobiliário como *Chippendale* ou *Duncan Phyfe*. Ambos construíram mobílias de excelência, em que aplicaram adesivos (Nicholson *et al.*, 1991; Täljsten, 2005). Também a qualidade dos violinos *Stradivarius* assenta no tratamento de madeiras, feito através de substâncias adesivas (Nicholson *et al.*, 1991).

A primeira fábrica de produção de adesivos surgiu logo em 1700, na Holanda, e em 1750, surgiu na Grã-Bretanha a primeira patente para um adesivo (Nicholson *et al.*, 1991; Täljsten, 2005). Em 1900, os Estados Unidos da América tinham diversas fábricas de produção de colas, não sem antes ocorrer a Revolução Industrial, que permitiu os grandes desenvolvimentos tecnológicos (Nicholson *et al.*, 1991; Täljsten, 2005).

As aeronaves produzidas no início do século XX continham ligações adesivas, formadas por adesivos de caseína (da Silva *et al.*, 2007). Em 1910, iniciou-se a era dos plásticos (produção da baquelite fenólica) (Nicholson *et al.*, 1991; Täljsten, 2005). Na Primeira Guerra Mundial, o avião *Mosquito* tinha já alguns componentes colados (ainda que de forma rudimentar) (Täljsten, 2005). Entre 1920 e 1940 apareceram novos adesivos de base polimérica, desenvolvimento catapultado pela Segunda Guerra (Nicholson *et al.*, 1991; Täljsten, 2005). Ainda nos anos 50, os engenheiros do *Comet* puderam fazer uso de um adesivo formal/resol fenólico, formulado anteriormente por *de Bruyne*. (da Silva *et al.*, 2007). Hoje em dia, os adesivos são, na sua maioria, de base polimérica, e são devidamente modificados por forma a corresponder às necessidades de projeto, tais como a melhoria de propriedades (por exemplo, a tenacidade) ou o fabrico de estruturas complexas (por exemplo, ninho de abelha) (da Silva *et al.*, 2007).

Ao longo dos anos, tem-se assistido a um aumento significativo no uso de juntas coladas, nas mais diversas aplicações. De acordo com Hattori (1991), são cada vez mais utilizadas em dispositivos elétricos e optoeletrônicos. A indústria aeronáutica é uma das indústrias em que mais se utiliza este tipo de ligação mecânica. Hoje em dia, é corrente colar as longarinas à fuselagem das aeronaves. Os controladores de voo (elevadores, *ailerons* ou *spoilers*) são também colados (Higgins, 2000). Todas essas aplicações devem-se ao facto de haver necessidade de prolongar a vida útil dos aviões, com redução de custos. Em termos de características técnicas, o uso das juntas coladas permite a união de chapas, mas com menor peso e maior dureza/resistência. Como não há pontos de ligação, frequente nas estruturas rebitadas, não há o problema de concentração de tensões nos

entalhes (Täljsten, 2005). São utilizadas também nas pás dos helicópteros (da Silva *et al.*, 2007). Na indústria automóvel, as juntas coladas tomam também papel preponderante. Tal como nos aviões, é necessário melhorar o rendimento através do abaixamento do peso (EAA, 2002). Esta diminuição de peso é garantida pelo uso de materiais mais leves, exclusivamente unidos por colagem (da Silva *et al.*, 2007). A corrosão deixa de ser um problema nesta aplicação. As juntas coladas permitem novas soluções estéticas, através da união de diferentes materiais sem alteração de aspeto. Mais importante que a estética é a segurança das viaturas, pois os adesivos absorvem a energia proveniente de choques, ajudando dessa forma a proteger os passageiros (Täljsten, 2005). Hoje em dia, os adesivos em automóveis servem também para colagens nas portas e para-brisas (EAA, 2002). Na indústria naval, começou-se por usar a adesivos para preencher fendas nas estruturas de madeira. Como o alumínio é de difícil soldabilidade, as juntas coladas substituíram as juntas soldadas, resultando em uniões com menor distorção e concentração de tensões, com maior resistência à fadiga. O facto de se evitar o uso de temperaturas elevadas, permite igualmente uma melhor construção para ambientes agressivos (Täljsten, 2005). Contudo, o facto de os adesivos serem sujeitos a um ambiente marítimo (ambiente agressivo), deve ser sempre tido em conta (da Silva *et al.*, 2007). A engenharia civil introduziu também o uso de adesivos naturais em aplicações não estruturais, nomeadamente a nível de reparo e reforço de estruturas (Täljsten, 2005).

Apesar das inúmeras aplicações das juntas coladas, estas ligações mecânicas, tais como todas as outras, apresentam um conjunto de vantagens e desvantagens, que devem ser tidas em conta pelo projetista.

As vantagens são (Täljsten, 2005; Oltean *et al.*, 2009; Hashim, 1999; da Silva *et al.*, 2007; EAA, 2002; Solmaz e Turgut, 2011):

- Em virtude da ausência de parafusos e marcas de soldadura, a aparência da junta é mais suave e leve, o que leva à redução de combustível (melhor desempenho);
- Baixos custos, inclusive de manutenção;
- Permitir a união de materiais que não poderiam ser unidos doutro modo. Podem ser criadas estruturas complexas e eficientes;

- Combinação de vários materiais, melhoria de estética da junta e flexibilidade de projeto. Os substratos podem ter coeficientes de expansão térmica diferentes, pois o adesivo equilibra essa diferença;
- Sendo a união contínua, a distribuição de tensões é melhorada, bem como a resistência à fadiga. Nos compósitos é particularmente importante na medida em que não há corrompimento das fibras que os formam;
- As tensões residuais são eliminadas e a dureza é aumentada. A vibração e o ruído são diminuídos;
- Permitem uma poupança de tempo, uma vez que se pode efetuar uma pré-montagem dos componentes antes da colagem propriamente dita. O processo pode ser ainda automatizado;
- Podem prevenir o fenómeno da corrosão, já que não existem defeitos de soldadura e o adesivo funciona como vedante. Não há distorção térmica e a vida útil dos aderentes é maximizada;
- Ocorrência de transferência de carga ao longo do adesivo, pelo que a sensibilidade aos entalhes é minimizada. Por este motivo, também a resistência ao impacto é elevada nas juntas coladas.

As desvantagens maioritárias das juntas coladas são apresentadas de seguida (Hashim, 1999; da Silva *et al.*, 2007; EAA, 2002):

- É necessária uma adequada preparação de superfície, bem como o redesenho da junta (sensibilidade destas juntas à clivagem e ao arrancamento);
- A resistência térmica dos metais que formam uma junta é muito superior à do adesivo que as une, pelo que é mais provável a desintegração da junta do que a rotura do metal;
- Durante a cura, a junta tem de ser suportada por dispositivos de fixação (solução pouco económica), a temperaturas elevadas, podendo ser obrigatória ou não a extração de vapores;
- É difícil prever o desempenho de uma junta sujeita a condições adversas;

- O desmantelamento das juntas não é fácil.

## 2.2. O Fenómeno da Adesão

A proximidade entre os corpos a colar não é apenas um detalhe. Tendo em conta que os corpos devem estar próximos na ordem de grandeza de alguns *Angströms*, este fator é bastante relevante para a adesão (Correia, 1993). As ligações químicas podem ser primárias, secundárias (ou de *Van der Waals*) ou de hidrogénio.

As ligações primárias são as que se manifestam a uma distância mais importante. Referem-se a transferências de eletrões entre átomos (Esteves, 1990), podendo ser iónicas, covalentes ou metálicas (da Silva *et al.*, 2007). As forças secundárias estão diretamente relacionadas com os dipolos das moléculas, resultantes da aleatoriedade da distribuição das cargas nas mesmas e aparecimento de polaridades.

De acordo com da Silva *et al.* (2007), as ligações de hidrogénio produzem efeitos a distâncias curtas. Resultam das interações entre os dipolos de átomos como o hidrogénio, oxigénio ou azoto. Comparativamente com os outros átomos, a carga elétrica do núcleo de hidrogénio é menos protegida pelos eletrões, tendo este maior facilidade em se ligar com outros átomos. Dessa ligação resulta um campo elétrico local (Esteves, 1990).

O estudo das teorias que explicam a adesão parece não ser consensual entre todos os investigadores. Por um lado, uma só teoria parece explicar parte do fenómeno, embora não o explique na sua totalidade. A fim de se evitar oposições entre as várias explicações, aceita-se atualmente que a adesão resulta de vários mecanismos, assentes em cinco teorias diferentes, que se apoiam mutuamente.

A teoria mecânica defende que a adesão decorre após o encravamento mecânico do adesivo na superfície do aderente, sempre que este possui microcavidades (Esteves, 1990).

A teoria da difusão assenta no pressuposto de que existe difusão do adesivo no aderente, através da penetração das moléculas de cola na superfície a unir, que ocorre por efeito mecânico e por forças intermoleculares (Esteves, 1990). Esta teoria serve exclusivamente para explicar a adesão entre materiais poliméricos (da Silva *et al.*, 2007) já que as suas moléculas são extremamente móveis e compatíveis entre si (Comyn, 2005).

A teoria da polaridade defende que os adesivos e os aderentes devem ser ambos polares, ou não polares (Esteves, 1990).

A teoria da adsorção apoia-se na teoria da polaridade, já que a fixação do adesivo no aderente é causada por forças moleculares, criadas aquando da interação entre os dipolos das moléculas (quer do adesivo, quer do aderente) (Esteves, 1990). Havendo proximidade entre as moléculas, as forças de *Van der Waals* permitem a adsorção (da Silva *et al.*, 2007).

A teoria elétrica considera a junta como um condensador, em que as armaduras são os dois campos elétricos formados no contacto entre o adesivo e o aderente, e entre as armaduras se desenvolvem forças de atração (Esteves, 1990). Esta teoria não pode ser aplicada aos polímeros, uma vez que estes são termicamente isolantes (Comyn, 2005).

Parece não existir igualmente consenso entre os autores referenciados no que à camada limite diz respeito, uma vez que nem todos a consideram como uma teoria explicativa da adesão. A camada limite é formada por moléculas adsorvidas que diferem das moléculas do adesivo e do aderente (Correia, 1993), que resultam da inclusão de ar ou gases, filmes de óxidos ou pequenas porções de constituintes superficiais (da Silva *et al.*, 1993). Comyn (2005) defende que os materiais que melhor absorvem impurezas são os acrílicos.

## **2.3. Os Adesivos**

Existe no mercado uma vasta gama de adesivos, que podem ser classificados das mais diversas formas (estrutura molecular, modo de endurecimento, custos, etc.), mas a classificação mais abrangente é a de adesivos estruturais e não estruturais (Esteves, 1990).

Alguns adesivos estruturais encontram-se apresentados de seguida:

### **Epóxidos**

Os adesivos epóxidos são fabricados a partir de uma resina *epoxy*, à qual é misturado um endurecedor. Diferentes resinas e diferentes endurecedores geram diferentes epóxidos, com diferentes características. Este tipo de adesivos é compatível com uma vasta gama de materiais, gerando ligações fortes e de elevada durabilidade (EAA, 2002). Podem ser fornecidos num só componente, ou em dois: o endurecedor pode vir misturado com a

resina (um componente) ou pode estar separado da resina (o mais frequente) (Esteves, 1990).

### **Poliimidas**

As poliimidas, à temperatura ambiente, apresentam baixas resistências, tanto ao corte como à tração. Apesar de terem uma grande dureza, a cura é complexa (exige uma variação de temperaturas entre os 200 e os 400°C e aplicação de pressão) e apresentam baixa resistência aos choques e a vibrações (Esteves, 1990).

### **Poliuretanos**

Este grupo de adesivos são, geralmente, de duas partes. São utilizados para colar plásticos reforçados com vidro. Existe ainda a versão dos poliuretanos cuja cura é feita através do contacto com a humidade do ar, que são usados para colar, por exemplo, os para-brisas dos automóveis (EAA, 2002), embora adiram igualmente bem a superfícies metálicas (Esteves, 1990). São adesivos que geram juntas com boas propriedades (carga que suportam, duração, impacto, etc.) (EAA, 2002). Têm boa resistência ao arrancamento, a choques/vibrações, baixas temperaturas e ambientes agressivos. (Esteves, 1990).

### **Acrílicos**

Os acrílicos podem ser anaeróbicos ou cianocrilatos. Os anaeróbicos são resinas acrílicas sintéticas, cujo processo de endurecimento se desenvolve com a ausência de oxigénio (EAA, 2002). Podem ser curados à temperatura ambiente, o que lhes confere baixa resistência a agentes químicos, sendo variável a resistência mecânica. São geralmente apresentados na forma líquida, em monocomponente (Esteves, 1990). São utilizados para colar, por exemplo, peças desenvolvidoras de potência nos automóveis (EAA, 2002). Podem ser igualmente aplicados na fixação de peças estriadas, rolamentos ou outras peças cilíndricas (Esteves, 1990).

Os cianocrilatos têm a capacidade de solidificar em segundos, uma vez que a cura ocorre em virtude da presença de humidade do ar ambiente. São usados na colagem de peças de plástico ou de borracha (EAA, 2002). Apresentam elevada resistência quando sujeitos ao corte, contudo são sensíveis a tudo o resto que se considera importante numa junta colada: choques, vibrações, temperatura e ação de agentes químicos (Esteves, 1990).

## Fenólicos

Estes adesivos têm boa resistência, mas não têm bom comportamento quando sujeitos ao choque ou vibração (Esteves, 1990). São adesivos que necessitam de calor e de pressão para que se inicie o processo de cura. Produzem juntas entre metais de alta resistência. Um exemplo prático da aplicação destes adesivos é nos consumíveis dos travões dos carros, nomeadamente as lonas (EAA, 2002).

Os principais fatores de que dependem a escolha do adesivo incluem, entre outros (Täljsten, 2005; Hashim, 1999; Loureiro, 2005):

- A correta preparação de superfície, bem como a natureza da mesma;
- Tipo de adesivo (equipamento especial, como fazer a mistura do caso de ser de dois componentes, tempo de manuseamento e de cura, etc.);
- Previsibilidade do grau de encolhimento da junta e conceção de junta;
- Desempenho e aparência desejados para a junta e vida de serviço pretendida;
- Ambiente a que estará sujeita a junta (a “sobrevivência” a um ambiente agressivo depende da resistência química do próprio adesivo);
- Custos.

Os adesivos não estruturais podem ser termofusíveis (*hot melts*, plastissóis), à base de borrachas sintéticas, de poliéster ou inorgânicos, etc. Como não têm aplicações a nível de engenharia, não terão enfoque nesta dissertação.

## 2.4. Preparação de Superfície

A preparação da superfície a colar é de suma importância (Packer, 1990), pois permitem a limpeza de contaminantes, aumentar a área de rugosidade e permitem uma melhoria da energia de superfície. Os pré-tratamentos podem ser de natureza passiva ou ativa, sendo estes últimos indicados para aderentes de base polimérica.

De acordo com o grau de limpeza que se pretende obter, os tratamentos passivos podem ser suficientes ou não. O objetivo é remover gorduras e camadas frágeis, através de processos como as decapagens, uso de solventes ou o uso dos detergentes.

Existem ainda os processos manuais (lixas), a grenalhagem (projeção de partículas contra a superfície, causando a sua abrasão), a limpeza por ultrassons (a peça é imersa num fluido, cujas moléculas vibram por vibração da máquina de ultrassons), o polimento em vapor (grenalhagem para peças delicadas) ou a limpeza eletrolítica (formação de um gás de limpeza através da corrente elétrica) (da Silva *et al.*, 2007).

No que diz respeito aos tratamentos ativos, estes podem ser por ataque químico, anodização, tratamento por chama (o material é sujeito a uma chama oxidante), descarga de corona (bombardeamento das superfícies com partículas ionizadas) ou descarga de plasma (bombardeamento de iões de gases na superfície) (da Silva *et al.*, 2007).

## 2.5. Conceção e Projeto de Junta

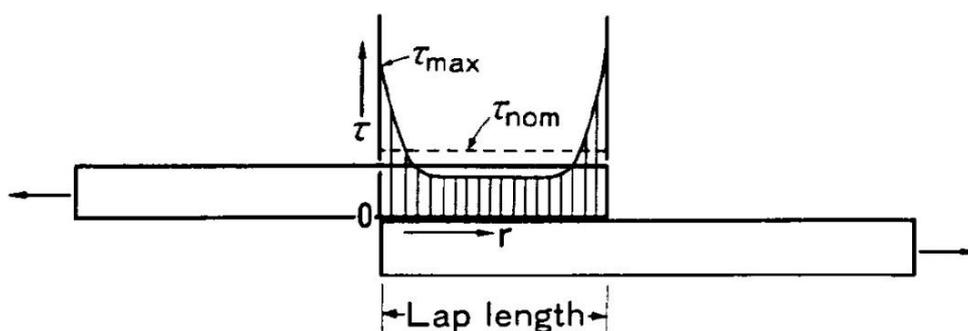
A rotura nas juntas adesivas pode ocorrer por adesão, coesão ou mista. O tipo de rotura depende do estado interfacial da junta. Quando a resistência na junta é baixa, a falha dá-se normalmente na interface adesivo/aderente, e é denominada de rotura por adesão. Quando a resistência da camada limite superficial é superior à própria resistência do adesivo, dá-se uma falha por perda de coesão (o que corresponde a uma resistência máxima de adesão). A rotura mista corresponde às situações em que se verificam ambos os modos de rotura (Correia, 1993).

Existem alguns fatores que influenciam a resistência final da junta. De entre eles, salientam-se os seguintes (Correia, 1993):

- Características mecânicas dos aderentes (módulo de elasticidade, coeficiente de *Poisson*, tensão de cedência e tensão de rotura) e do adesivo (módulo de elasticidade, coeficiente de *Poisson*, tensão de rotura ao corte e à tração);
- Geometria da Junta (forma da junta, espessuras dos aderentes e adesivo, comprimento de sobreposição) e tratamento superficial (rugosidade, limpeza de gorduras, exclusão de óxidos);
- Solicitações externas (forças, deslocamentos, etc.) e condições ambientais (temperatura, humidade, agentes químicos, radiação, etc.).

Existem diversos investigadores que estudaram o efeito do comprimento de sobreposição e do ângulo de *taper* na resistência da ligação. Solmaz e Turgut (2011) estudaram o comportamento de juntas coladas em CFRP (*Carbon Fiber Reinforcement Polymer*), utilizando dois comprimentos de sobreposição (25.4 e 38.1 mm) com diferentes ângulos de *taper* (0°, 15°, 30°, 45°, 60° e 75°). Os ângulos de *taper* foram obtidos por biselamento das placas dos aderentes. Conclui-se que, para cada comprimento de sobreposição, o ângulo de 15° foi o que ofereceu melhor resistência da junta adesiva, sendo que a partir desse valor, a resistência foi piorando.

Lucic *et al.* (2005) testaram provetes de alumínio (A199.5) colados com um adesivo epóxico de dois componentes, utilizando comprimentos de sobreposição que variaram entre os 15 e os 60 mm. Os provetes foram ensaiados à tração. A principal conclusão deste trabalho é que o aumento da sobreposição melhora a distribuição das tensões na junta. Contudo, ultrapassando um valor ótimo de sobreposição, essa melhoria deixa de ser verificada, tendo a maior resistência obtida ocorrido para a sobreposição de 40 mm. Neste sentido, também Hattori (1991) defende que a tensão de corte é diminuída com o aumento da sobreposição da junta, desde que esta seja superior à espessura do aderente. Este autor apresenta uma curva típica da distribuição de tensões, para uma junta colada, conforme a Figura 2.1.



**Figura 2.1.** Curva de distribuição de tensões numa junta de sobreposição simples (Hattori, 1991).

Lang e Mallick (1998) estudaram o efeito da geometria dos *tapers* na resistência da junta. Utilizando um comprimento de sobreposição de 12.7 mm, estudaram oito diferentes geometrias, em provetes de SMC (*Sheet Molding Compound*) colados com um adesivo epóxico. A principal conclusão deste estudo é que o efeito da geometria destes

depósitos de adesivo não deve ser ignorado, já que tem efeito significativo para a resistência da junta. Inclusive, a geometria triangular é a que fornece uma maior percentagem de redução das tensões de arrancamento, particularmente se o ângulo de *taper* for baixo. Da literatura conclui-se que o ângulo e geometria de *taper* de adesivo influenciam a resistência final da ligação.



### **3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

Este trabalho pretende dar um contributo para a compreensão do efeito do ângulo de *taper* em juntas coladas. No sentido de verificar o efeito do ângulo de *taper* produzido diretamente no adesivo e no aderente, realizaram-se ensaios de tração, sendo o registo da deformação dos provetes captada através de um equipamento de correlação digital de imagem DIC (*Digital Image Correlation*), de modo a mapear os deslocamentos sofridos em cada ponto do provete de ensaio.

#### **3.1. Material Utilizado**

##### **3.1.1. Liga de alumínio**

A liga de alumínio utilizada nos aderentes foi da série 5083, com uma espessura de 4 mm.

O alumínio é cada vez mais utilizado uma vez que tem uma superfície relativamente estável, especialmente quando é pré - tratado (EAA, 2002). Essa utilização crescente deve-se a características únicas, como por exemplo a elevada rigidez em função do peso, boa capacidade de enformar, boa resistência à corrosão e facilmente reciclável. Os entraves a este crescimento do uso do alumínio prendem-se, essencialmente, com os custos, regulamentação e estruturas industriais adequadas (Miller *et al.*, 2000).

A composição química e propriedades mecânicas nominais desta liga estão indicadas na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1.** Composição química e propriedades mecânicas da liga de Alumínio 5083 (Atlas Steels Australia, 2013).

Elementos	% por elemento		Propriedades	Valores
Si	0.40		Resistência à Tração (MPa)	270-345
Fe	0.40		Resistência ao Corte (MPa)	115-200
Cu	0.10		Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	2660
Mn	0.40 – 1.0		Módulo de Elasticidade (GPa)	71
Mg	4.0 – 4.9		Coefficiente de Expansão Térmica (µm/m/°C)	23.8
Cr	0.05 – 0.25		Condutividade Térmica a 25°C (W/m.K)	117
Zn	0.25		Condutividade Elétrica a 20°C (MS/m), igual volume	17
Ti	0.15		Condutividade Elétrica a 20°C (MS/m), igual massa	57
Outros (total)	0.15 (0.05 cada)		Resistividade Elétrica (nΩ.m)	59

### 3.1.2. Adesivo Araldite 420 A/B

O adesivo utilizado nos provetes foi a Araldite 420 A/B. Este adesivo é epóxico, promove uma boa adesão ao substrato metálico graças a uma boa molhabilidade (Correia, 1993).

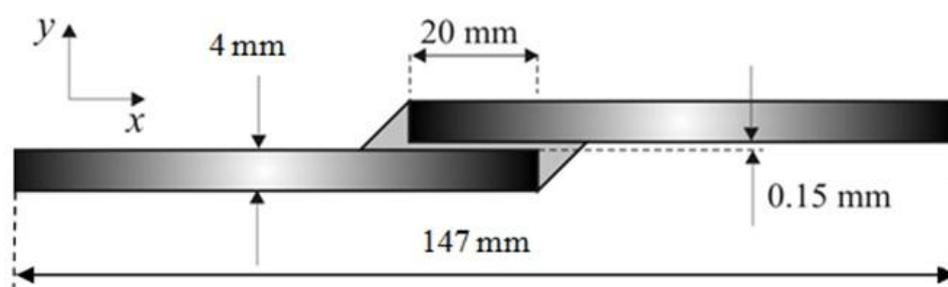
Consultando a ficha técnica deste produto (Amber Composites, 2009), podem ser observadas mais algumas propriedades deste adesivo. Essas propriedades são fortemente influenciadas pela temperatura, sendo que não deve ultrapassar os 60°C.

Os dois componentes que formam a mistura são o 420A (de cor amarela) e o 420B (de cor azul), pelo que a cor final é verde escuro. O componente 420A é maioritário. A cura deste adesivo pode ser feita à temperatura ambiente (25°C) durante duas semanas. As restantes propriedades deste adesivo podem ser encontradas no ANEXO A. Para este

ensaio experimental, a cura dos provetes foi feita numa estufa *Digitheat*, do fabricante JP Selecta. A temperatura da estufa utilizada foi de 50°C, durante quatro horas.

### 3.1.3. Geometria e Colagem dos Provetes

Cada provete é constituído por aderentes da liga de alumínio com dimensões 83.5x20x4 mm, colados de forma sobreposta, conforme se ilustra na Figura 3.1. As zonas de colagem dos provetes foram desoxidadas com uma lixa fina de água de 320 mesh, desengorduradas com acetona e coladas com o adesivo epóxico, de forma a criar juntas de sobreposição simples uma vez que, pela sua simplicidade e eficiência, são as mais utilizadas para determinar as propriedades das juntas coladas (Lucic *et al.*, 2005). Com o auxílio de moldes, obtiveram-se juntas com diferentes inclinações no adesivo: de 30°, 45° e 60°. Foram elaboradas três amostras para cada ângulo de adesivo. Para poder haver comparação de resultados, foram também analisados provetes em que o ângulo de *taper* foi obtido diretamente no alumínio: 30°, 45° e 60°. Foram, ainda, estudados provetes com inclinação de adesivo de 0°, com sobreposição de junta de 20 mm e, por fim, provetes também com inclinação de junta de 0°, mas com 30 mm de sobreposição (para fazer corresponder a um comprimento de sobreposição intermédio, para o caso da inclinação ser de alumínio). Estes provetes de 0° e maior sobreposição correspondem à designação de 0°, nas tabelas. O procedimento de cura do adesivo foi o descrito no ponto anterior.



**Figura 3.1.** Esquema ilustrativo da geometria dos provetes, e respetivas medidas.

O comprimento de sobreposição total da junta corresponde à soma de 20 mm (Figura 3.1) com a distância ocupada pelo *taper* de adesivo. Assim, em função do ângulo, a dimensão da área colada será diferente. Na Tabela 3.2 apresentam-se os valores médios da área colada em função do ângulo de *taper* produzido no adesivo, e na Tabela 3.3

apresentam-se os mesmos valores, mas para os provetes cujo ângulo de *taper* foi produzido no alumínio.

**Tabela 3.2.** Tabela das áreas coladas em função do ângulo de *taper*.

<b>Ângulo de <i>Taper</i> de Adesivo</b>	<b>Área Colada (média) [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Desvio Padrão</b>
0°	357	0.1
30°	855	20.9
45°	669	39.1
60°	619	18.6

**Tabela 3.3.** Tabela das áreas coladas em função do ângulo de *taper*.

<b>Ângulo de <i>Taper</i> de Alumínio</b>	<b>Área Colada (média) [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Desvio Padrão</b>
0°	567	0.1
30°	483	0.1
45°	463	0.1
60°	420	89.1

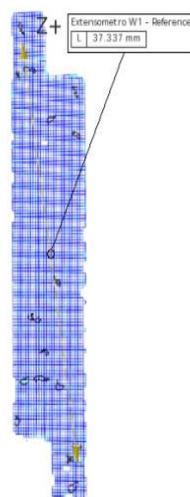
### **3.2. Ensaio de Tração**

Os provetes colados foram maquinados nas faces laterais (Figura 3.2), de modo a colocar o padrão que proporciona o mapeamento das deslocamentos por correlação digital de imagem. Com este procedimento removeram-se os restos de adesivo nas faces laterais, que poderia aumentar a resistência da junta (Lang e Mallick, 1998)



**Figura 3.2.** Aspeto final da junta, num provete de 0°.

De forma a minimizar o momento fletor produzido, foram adicionadas umas placas de alumínio – denominados de apertos de auto-alinhamento (ou *self-aligning grips*, segundo a norma da ASTM) às extremidades (zona de encaixe nas amarras da máquina). Na prática, as cargas aplicadas na junta não são colineares o que faz com que, quando a junta é ensaiada, apareça um momento fletor que causa uma rotação na junta. Essa rotação vai expor a junta ao corte e ao arrancamento (Lucic *et al.*, 2005). O valor do momento depende da rigidez (adesivo e aderentes), da geometria do provete e das condições de carga (Moreira e Nunes, 2014). Para aplicação das placas, começou-se por fazer uma limpeza superficial com álcool etílico dos provetes e das placas, aplicou-se Super cola 3 e, por fim, colaram-se as placas às extremidades dos provetes, conforme a Figura 3.4(a). Concluiu-se este processo com uma nova limpeza com álcool etílico, uma vez que era importante não haver impurezas para a fase que se seguiria.

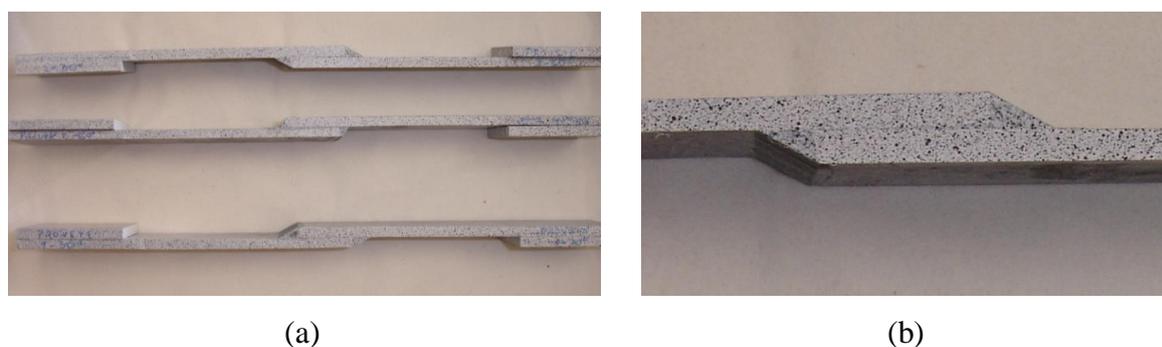


**Figura 3.3.** Malhagem da junta pelo sistema ARAMIS.

Para que o ARAMIS conseguisse captar imagens de qualidade do ensaio, os provetes foram pintados com um *spray* branco e só depois levemente com um preto baço, unicamente para deixar um padrão de pequenos pontos, que se tornam fulcrais à aquisição de dados (Leitão *et al.*, 2011).

Analisando a Figura 3.3, conclui-se que o ARAMIS considera o espaço de análise, dividindo-o em pequenas áreas (representadas por cada quadrícula). Tendo em conta a referência dada no início do ensaio pelo operador, este sistema é capaz de analisar todos os deslocamentos, rotações e deformações sofridos por esse ponto de referência.

Antes do ensaio, todos os provetes necessitaram de um tempo de secagem de cerca de trinta minutos. A Figura 3.4 (b) ilustra o padrão da pintura.



**Figura 3.4.** (a) Pintura dos provetes (b) Pormenor pintura (padrão).

Todos os ensaios foram efetuados numa máquina eletromecânica Instron 4206, com velocidade constante de travessão de 1,3 mm/min, de acordo com a norma ASTM D1002.

Para realizar o mapeamento de deslocamentos durante o ensaio, recorreu-se ao equipamento ARAMIS, do fabricante GOM. O funcionamento deste equipamento baseia-se na técnica DIC (*Digital Image Correlation*), técnica ótica sem contacto, o que permite eliminar a hipótese de interferência com a precisão dos resultados do ensaio (Leitão *et al.*, 2013). O *software* associado a esta técnica possibilita a obtenção das curvas tensão – deformação locais e globais através do 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.

Na Figura 3.5, ilustra-se o equipamento Instron 4206 utilizado, bem como o sistema ARAMIS devidamente montado para a aquisição de dados.

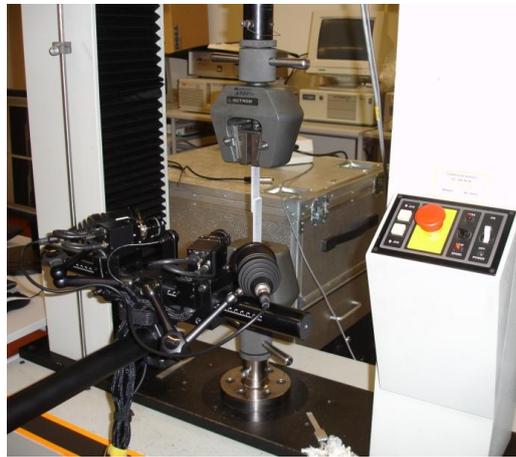


Figura 3.5. Equipamento utilizado: Instron e ARAMIS.

### 3.3. Caracterização das Superfícies de Fratura

Após ocorrer a falha das juntas, foram retiradas fotografias, a partir das quais foi possível determinar as áreas de perda de contacto por adesão e por coesão.

A caracterização das superfícies de fratura foi realizada com a ajuda de uma máquina fotográfica com lente supermacro, com o objetivo de distinguir as zonas de rotura por adesão do adesivo das zonas de rotura por coesão. O mapeamento dessas zonas foi feito sobre as fotografias das superfícies de fratura com recurso ao *software AxioVision*, da *Carl Zeiss*.

Utilizou-se ainda um microscópio eletrónico de varrimento Philips XL30, com sistema EDAX, para conseguir visualizar com maior clareza as zonas em que houve rotura por adesão e rotura por adesão.



## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### 4.1. Introdução

O objetivo deste estudo prende-se com o efeito do ângulo de *taper* na resistência da junta adesiva. Para isso, foram preparados provetes em Alumínio 5083, colados com um adesivo epóxico de dois componentes. Os provetes, com diferentes inclinações de *taper* (obtidas tanto no adesivo como no alumínio), foram submetidos a ensaios de tração. A inovação que representa esta dissertação é que, ao invés de tratamento numérico (comum aos anteriores investigadores), os ensaios foram unicamente acompanhados com um aparelho DIC (*Digital Image Correlation*), capaz de captar a cada instante as tensões e deformações sofridas no aderente e no adesivo. Tratando esses resultados, é possível tirar algumas conclusões a nível de resistência da junta.

### 4.2. Sequência de Rotura

Na generalidade dos provetes testados com os diversos ângulos de *taper*, a fenda iniciou-se nas extremidades do adesivo, e propagou-se ao longo da junta, de um e outro lado para o meio da zona de colagem, levando à rotura completa da ligação.

Nas amostras com ângulos de *taper* de 30°, não se verificou a separação total das chapas em nenhum dos três provetes. A Figura 4.1 mostra a zona de rotura num provete com *taper* de 30°, onde é possível verificar que houve arrancamento de pequenas lâminas de adesivo, situação que se verificou em todas as amostras analisadas.



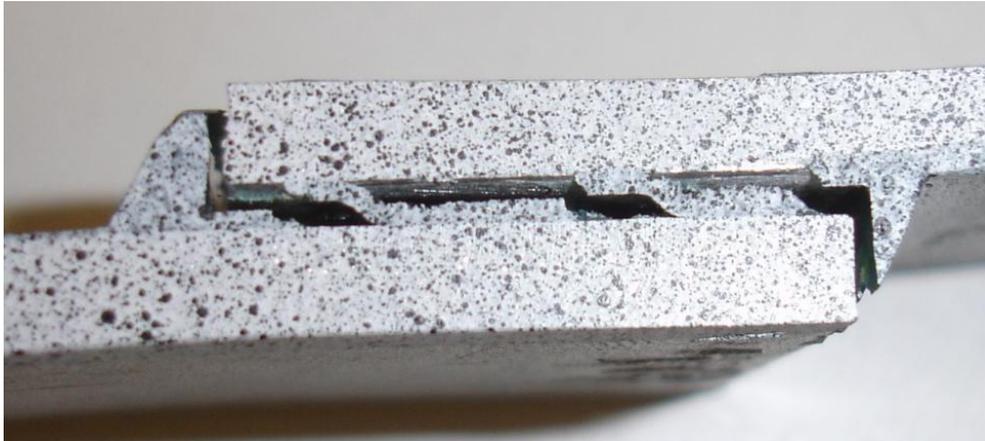
**Figura 4.1.** Rotura num provete de 30°.

Relativamente ao ângulo de *taper* de 45°, verificou-se a separação total das chapas em dois dos três provetes. Na Figura 4.2, são notórias as irregularidades existentes na extremidade dos aderentes, resultantes da rotura do adesivo, sendo que este comportamento é também comum às três amostras de 45°.



**Figura 4.2.** Rotura num provete de 45°.

Na Figura 4.3 é apresentada uma imagem representativa da rotura num dos provetes de 60°. Neste caso, só não ocorreu a separação total das chapas num dos três provetes. O comportamento destes provetes não é comparável, visto que cada amostra difere das outras duas. O primeiro provete rompeu com separação total das chapas, a superfície lateral apresentou-se ligeiramente irregular e, inclusive, o “triângulo” de cola (*taper*) foi arrancado da superfície metálica. O segundo provete apresentou um comportamento semelhante aos de 30°, uma vez que ocorreu o arrancamento do adesivo. Por fim, o terceiro provete de 60° partiu, com separação total das chapas, mas a extremidade dos aderentes ficou praticamente regular.



**Figura 4.3.** Rotura num provete de 60°.

Ensaizando os provetes com ângulo de *taper* no alumínio, bem como os de 0°, verificaram-se os seguintes modos de rotura:

- Nos provetes de 30°, verificou-se a situação de arrancamento de lamelas de cola, sendo que em nenhum dos provetes houve separação total das chapas, após a rotura, conforme se mostra na Figura 4.4. Nos provetes de 45°, também não ocorreu a separação das chapas que formam os provetes, contudo, num dos provetes verificou-se o arrancamento significativo do adesivo, conforme a Figura 4.5. Quanto aos provetes de 60°, verificou-se a separação total das placas, tal como se ilustra na Figura 4.6.



**Figura 4.4.** Rotura num provete de 30°.

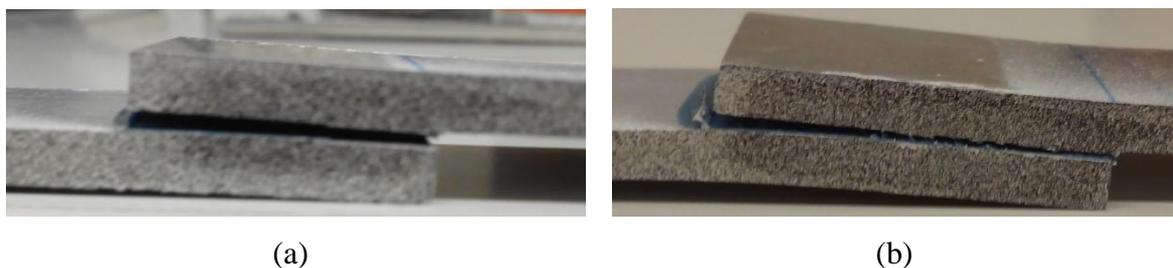


**Figura 4.5.** Rotura num provete de 45°.



**Figura 4.6.** Rotura num provete de 60°.

Relativamente aos provetes de 0°, foi possível concluir que ocorreu a separação das chapas em todos os provetes. Na Figura 4.7 apresentam-se as imagens da rotura referentes a estes provetes.

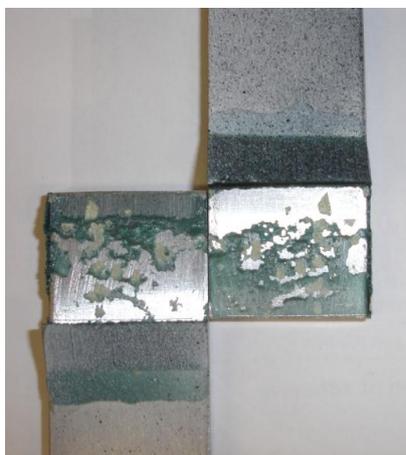


**Figura 4.7.** Rotura nos provetes (a) 0° (b) 0'.

As restantes fotografias sobre a sequência de rotura podem ser encontradas no APÊNDICE A.

### 4.3. Caracterização das Superfícies de Fratura

Observando os provetes em que houve desintegração total das duas placas, verifica-se que a rotura no adesivo ocorreu praticamente por adesão, sendo que existem alguns pontos em que ocorreu rotura por perda de coesão. Essas zonas são distinguíveis na Figura 4.8, onde se visualiza o metal, nalguns sítios e o adesivo verde noutros, o que significa que houve na generalidade dos casos rotura por adesão, com adesivo agarrada num ou noutro aderente. Nas zonas em que houve perda por coesão, observa-se que as manchas são de um tom esbranquiçado. A caracterização detalhada destas superfícies foi feita com recurso à microscopia eletrónica de varrimento e encontra-se pormenorizada no ponto seguinte.



**Figura 4.8.** Fotografia da rotura no provete, com desintegração total das placas.

Para se determinar com precisão as áreas em que ocorreu perda por adesão e perda por coesão, utilizou-se o *software AxioVision (Carl Zeiss)*. As amostras foram previamente medidas e fotografadas, pelo que foi possível delinear as diferentes áreas no programa informático referido, como se mostra na Figura 4.9., que ilustra a diferença entre as zonas de perda de coesão e de adesão.

A cada “mancha” delineada, o programa fornece imediatamente o valor dessa área. Delineando as zonas esbranquiçadas e efetuando o somatório de todas, obteve-se a área de perda por coesão. Subtraindo a área de coesão à área total, foi obtida a área em que houve perda por adesão.



Figura 4.9. Imagem do *AxioVision*, que permite diferenciar as áreas de adesão e coesão.

Nas Figura 4.10Figura 4.12 apresentam-se algumas imagens obtidas pelo *AxioVision*, para os vários provetes. As restantes imagens estão disponíveis no APÊNDICE B.

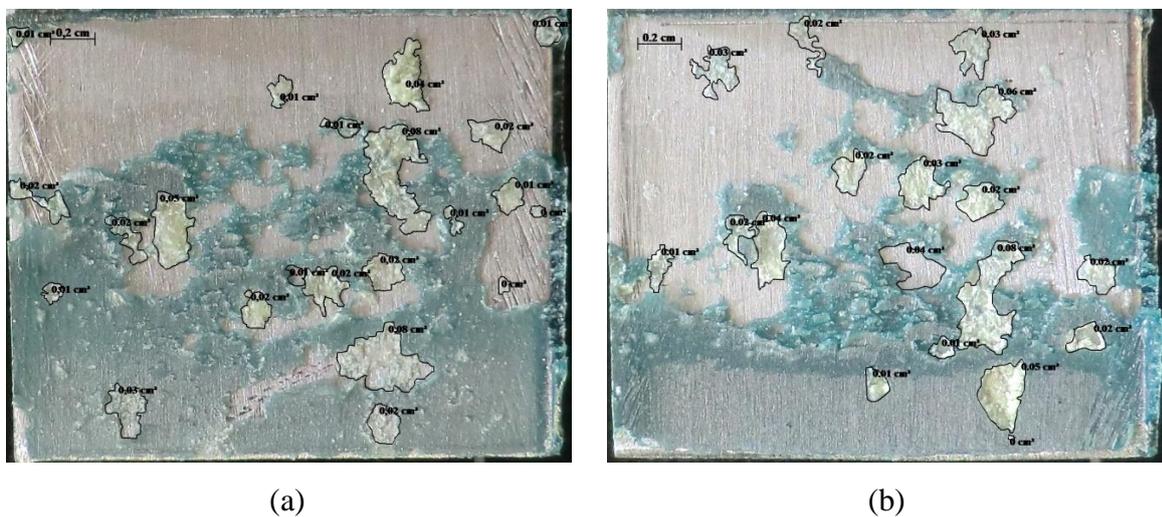


Figura 4.10. Provede de 30°(a) Placa 1 (b) Placa 2.

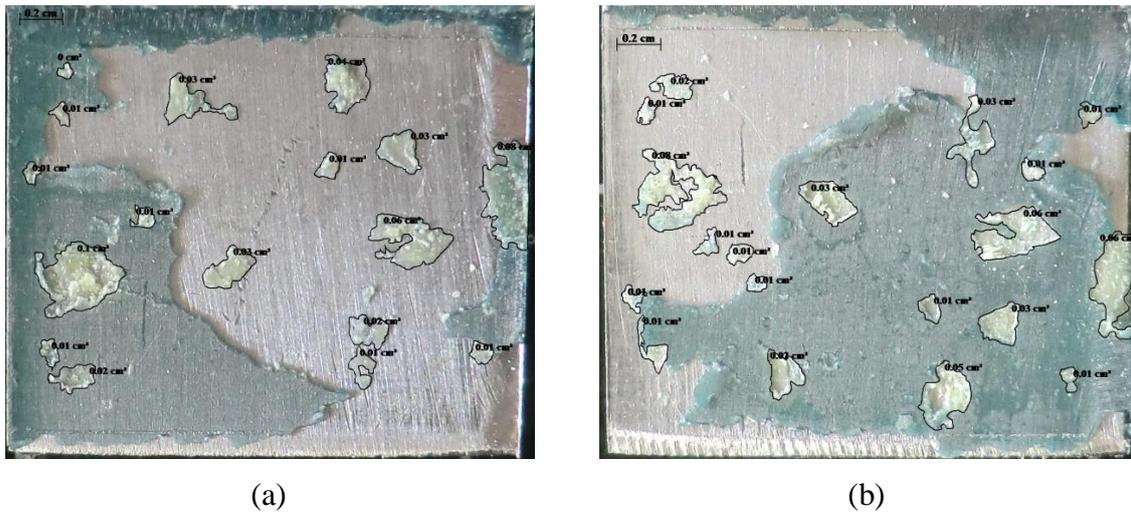


Figura 4.11. Provete de 45°(a) Placa 1 (b) Placa 2.

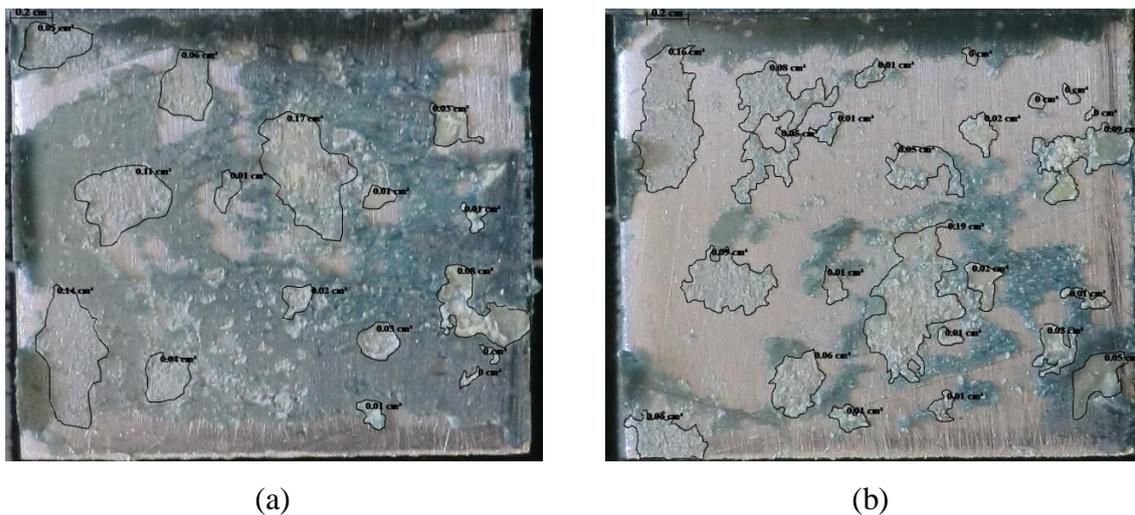


Figura 4.12. Provete de 60°(a) Placa 1 (b) Placa 2.

Nos provetes em que o ângulo de *taper* foi produzido diretamente no alumínio, bem como nas amostras de 0°, verificou-se a não existência de manchas esbranquiçadas, ou seja, não houve rotura por perda de coesão. Posto isto, não foi necessário o recurso ao *software* mencionado, uma vez que a rotura nestes provetes ocorreu 100% por perda de adesão. Este resultado pode ser explicado pelo tempo de armazenamento das amostras, já que os provetes de *taper* no adesivo estiveram armazenados durante mais tempo que os restantes, levando ao envelhecimento do adesivo.

O *software AxioVision* revelou-se bastante útil, uma vez que foi possível delinear com alguma precisão as áreas em que ocorreu rotura por adesão e por coesão. Dessa forma, foi exequível tratar esses resultados de forma igualmente precisa.

Com base nos dados obtidos, resumidos na Tabela 4.1 verifica-se que a rotura ocorreu maioritariamente por perda por adesão, sendo que a perda por coesão corresponde a uma percentagem baixa.

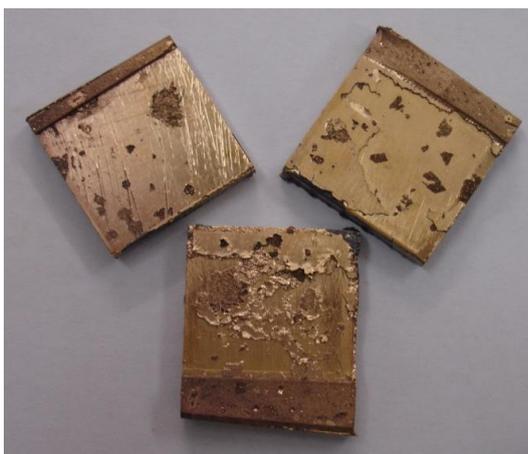
**Tabela 4.1.** Percentagens médias de perdas por adesão e por coesão nos provetes com ângulo de *taper* no adesivo.

Ângulo de <i>Taper</i> no Adesivo	Percentagem Média Coesão [%]	Percentagem Média Adesão [%]
30°	6	94
45°	7	93
60°	12	88

É possível concluir que, com o aumento do ângulo de *taper*, a percentagem média de perda por adesão decresce e, conseqüentemente, a percentagem média de perda por coesão aumenta. Não se percebe contudo qual o mecanismo físico que justifica tal evolução.

#### 4.4. Aspeto Fratográfico

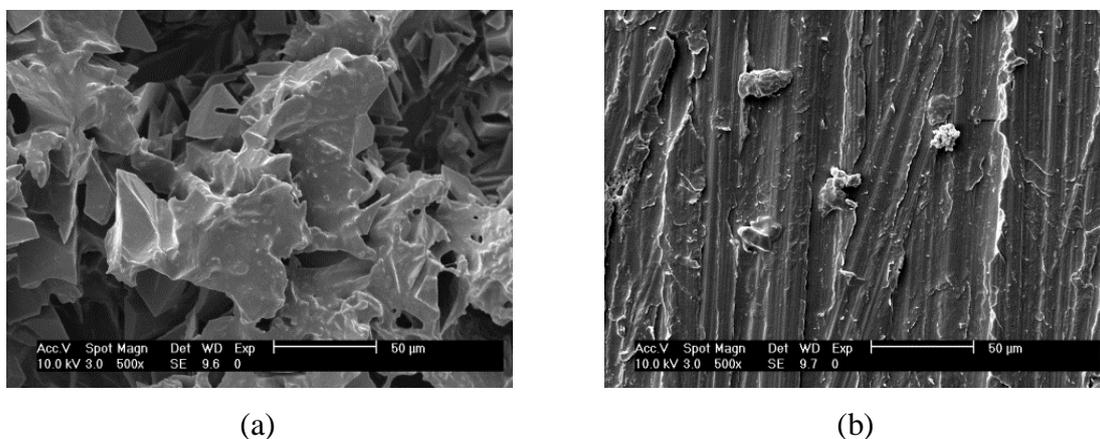
Para se perceber melhor o comportamento das juntas coladas, foram preparadas amostras para visualizar em microscópio SEM: cortaram-se provetes relativos a três ângulos diferentes (feitos no adesivo), seguido de um breve esmerilamento de forma a abater a coluna de cola relativa ao ângulo. De seguida, as amostras foram limpas por ultrassons, durante três minutos, de forma a remover contaminação. Após limpas, secas e coladas num suporte, as amostras foram revestidas com uma camada de ouro, para que se tornassem eletricamente condutoras.



**Figura 4.13.** Amostras revestidas a ouro.

A Figura 4.13 ilustra o aspeto das superfícies de fratura após o processo de revestimento a ouro por pulverização catódica, tendo a superfície ficado com uma camada de ouro de cerca de 30 nm.

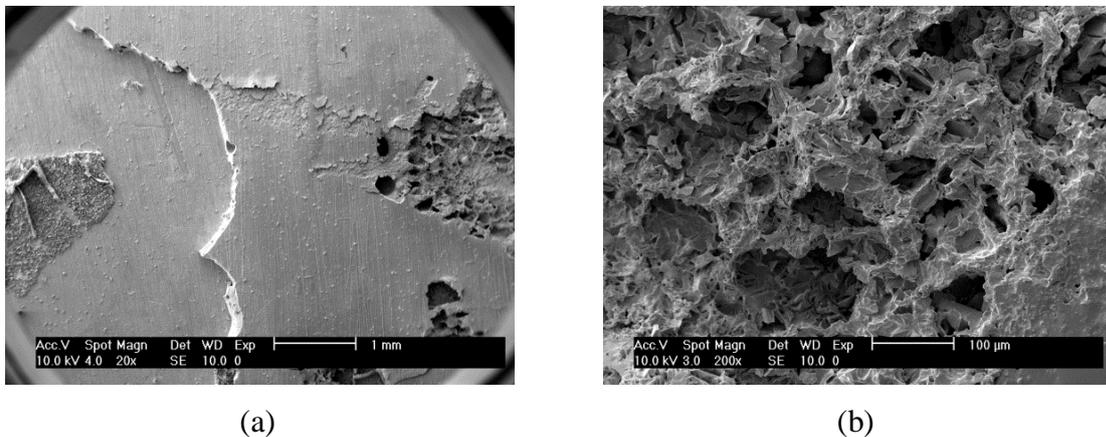
As Figura 4.14 à Figura 4.16 ilustram diversos aspetos morfológicos das superfícies de fratura dos provetes testados.



**Figura 4.14.** Amostra de 30°, 500x ampliação (a) zona de coesão (b) zona de adesão.

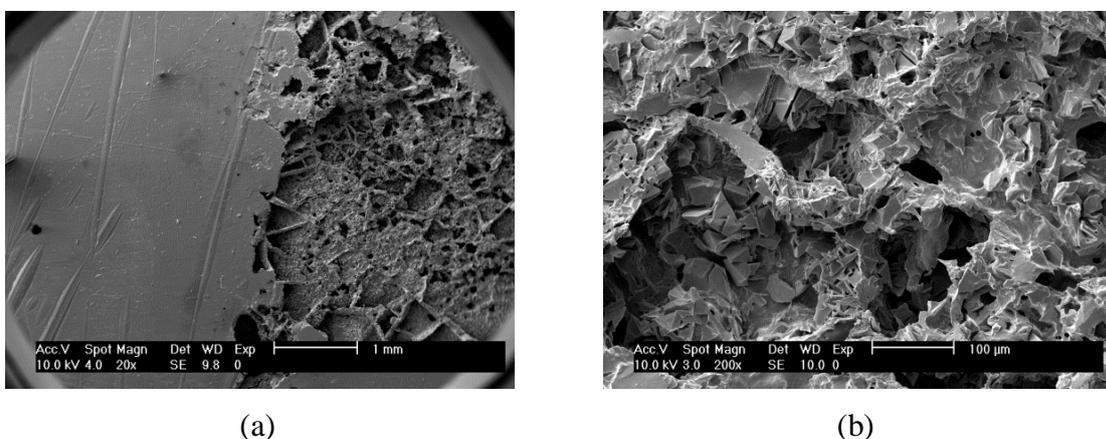
A Figura 4.14 (a) refere-se a uma amostra de 30° de *taper*, cuja ampliação foi de apenas 500x e ilustra uma zona de rotura por adesão. Verifica-se que a zona apresenta facetas de fratura com caráter dúctil, mas situadas a diversos níveis, sugerindo deformação significativa antes da rotura. Esta morfologia híbrida poderá estar relacionada com o envelhecimento do adesivo. A Figura 4.14 (b) ilustra uma zona de rotura por adesão, onde

o relevo da superfície do aderente está delineado. É possível observar na cola alguns lábios de estrição, correspondentes a zonas de maior adesão.



**Figura 4.15.** Amostra de 45°(a) 20x ampliação (b) 200x ampliação.

As Figura 4.15 (a) e (b) mostram o aspeto fractográfico numa amostra de 45°. Na Figura 4.15 (a) mostra-se em baixa ampliação (20x) o aspeto da superfície de fratura, onde se verifica a existência de três zonas distintas, sendo que a zona central corresponde a rotura por adesão e as laterais a rotura por coesão. Na Figura 4.15 (b) apresenta-se, com uma ampliação de 200x, a zona de perda por coesão mais à direita na Figura 4.15. (a). Aqui a morfologia da rotura coesiva é mais convencional, sendo perfeitamente visíveis zonas de estrição do adesivo, com morfologia mais próxima da que se observa habitualmente nos materiais metálicos.



**Figura 4.16.** Amostra de 60°(a) 20x ampliação (b) 200x ampliação.

Na Figura 4.16 são apresentadas as imagens referentes à amostra de 60°, em que a imagem (a) representa duas zonas distintas, de rotura por coesão e por adesão, com uma ampliação de 20x. A imagem (b) mostra em detalhe a zona em que houve perda de coesão, com uma ampliação de 200x. Observa-se aqui também a presença de cavidades com zonas de estrição bem marcadas.

Em resumo os mecanismos de rotura presentes nas amostras produzidas com diferentes ângulos de *taper* são similares, variando apenas a sua extensão, conforme referido no ponto anterior.

As restantes imagens de morfologia de rotura encontram-se no APÊNDICE C.

#### **4.5. Resistência Estática das Ligações**

Para a obtenção da resistência à tração das juntas coladas utilizou-se, conforme explicado no Capítulo 3, uma máquina de ensaios de tração Instron 4206 e um sistema de extensometria ótica, ARAMIS. Na Figura 4.17 estão representadas as curvas força-extensão dos provetes representativos das séries com *taper* de adesivo com diferentes ângulos e das séries com *taper* de alumínio, também com diferentes ângulos.

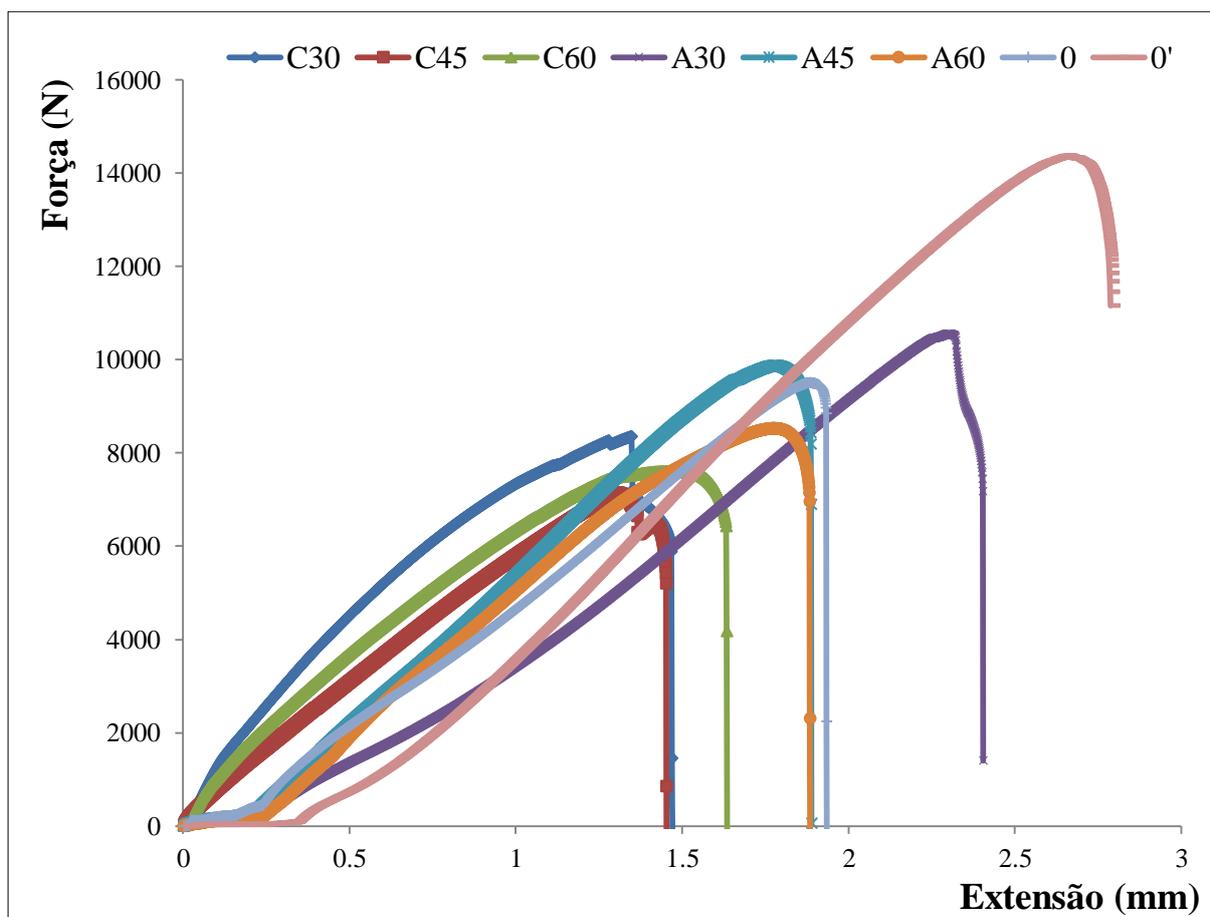
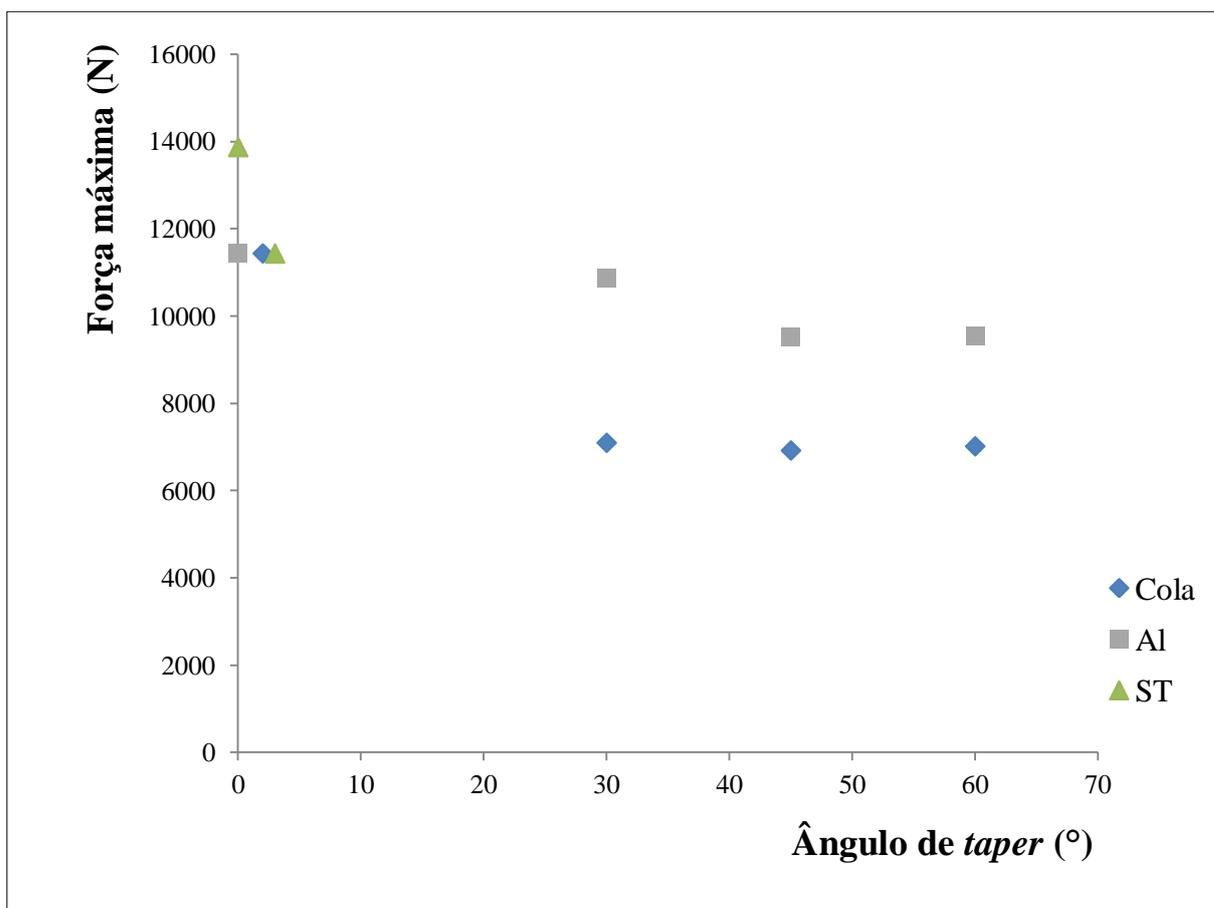


Figura 4.17. Evolução da extensão em função da força aplicada pela Instron.

Neste gráfico observam-se três grandes grupos de curvas; o primeiro, que inclui as curvas com força máxima mais baixa, corresponde a provetes com *taper* de adesivo (C30, C45 e C60); o segundo, que inclui as curvas com força máxima intermédia, corresponde a provetes com *taper* de alumínio. Por último, o terceiro grupo inclui provetes sem qualquer *taper*. De acordo com a Figura 4.17, pode-se concluir que os provetes com *taper* de adesivo apresentam uma resistência mais baixa, quando comparados com os provetes com *taper* de alumínio. Os provetes sem ângulo de *taper* apresentam resistência igual ou superior aos provetes com *taper* em alumínio.

Vários fatores podem contribuir para estas diferenças, como sejam os ângulos de *taper* e os comprimentos efetivos de sobreposição dos aderentes. A Figura 4.18 realça a variação da resistência da ligação em função do ângulo de *taper* para o caso do *taper* de adesivo e de alumínio, além de ligações sem qualquer *taper*.

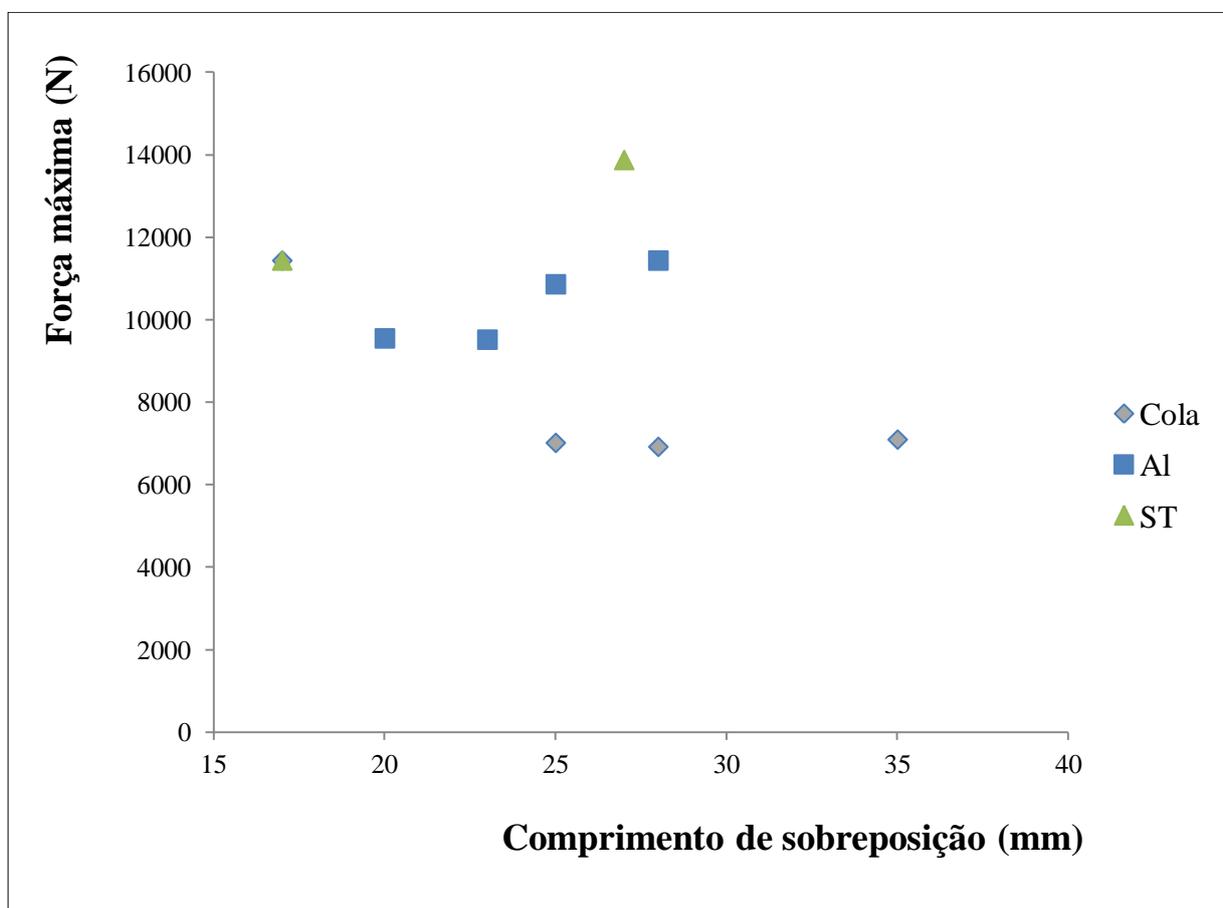


**Figura 4.18.** Evolução da força máxima com o ângulo de *taper*, Adesivo – com *taper* de adesivo; Al – com *taper* de Al; ST – sem *taper*.

A figura mostra que no caso das ligações com *taper* de alumínio a resistência diminui à medida que o ângulo de *taper* aumenta, até um valor máximo na ordem de 16.5%. Pelo contrário, nas ligações com *taper* de adesivo, o ângulo de *taper* não parece influenciar a resistência da junta. Contudo, no caso das ligações sem *taper* (ângulo zero), a resistência é 63% superior. Esta diferença deve-se essencialmente à diferença de tempos de envelhecimento dos adesivos. De facto, as juntas com *taper* zero foram preparadas e envelhecidas no forno, conforme descrito e testadas pouco depois, enquanto que as restantes juntas foram preparadas no ano anterior. A falta de influência dos *tapers* com adesivo está relacionada com o modo de fratura na junta, conforme se detalha no ponto seguinte. Os provetes de *taper* zero, designados por ST, apresentam resistências significativamente diferentes, devido à variação do comprimento de sobreposição, conforme se verá mais à frente.

Quanto às juntas com *taper* em alumínio a perda de resistência pode ser devida ao efeito do *taper* ou à variação do comprimento de sobreposição dos aderentes. A Figura 4.19 ilustra a influência do comprimento de sobreposição. A figura mostra que o aumento do comprimento de sobreposição é um fator muito importante no aumento da resistência. Observa-se efeito similar no caso das juntas sem *taper*.

Repare-se que no caso de juntas com *taper* de adesivo, o comprimento de sobreposição dos aderentes é o mesmo (20 mm), variando apenas o comprimento dos *tapers* de adesivo.



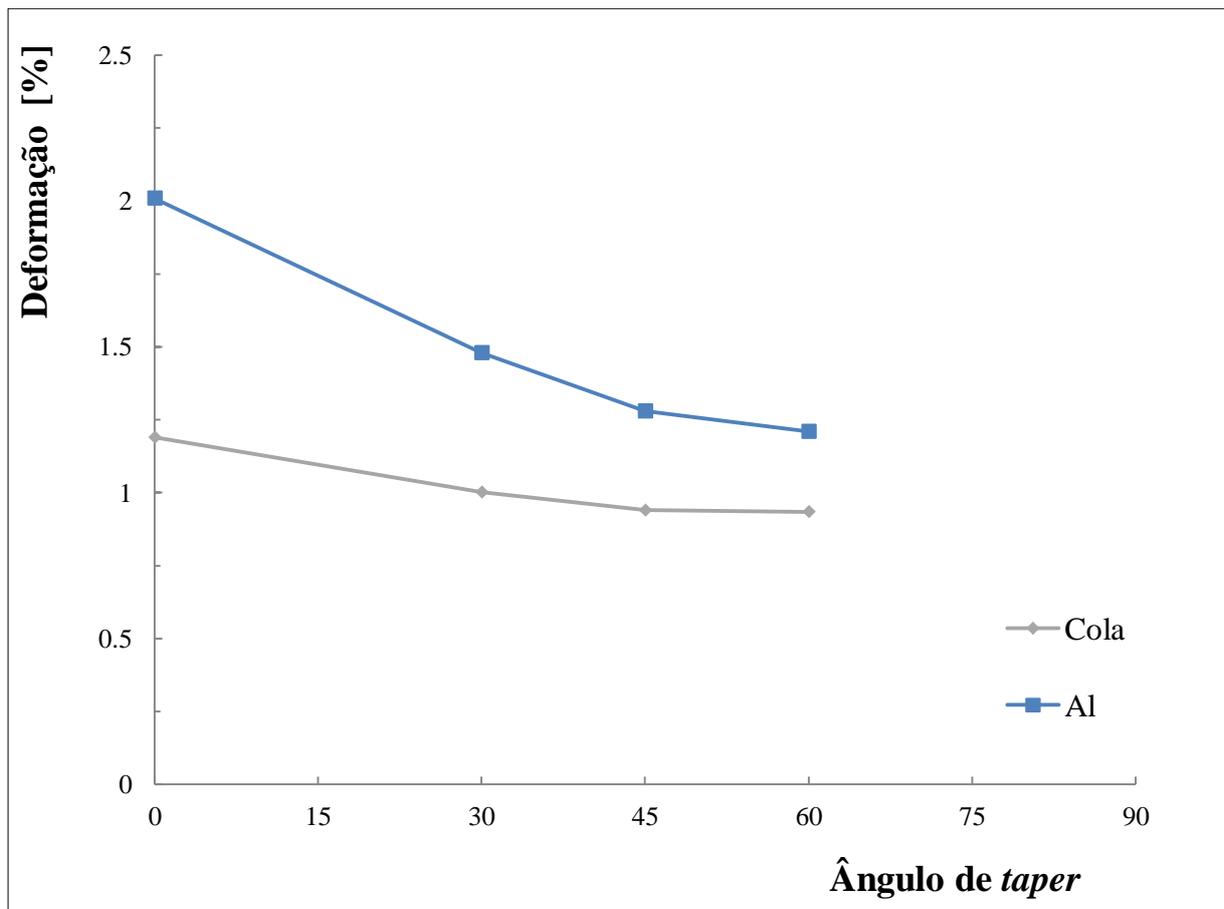
**Figura 4.19.** Influência do comprimento de sobreposição na resistência da ligação.

O efeito do ângulo de *taper* na deformação global da ligação na carga máxima encontra-se ilustrada na Tabela 4.2 e na Figura 4.20. Verifica-se que, na generalidade, a deformação global é muito reduzida e pouco influenciada pelo ângulo de *taper* principalmente no caso de juntas com *taper* de adesivo. Isto está mais uma vez relacionado com o modo de rotura nestas ligações.

No caso das juntas com *taper* de alumínio e sem *taper*, a deformação global tende a crescer com o comprimento de sobreposição, tal como se mostra na Figura 4.19.

**Tabela 4.2.** Tensão Média de Corte e Deformação Média.

<b>Provete</b>	<b>Deformação Média [%]</b>	<b>Desvio Padrão Deformação [%]</b>
<i>Taper 0°</i>	1.19	0.23
<i>Taper 0°</i> '	2.01	1.29
<i>Taper 30° de adesivo</i>	1.00	0.08
<i>Taper 30° no Al</i>	1.48	0.12
<i>Taper 45° de adesivo</i>	0.95	0.04
<i>Taper 45° no Al</i>	1.28	0.11
<i>Taper 60° de adesivo</i>	0.94	0.09
<i>Taper 60° no Al</i>	1.21	0.25



**Figura 4.20.** Evolução da deformação a nível global com o ângulo de *taper*.

Na Figura 4.20 é possível verificar que o aumento da deformação é mais significativo nos provetes com ângulo de *taper* produzido no aderente em liga de alumínio. Essa tendência é confirmada na Figura 4.21, uma vez que a deformação global pouco varia nos provetes com *taper* de cola.

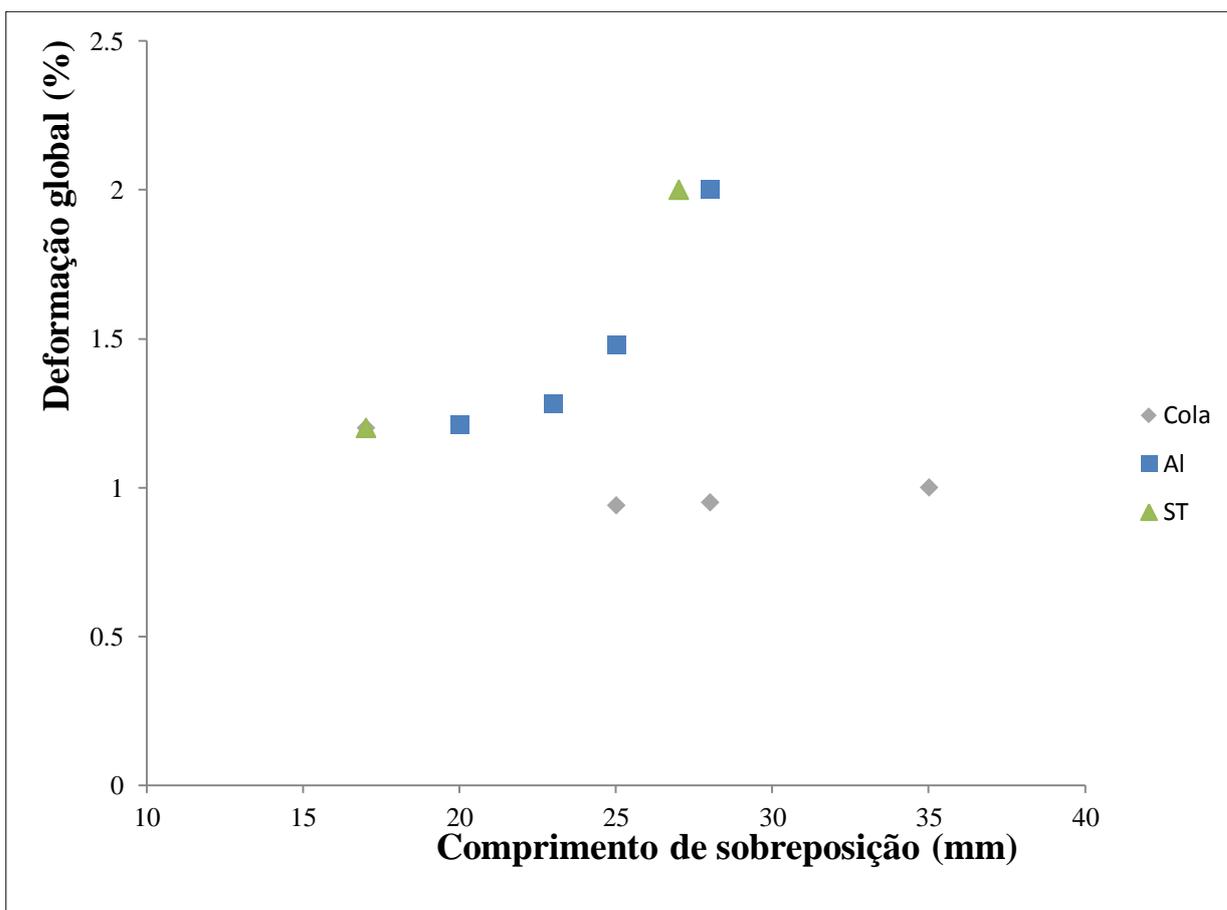


Figura 4.21. Influência do comprimento de sobreposição na deformação global.

#### 4.5.1. Análise de Deformações Locais

As deformações apresentadas referem-se a deformações globais, enquanto as deformações locais de adesivo são normalmente muito superiores. Na Figura 4.22 faz-se a comparação entre os dois tipos de deformações, obtidas umas diretamente da máquina e outras do sistema de correlação digital de imagem (ARAMIS). Conforme se pode constatar na referida figura, as deformações no adesivo são muito superiores às deformações globais. Repare-se que na curva obtida pelo sistema DIC foi truncada, de modo a evidenciar também a deformação global no provete (Instron).

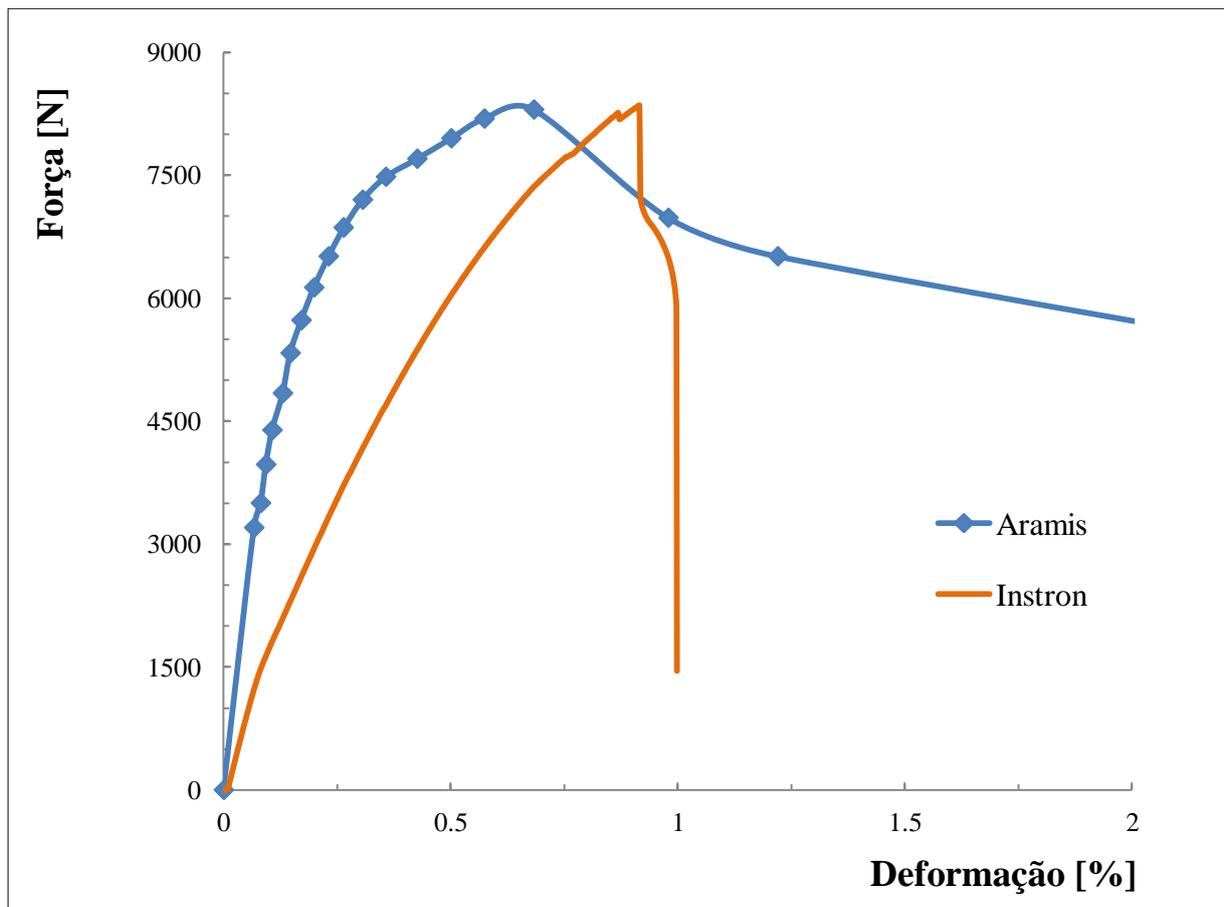


Figura 4.22. Comparação entre as curvas obtidas (provete com inclinação de adesivo de 30°).

A curva referente ao sistema ARAMIS foi retirada para um provete de 30° de taper de adesivo, na junta, conforme indicado na Figura 4.23 e é ilustrativa das restantes.

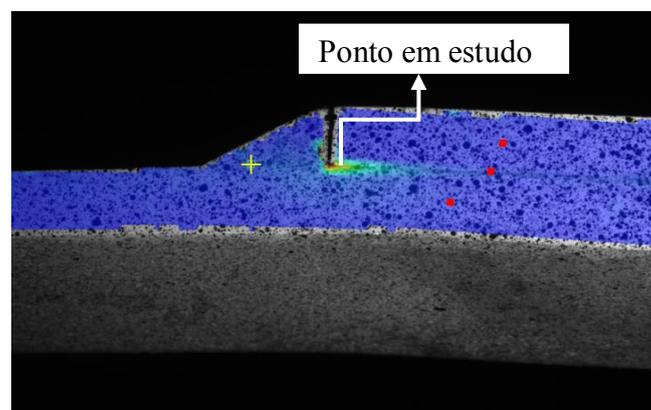
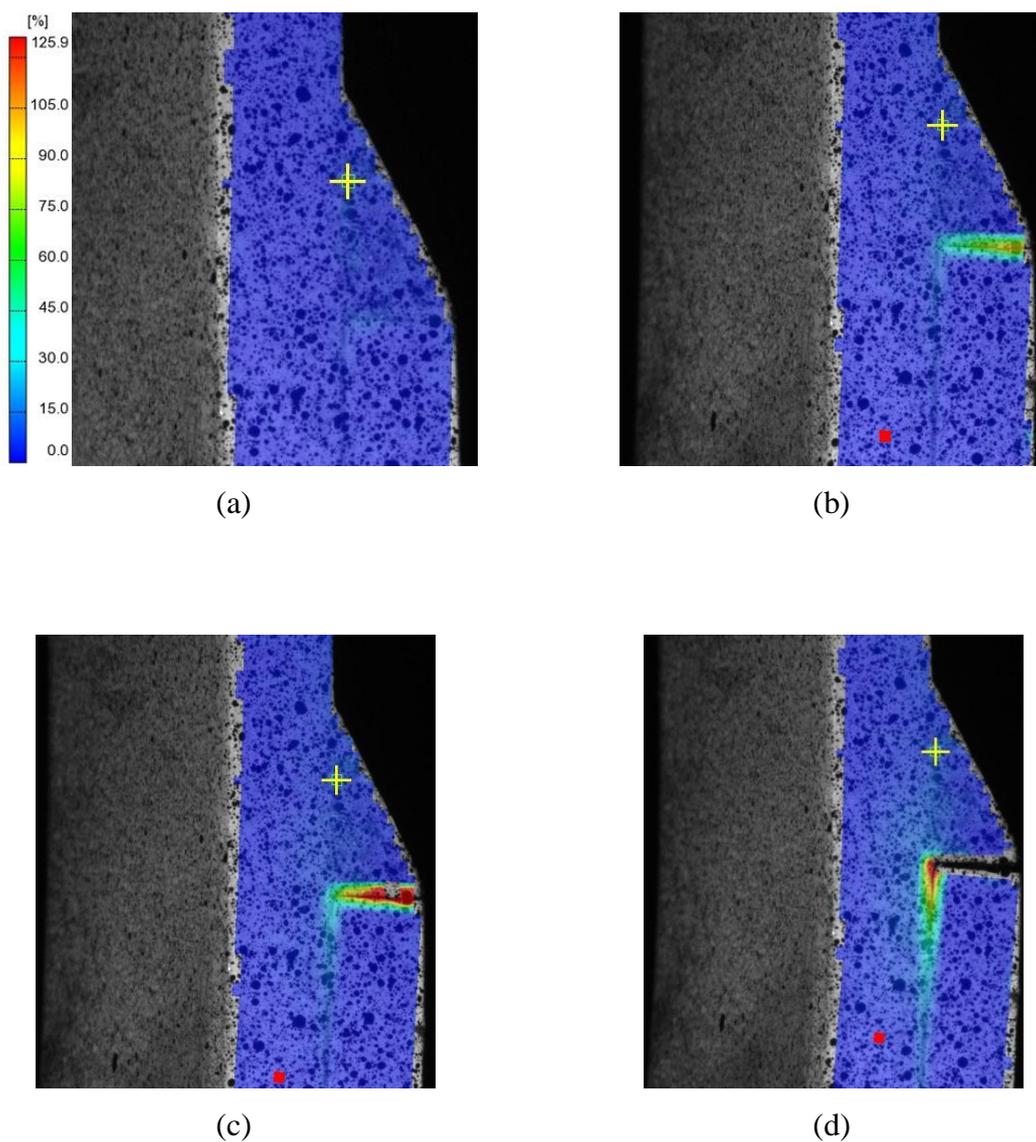
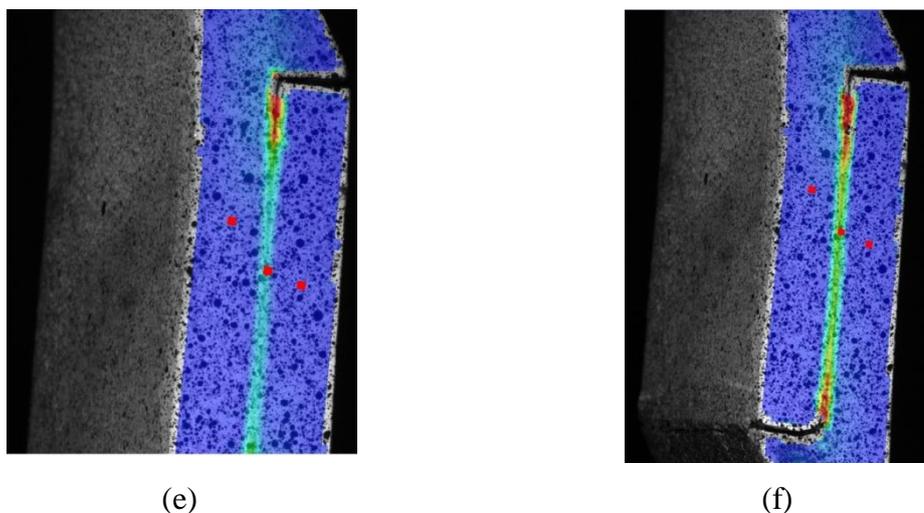


Figura 4.23. Localização do ponto de medição das tensões e deformações no adesivo.

O sistema ARAMIS, através do sistema de correção digital de imagens permite seguir a progressão da rotura nos provetes durante o ensaio de tração. Nas imagens seguintes apresentam-se seqüências dessas imagens para diversos provetes. No APÊNDICE D apresentam-se mais algumas seqüências. A.Figura 4.24 apresenta apenas alguns estágios de deformação na zona do *taper* de adesivo de 30°.

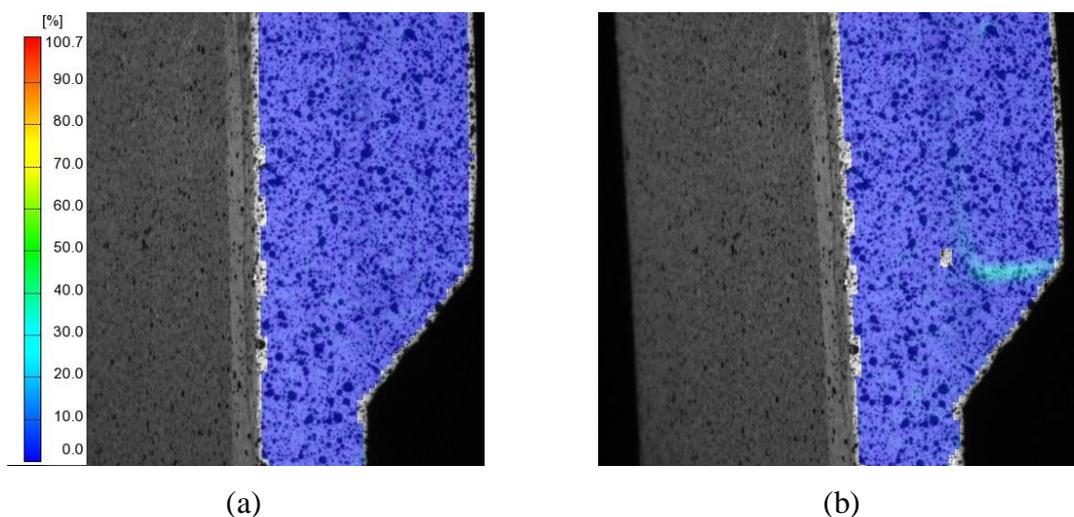


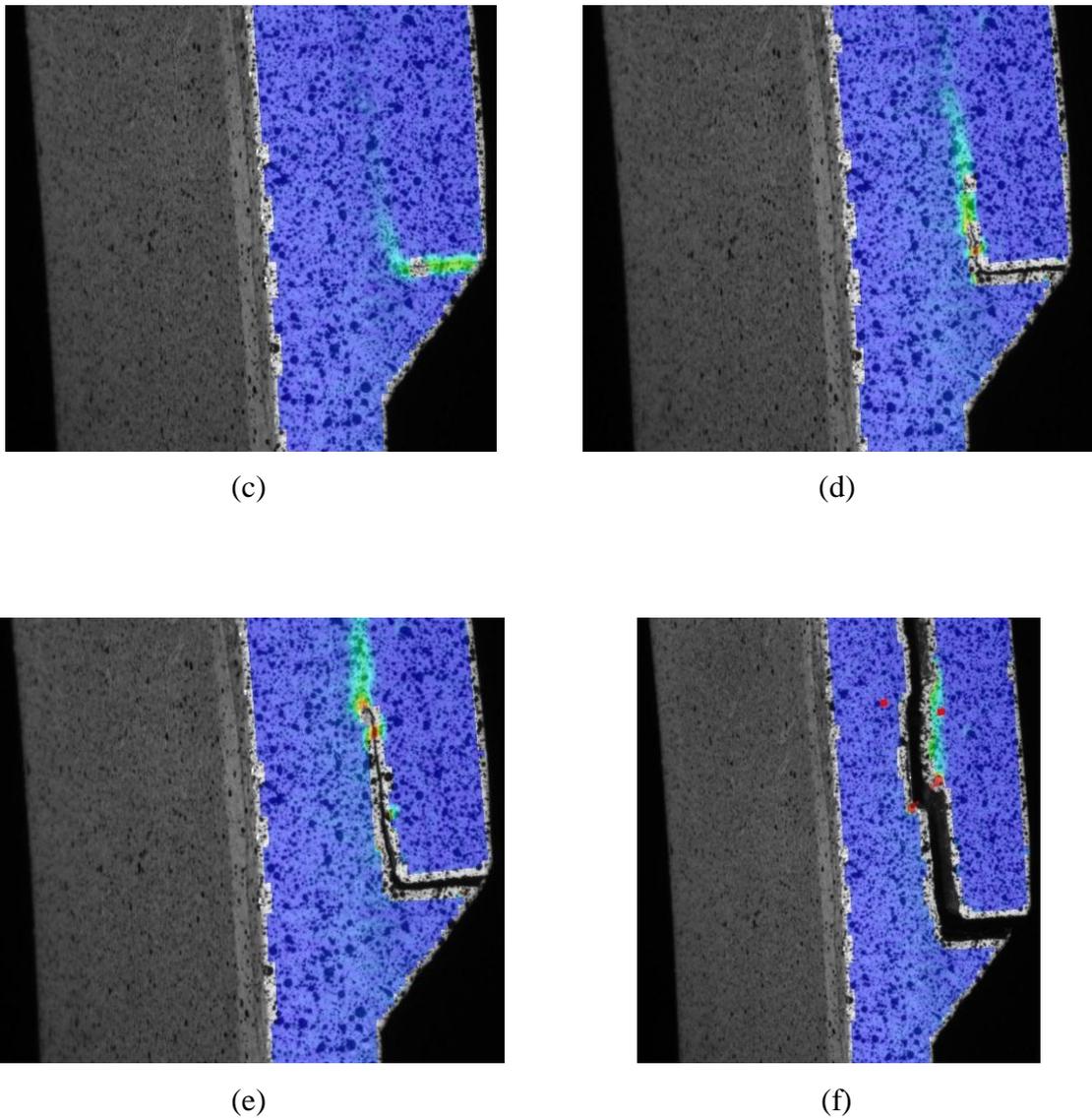


**Figura 4.24.** Provete de 30° (a) Estágio 10 (b) Estágio 16 (c) Estágio 19 (d) Estágio 23 (e) Estágio 24 (f) Estágio 25.

Como se pode verificar, este provete de 30°, no decorrer do estágio 10, tinha ainda uma superfície praticamente inalterada. Com o decorrer do ensaio, a deformação cresceu preferencialmente entre o *taper* e o topo do aderente, até à rotura, iniciando-se depois a propagação da fenda no adesivo, na interface entre aderentes, até ocorrer a rotura total da junta. Isto mostra que os *tapers* de adesivo não têm praticamente influência na resistência global da junta.

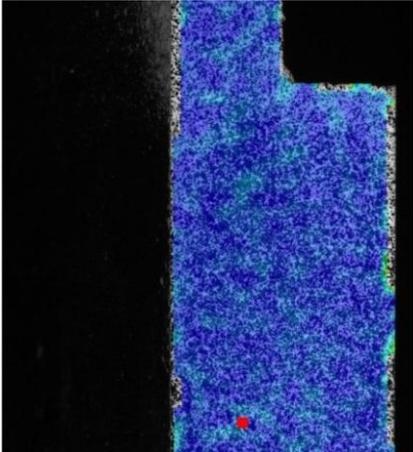
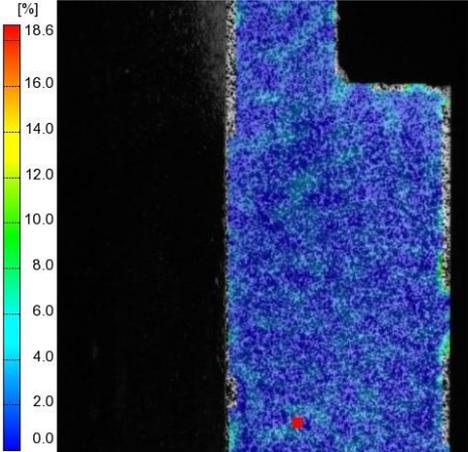
Na Figura 4.25 apresenta-se uma sequência de imagens idêntica, para um provete com *taper* de adesivo a 45°.



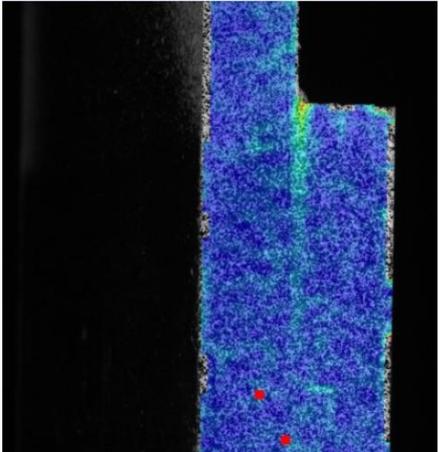


**Figura 4.25.** Provete de 45° no adesivo (a) Estágio 1 (b) Estágio 30 (c) Estágio 40 (d) Estágio 44 (e) Estágio 46 (f) Estágio 47.

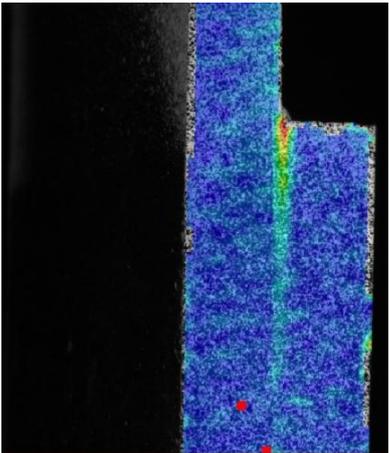
O comportamento na rotura é perfeitamente idêntico ao observado no provete anterior e nos restantes provetes com *taper* de adesivo. A Figura 4.26 mostra uma sequência de imagens para um provete de 0°, isto é, sem *taper*.



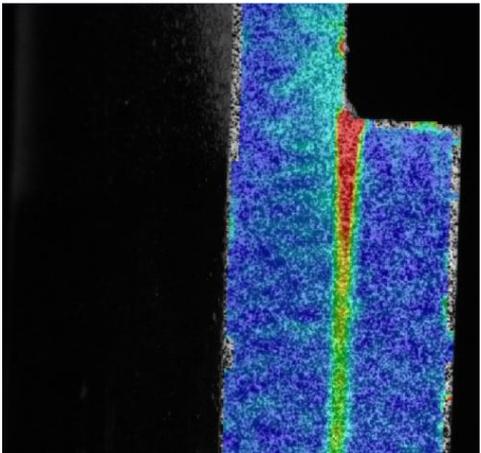
(a)



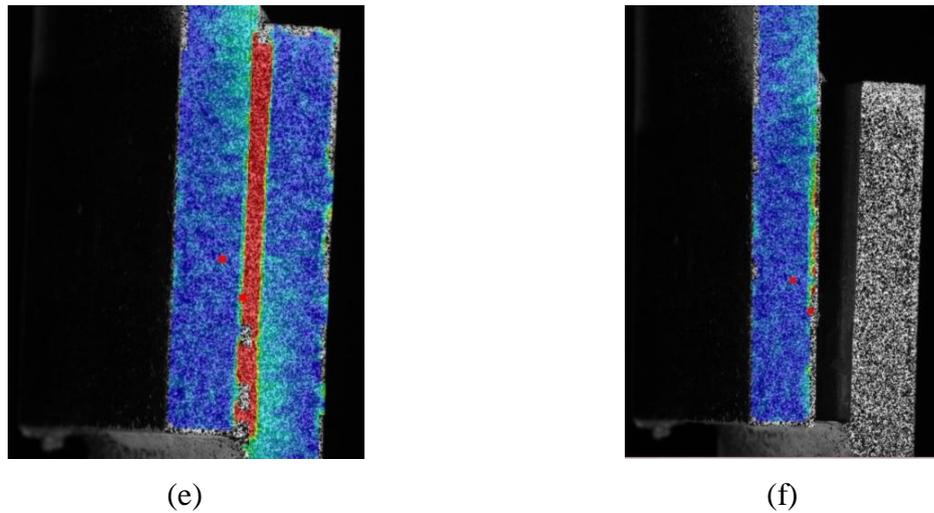
(b)



(c)



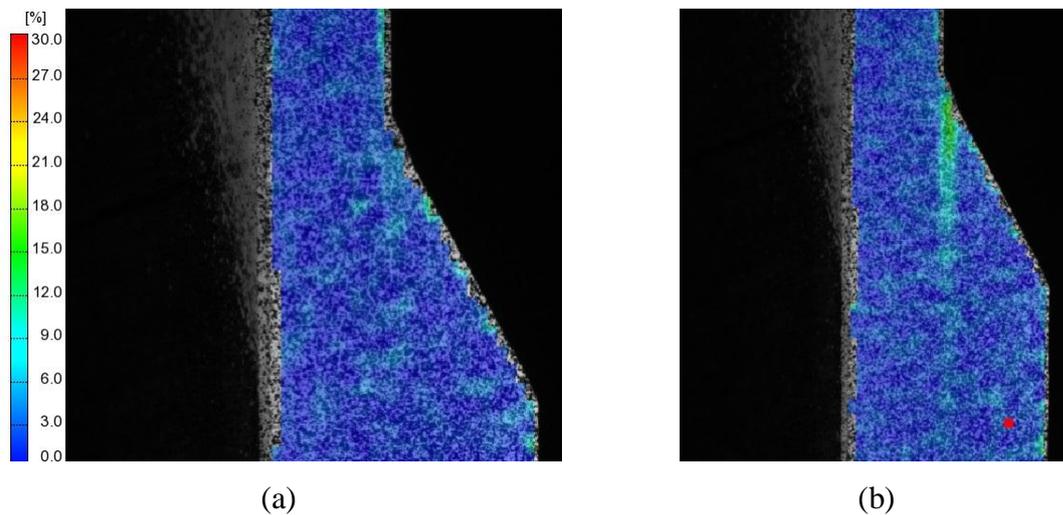
(d)

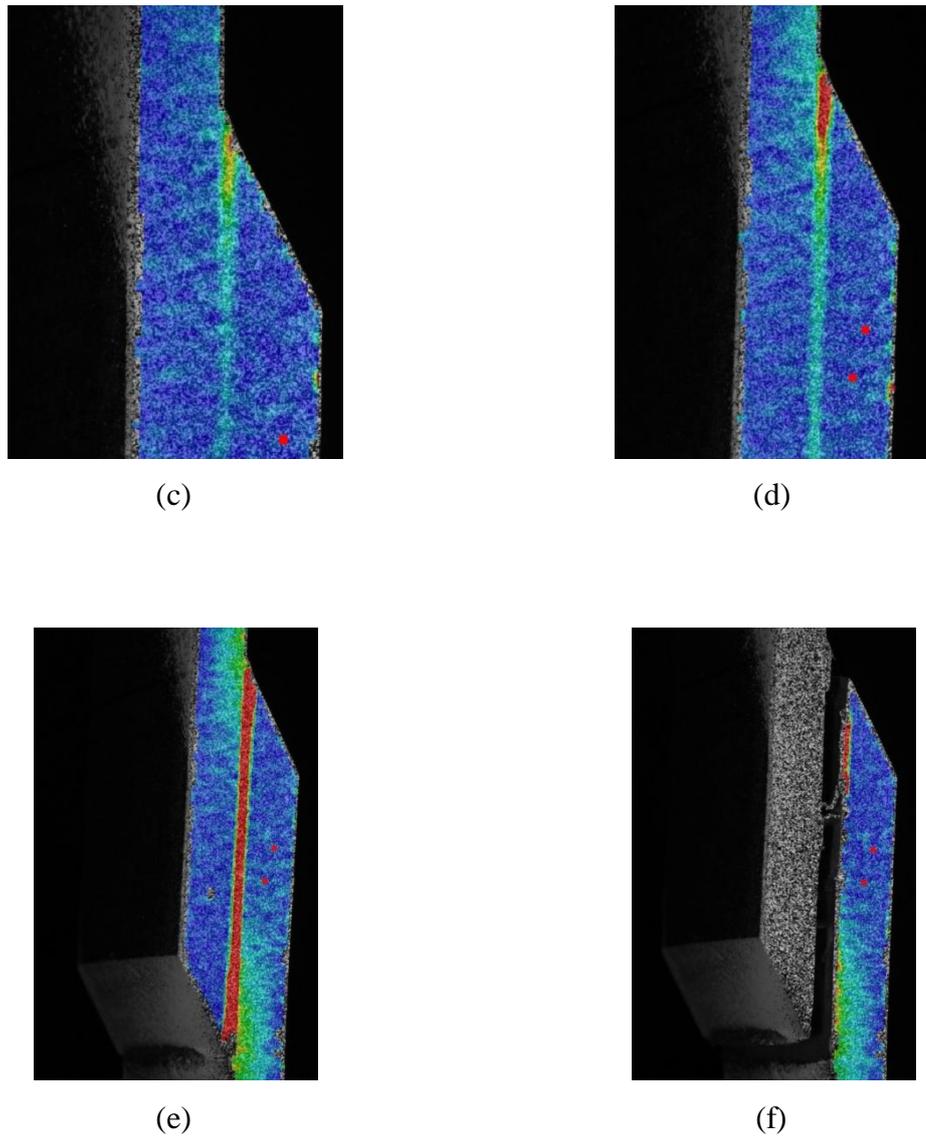


**Figura 4.26.** Provete de 0° (a) Estágio 3 (b) Estágio 16 (c) Estágio 22 (d) Estágio 30 (e) Estágio 34 (f) Estágio 39.

A Figura 4.26 mostra que a fratura se inicia nas extremidades coladas e se propaga para a zona central da colagem, tal como nos provetes anteriores, mas sem rotura no *taper*, que não existe para este caso.

Os provetes com ângulo de *taper* no alumínio apresentam evolução idêntica, conforme se ilustra na Figura 4.27 para um provete com *taper* de 30°:





**Figura 4.27.** Provete de 30° no alumínio (a) Estágio 5 (b) Estágio 19 (c) Estágio 27 (d) Estágio 38 (e) Estágio 47 (f) Estágio 50.

Neste caso, a evolução da rotura faz-se de forma idêntica aos provetes apresentados anteriormente e aos restantes provetes apresentados no APÊNDICE D.

## 5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHO FUTURO

### 5.1. Conclusões

As principais conclusões que podem ser retiradas deste estudo são:

- A rotura por adesão nas juntas com *taper* de adesivo ronda os 90%, ao passo que nas juntas com *taper* de alumínio é de 100%;
- As juntas com *taper* de alumínio apresentam resistência mais elevada do que as juntas com *taper* de adesivo;
- O *taper* de adesivo não tem influência na resistência das juntas;
- Quanto maior é o comprimento de sobreposição dos aderentes, maior a resistência da junta;
- Nos provetes com *tapers* de adesivo, a rotura inicia-se na interface entre os *tapers* e o topo dos aderentes propagando-se posteriormente à interface entre aderentes;
- Nas restantes geometrias de junta, a rotura inicia-se nas extremidades da zona colada, propagando-se para o centro dessa zona.

### 5.2. Propostas de Trabalho Futuro

Como continuação deste trabalho, são apresentados alguns tópicos passíveis de um estudo mais aprofundado:

- Estudo da influência do *taper*, recorrendo a ângulos mais baixos, como por exemplo 10°, 15° ou 20°;
- Estudo de outras geometrias de *taper*, uma vez que a única geometria utilizada neste trabalho foi a triangular;
- Estudo do comprimento de sobreposição, mantendo o mesmo ângulo de *taper*;
- Estudo do *taper* de alumínio, com área de colagem constante;
- Dentro da área da simulação, seria interessante o estudo numérico com vista a aprofundar detalhes na investigação.



---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amber Composites, Ficha Técnica do Adesivo Araldite, 2009, *Online* em: [www.ambercomposites.com/downloads/datasheet/araldite-420-tds-v1.pdf](http://www.ambercomposites.com/downloads/datasheet/araldite-420-tds-v1.pdf), Acedido a 18 Fevereiro 2014.
- Atlas Steels Australia, Ficha Técnica do Alumínio 5083, 2013, *Online* em: [www.atlassteels.com.au/documents/Atlas\\_Aluminium\\_datasheet\\_5083\\_rev\\_Oct\\_2013.pdf](http://www.atlassteels.com.au/documents/Atlas_Aluminium_datasheet_5083_rev_Oct_2013.pdf), Acedido a 17 Fevereiro 2014.
- Comyn, J., “Adhesive Bonding: Science, Technology and Applications”, edited by R. D. Adams, pp. 23-51, Woodhead Publishing Limited, England, 2005 (ISBN 978-1-85573-741-9)..
- Correia, A. C. M., “Estudo Químico e Envelhecimento Higrotérmico de um Adesivo de Epóxido. Comportamento Mecânico de Juntas Coladas”, Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra, 1993.
- da Silva, L.F.M., de Magalhães, A.G. e de Moura, M.F.S.M., Juntas Adesivas Estruturais, Porto, Publindústria, Edições Técnicas, 2007.
- EAA, European Aluminium Association, “Joining - Adhesive Bonding,” 2002.
- Esteves, J. L. S., “Estudo do Comportamento de Adesivos Estruturais”, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto, 1990. *Online* em: [repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/12346/2/Texto%20integral.pdf](http://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/12346/2/Texto%20integral.pdf), Acedido a 20 Maio 2014.
- Hashim, S., “Adhesive Bonding of Thick Steel Adherends for Marine Structures,” Elsevier Science Publishers Ltd, pp. 405-423, 1999.
- Hattori, T., “A Stress-Singularity-Parameter Approach for Evaluating the Adhesive Strength of Single-Lap Joints,” The Japan Society of Mechanical Engineers, vol. 34, n.º Séries I, N.º 3, pp. 326-331, 1991.
- Higgins, A., “Adhesive Bonding of Aircraft Structures,” International Journal of Adhesion&Adhesives, pp. 367-376, 2000.
- Lang, T.P. e Mallick, P.K., “Effect of Spew Geometry on Stresses in Single Lap Adhesive Joints”, Elsevier, 1998.
- Leitão, C., Galvão, I., Leal, R.M., Rodrigues, D.M.-“Determination of Local Constitutive Properties of Aluminium Friction Stir Welds Using Digital Image Correlation”, Elsevier Science Publishers Ltd, Coimbra, Portugal, 2011.
- Leitão, C., Costa, M.I., Khanijomdi, K., Rodrigues, D.M. – “Assessing Strength and Local Plastic Behaviour of Welds by Shear Testing”, Elsevier Science Publishers Ltd., Coimbra, Portugal, 2013.

- Loureiro, A. J. R., “Texto Apoio Ligações Adesivas”, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, 2005.
- Lucic, M., Stoic, A., Kopac, J., “Investigation of Aluminum Single Lap Adhesively Bonded Joints”, 11th International Scientific Conference on Contemporary Achievements in Mechanics, Manufacturing and Materials Science, Poland, 2005.
- Miller, W.S., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A. J., De Smet, P., Haszler, A., Vierendege, A., “Recent Development in Aluminium Alloys for the Automotive Industry”, Elsevier, 2000.
- Moreira, D. C., Nunes, L. C. S., “Experimental Analysis of Bonded Single Lap Joint With Flexible Adhesive”, Applied Adhesion Science, 2014, 2:1.
- Nicholson, C., Abercrombie, J., Botterill, W. , Brocato, R., Detzel, J., Fitzpatrick Jr., J., Messer, M., Mohr, F., Robins, B., Toback, A. e Weichsel, R. , “History of Adhesives,” Bearing Specialists Association, 1991.
- Norma D1002, “Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)”, ASTM (American Society for Testing and Materials), Estados Unidos da América.
- Packer, J., “New Zealand Institute of Chemistry”, 1990. *Online* em: <http://nzic.org.nz/ChemProcesses/polymers/10H.pdf>, acessado a 7 Março 2014.
- Solmaz, M. 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”, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering Firat University, Turkey, vol. 16, N.º 1, pp. 159-170, 2011.
- Täljsten, B., “The Importance of Bonding - An Historic Overview and Future Possibilities,” Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Denmark, pp. 1-10, 2005.

## ANEXO A

Ficha técnica do adesivo Araldite 420 A/B (Capítulo 3.1.2)

### ARALDITE 420 A/B

2 Component Epoxy Adhesive

Araldite 420 A/B is a two component, room temperature curing paste adhesive of high strength and toughness. It is suitable for a wide variety of metal, honeycomb and fibre reinforced composite bonding applications. It has very high shear strength even at temperatures up to 70°C and good peel strength.

Typical uses include:

- bonding inserts, ferrules, aluminium and composite edge members, joining strips, etc, in both metallic and non-metallic honeycomb sandwich structures.
- Fabrication of composite components using the cut and fold technique.

#### CHARACTERISTICS:

- Very high shear and peel strength
- Extremely tough and resilient
- Good moisture resistance
- Bonds a wide variety of materials including metal, wood, rubber, glass fibre reinforced composites and many plastics

#### TYPICAL PRODUCT DATA

Property	Araldite 420A	Araldite 420 B	Mixed Adhesive	Test Method
Colour (visual)	Yellow	Blue	Dark green	Visual
Specific gravity	ca. 1.2	ca. 1.0	1.1 – 1.2	ASTM-D-792
Viscosity at 25°C (pas)	100 – 300	0.6 – 1.4	35 – 45	ASTM-D-2196
Gel time (100 gm at 25°C) mins	-	-	60	ASTM-D-2471

#### PROCESSING

##### Pretreatment

The strength and durability of a bonded joint are dependant 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, trichloroethylene or proprietary degreasing agent in order to remove all traces of oil, grease and dirt. 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 420A	100	100
Araldite 420B	40	50

Stir the two components thoroughly together until the two colours are completely blended, without any visible streaks. Automatic mixing / dispensing may be used. Araldite 420 A/B is also supplied in cartridges incorporating mixers and can be applied as ready to use adhesive with the aid of a recommended tool.

#### Usable life

Due to exothermic reaction between the two components the usable life depends to some extent on the quantity mixed and the shape of the container. Use of a shallow container will extend the usable life and as a rough guide:

for 50gm mix, usable life at 25°C is 2 hours

for 100gm mix, usable life at 25°C is 1 hour

#### Application of adhesive

The resin/hardener mix is applied directly or 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.

#### Curing

Once applied, Araldite 420 A/B will gel in 3 - 4 hours at 25°C and will be sufficiently cured after 5 hours to allow the bonded component to be handled. After 4 - 5 days the adhesive will obtain 90% of its full strength and achieve full strength after 1 to 2 weeks at room temperature. Cure can be accelerated by heating. 4 hours at 50°C or 1 hour at 120°C will be sufficient to achieve full strength. Shear properties can be improved, particularly at elevated temperatures, by post-curing for up to 24 hours at 70°C.

#### Lap shear strength after various cure times at 23°C

5 hours: 1 N/mm<sup>2</sup>

6 hours: 8 N/mm<sup>2</sup>

7 hours: 9 N/mm<sup>2</sup>

---

#### Typical cured properties

These figures are for guidance and do not constitute a specification.

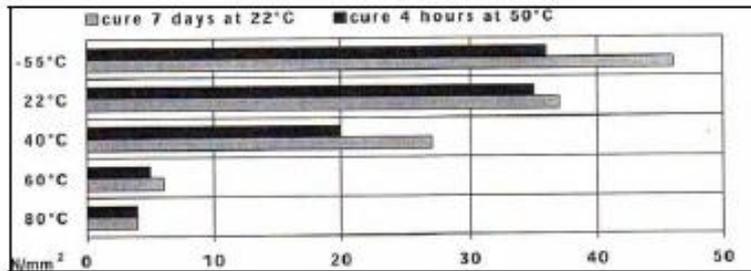
**Bell peel** 150 N/25mm (60°C peel using 2024-T3 clad aluminium adherends at 25°C).

#### Honeycomb bonding results (in accordance with MIL-A-25463)

Beam shear at 22°C: 12kN (core failure); Flatwise tensile at 22°C: 8.5 N/mm<sup>2</sup>

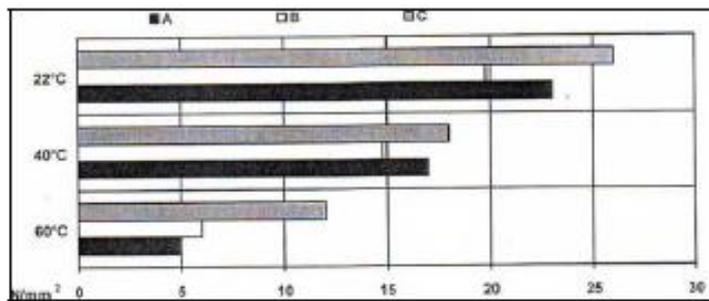
Metal: 2024 - T3; Core: 7.9 - ¼ - 40 5052

### Variation of lap shear strength as a function of temperature



### Lap shear strength: variation after exposure to 95% RH at 60°C

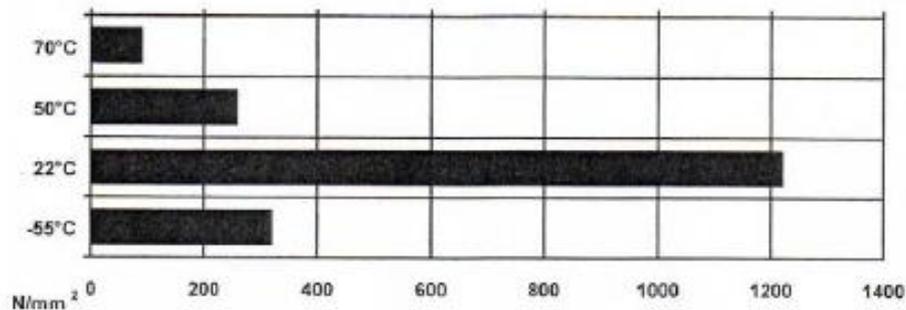
(cured 7 days at 23°C) C = 30 days exposure A = 90 days + drying for 16 hours at 60° B = 90 days exposure



### Honeycomb peel performance

(Cured 7 days at 23°C)

Tested in accordance with MIL-A-25463 using approx. 300g/m<sup>2</sup> of Araldite 420 per skin.



### Effects of alternative schedules on lap shear strength performance (LSS)

Test	Results		Test methods
	Cure cycle	Test temp (°C)	
70°C for 1 hour 2 hours 6 hours 16 hours 24 hours	22	37	A.E.C.M.A. EN2243-1
	70	4	
	70	6	
	70	11	
	70	10	
	70	8	
120°C for 1 hour	22	43	A.E.C.M.A. EN2243-1
	50	29	
	70	10	

#### STORAGE

Araldite 420 A/B may be stored for up to 36 months at 2 – 40°C, provided that the components are stored in their original sealed containers. The expiry date is indicated on the label.

---

#### HANDLING SAFETY

These 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.

For further information refer to Material Safety Data Sheet.

---

#### FURTHER INFORMATION

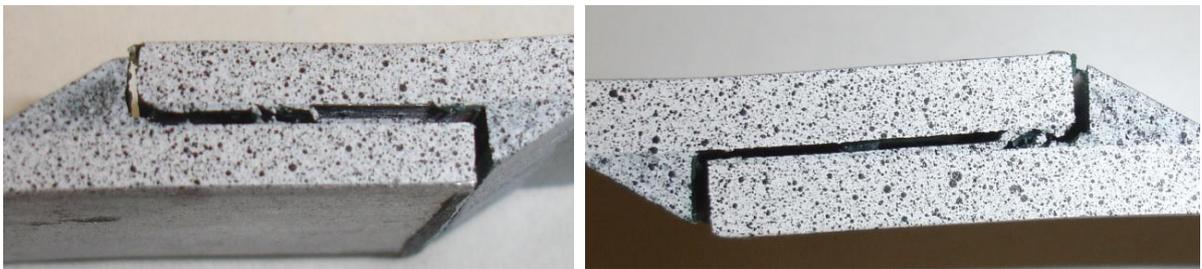
Please contact Amber Composites for additional information.

This is not a specification. The information given in this data sheet in relation to the performance, storage and other characteristics of the product is based on results gained from experience and tests and is believed to be accurate. Given, however, that conditions of use and storage will vary, Amber Composites will not be liable for any loss or damage resulting from reliance upon such information. The purchaser is recommended to carry out his own tests to establish the suitability of the product for its particular purpose. The use of the product in certain processes may require third party consent.

## APÊNDICE A - SEQUÊNCIA DE ROTURA

(Capítulo 4.2)

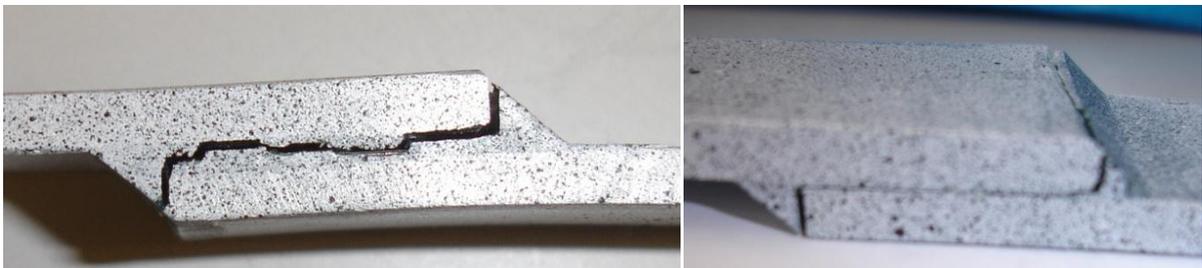
Provetes com ângulo de *taper* produzido diretamente no adesivo:



(a)

(b)

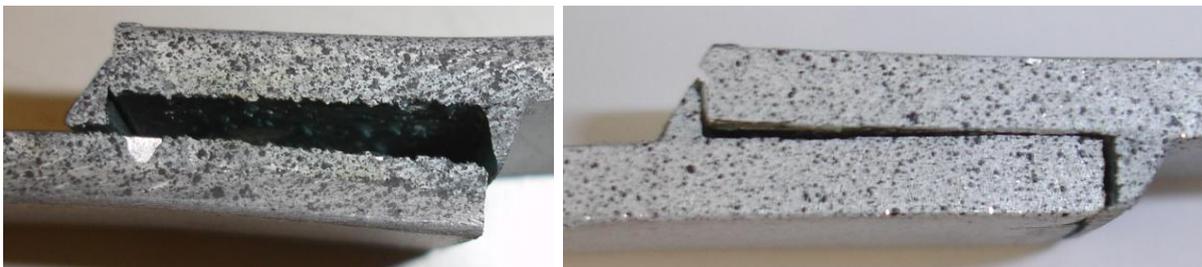
Provetes de 30°(a) Amostra 1 (b) Amostra 2.



(a)

(b)

Provetes de 45°(a) Amostra 1 (b) Amostra 3.

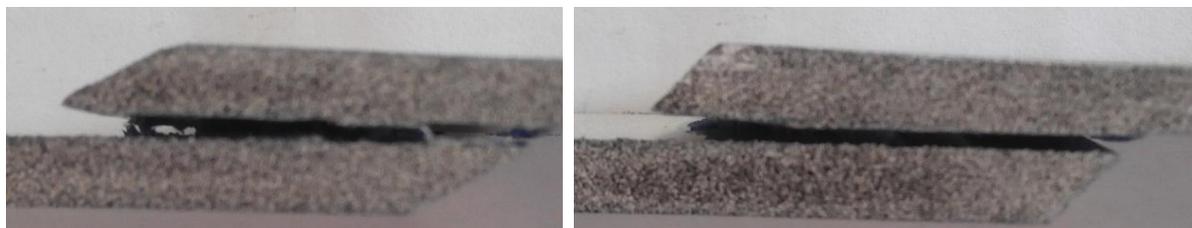


(a)

(b)

Provetes de 60°(a) Amostra 1 (b) Amostra 3.

Provetes com ângulo de *taper* produzido diretamente no alumínio:



(a)

(b)

Provetes (a) 30°, amostra 1 (b) 45°, amostra 2.



Provete de 60°, amostra 1.



(a)



(b)

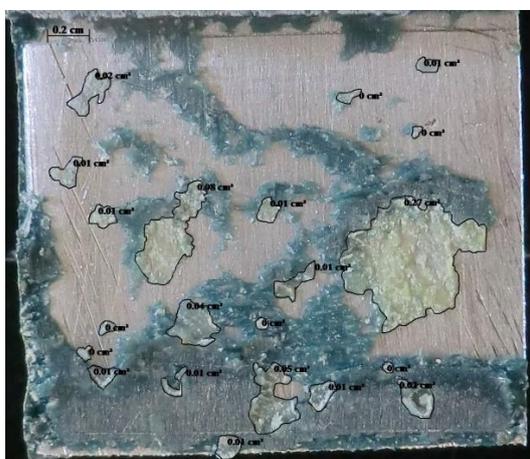
Provetes (a) 0°, amostra 1 (b) 0'', amostra 2.

A designação de 0'' corresponde aos provetes de 0° cuja sobreposição foi aumentada relativamente aos primeiros.

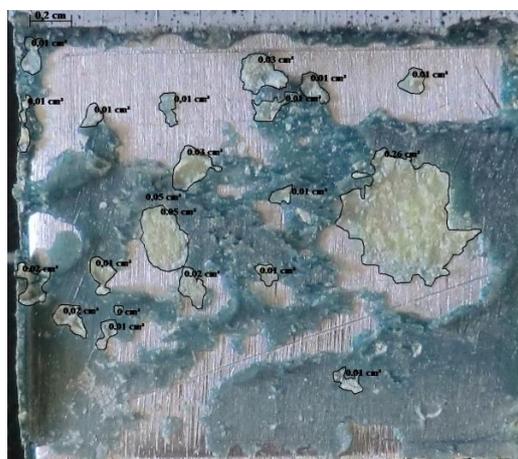
## APÊNDICE B - CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DE FRATURA DE FRATURA

(Capítulo 4.3)

Provetes com ângulo de *taper* no adesivo:



(a)



(b)

Provete de 30°(a) Placa 1 (b) Placa 2.



(a)



(b)

Provete de 30°(a) Placa 1 (b) Placa 2.



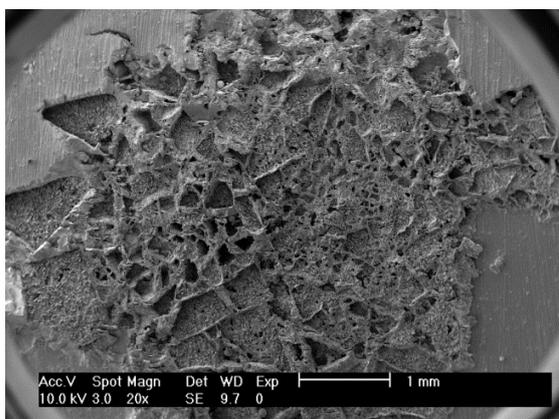




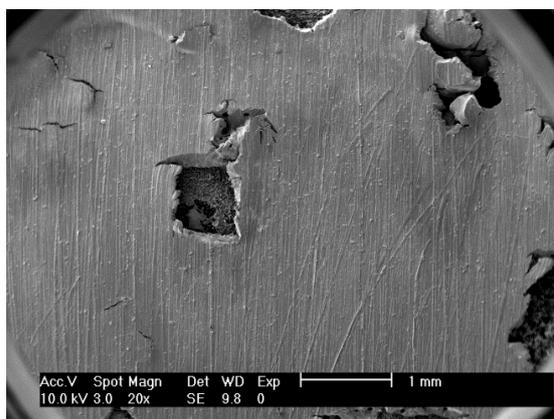
## APÊNDICE C - ASPETO FRATOGRÁFICO

(Capítulo 4.4)

Amostras preparadas com 30°, 45° e 60°

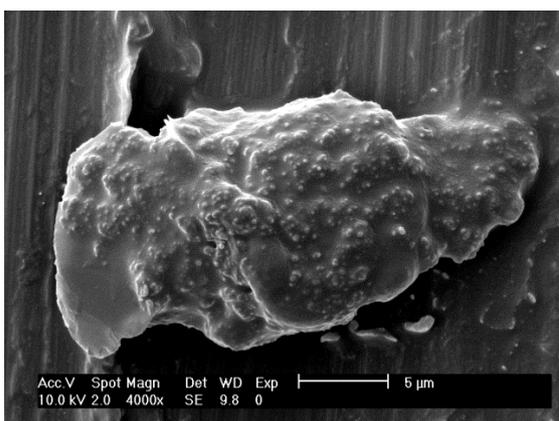


(a)

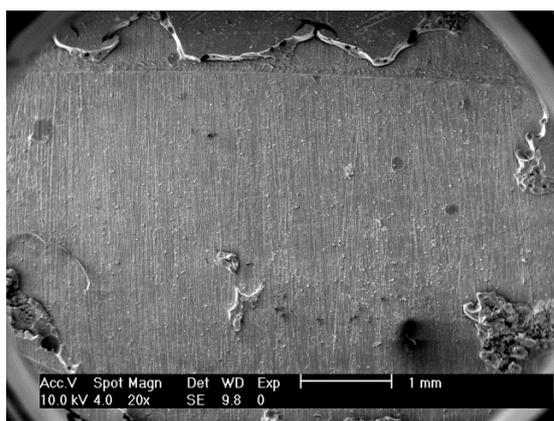


(b)

Provete de 30°, ampliação de 20x (a) Rotura por coesão (b) Rotura por adesão.

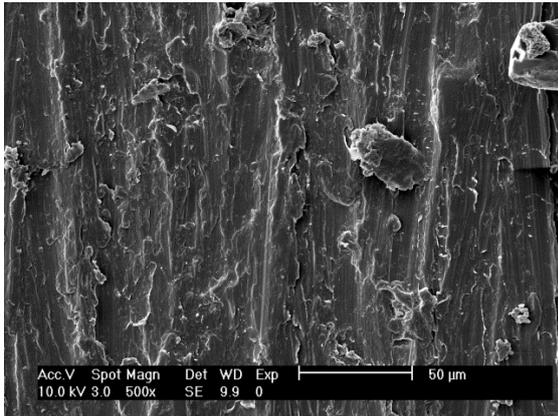


(a)

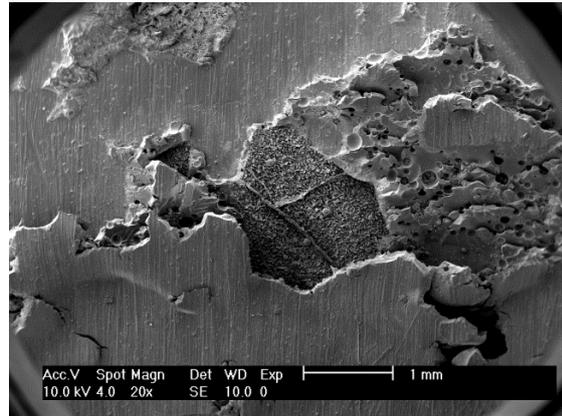


(b)

Provete de 30°(a) Ampliação 4000x, grumo de adesivo (b) Ampliação 20x, substrato (alumínio).

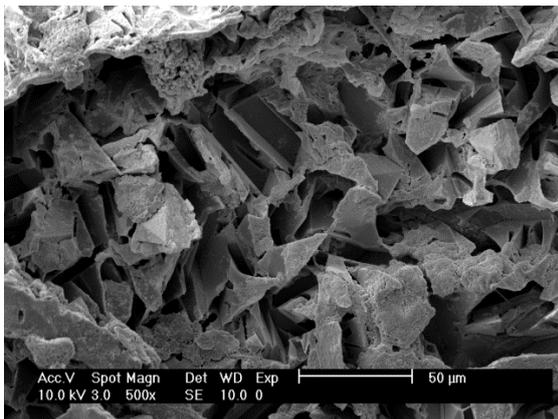


(a)

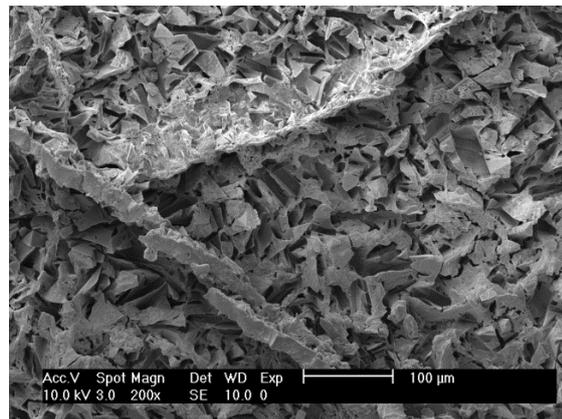


(b)

Provete de 30°(a) Ampliação 500x, substrato (alumínio) (b) Ampliação 20x, diferentes zonas de rotura.

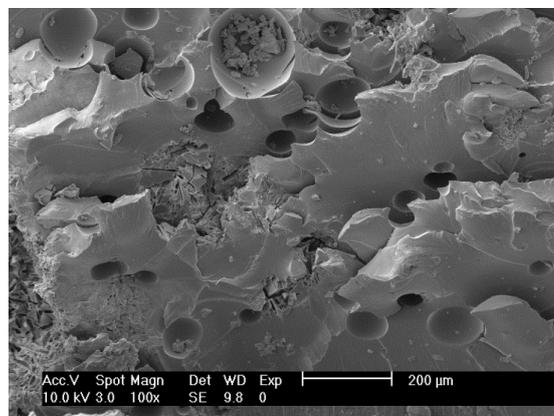


(a)

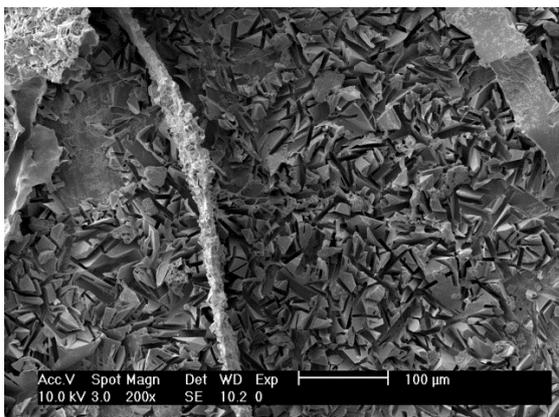


(b)

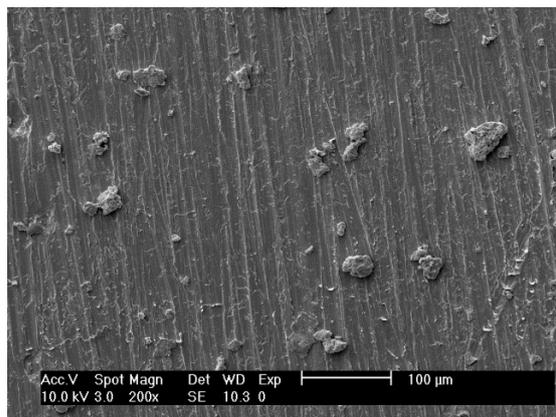
Provete de 30°, rotura por coesão (a) Ampliação 500x (b) Ampliação 200x.



Provete de 30°, ampliação de 100x.

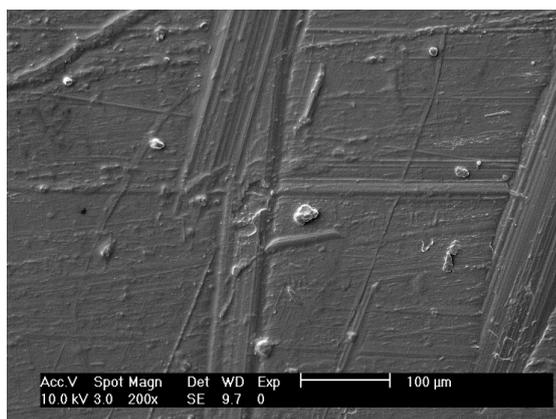


(a)



(b)

Provete de 45°, ampliação de 200x (a) Rotura por coesão (b) Rotura por adesão.



Provete de 60°, ampliação de 200x, substrato (alumínio).

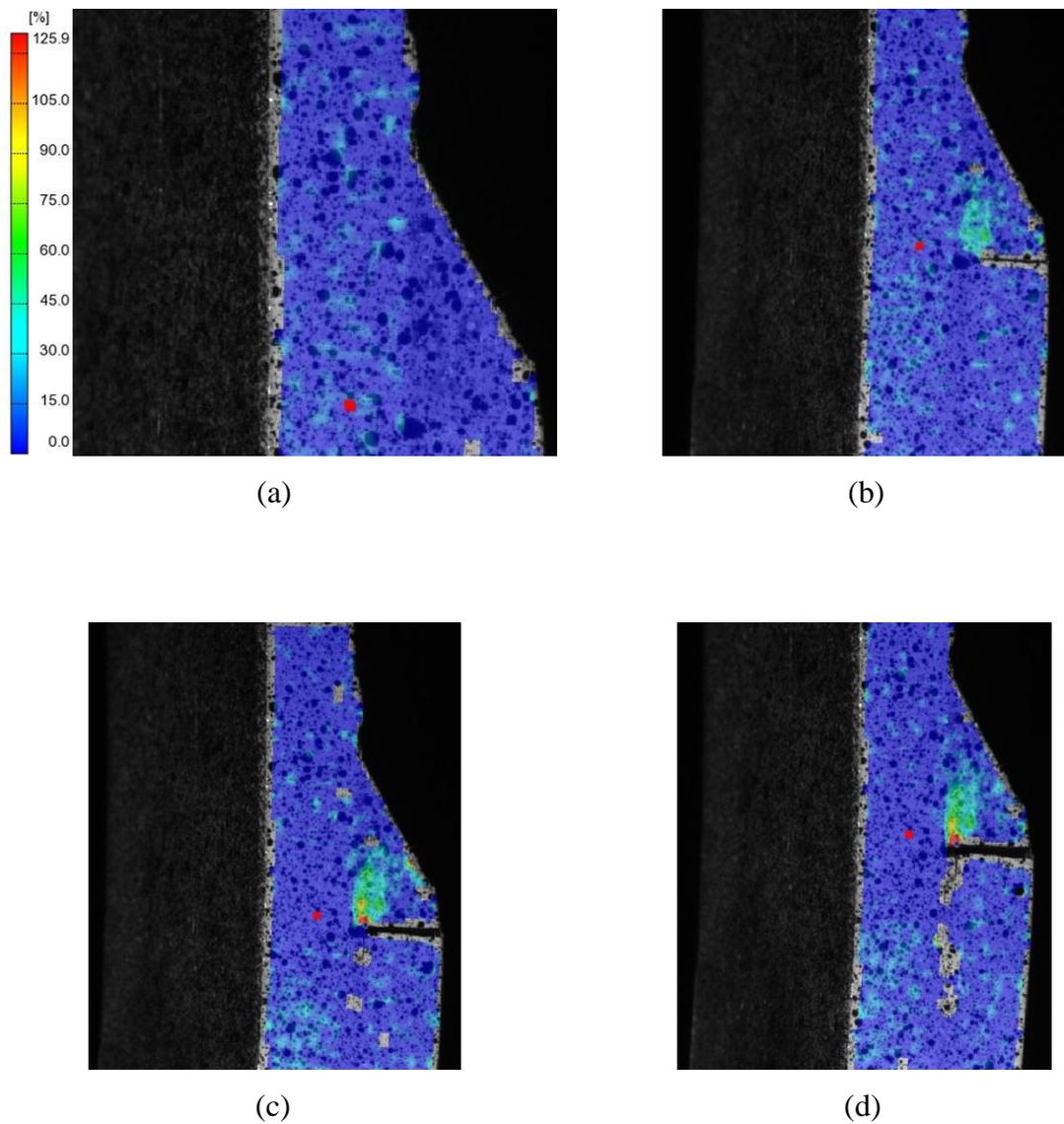


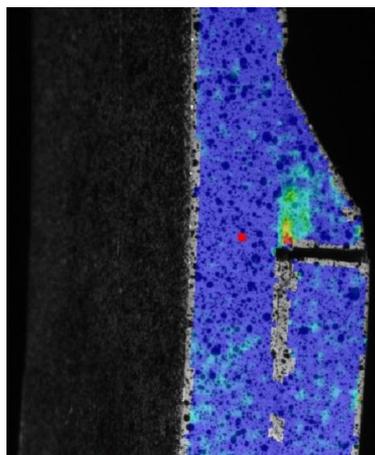
## APÊNDICE D - IMAGENS DAS DEFORMAÇÕES LOCAIS

(Capítulo 4.5.1)

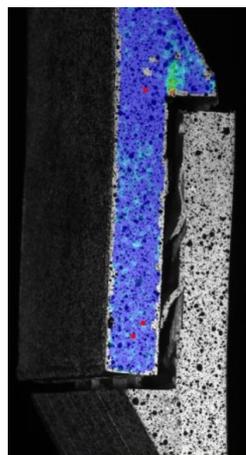
Provetes com ângulo de *taper* no adesivo:

Provete de 30°:





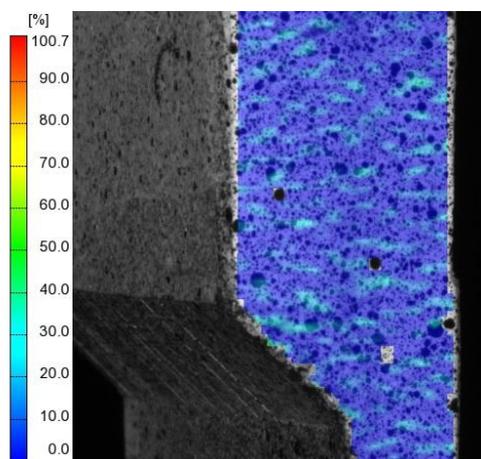
(e)



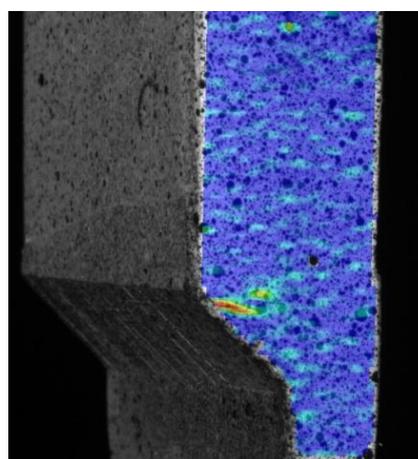
(f)

Provete de 30°, adesivo (a) Estágio 23 (b) Estágio 37 (c) Estágio 42 (d) Estágio 45 (e) Estágio 46 (f) Estágio 47.

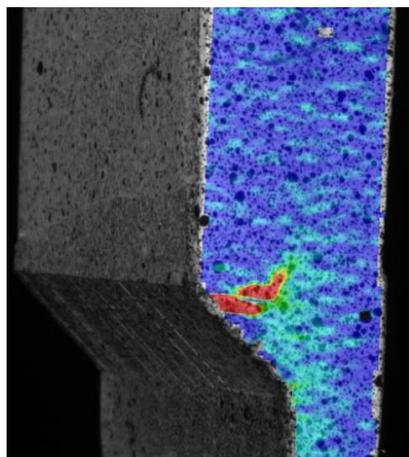
Provete de 45°:



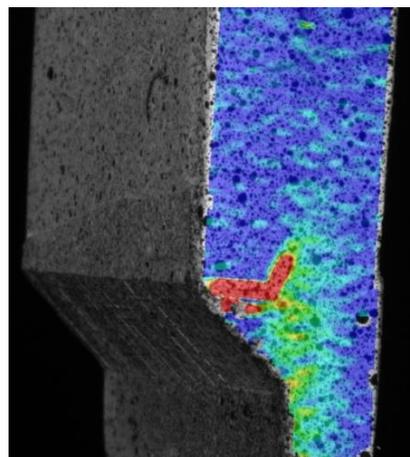
(a)



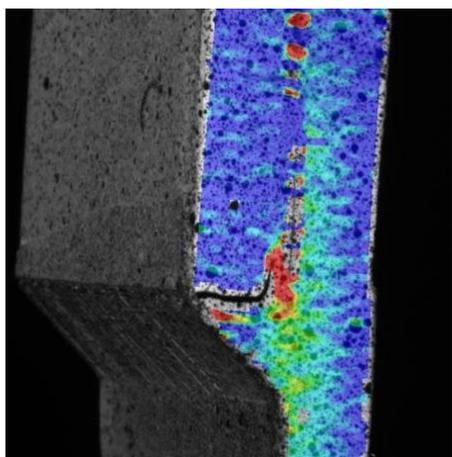
(b)



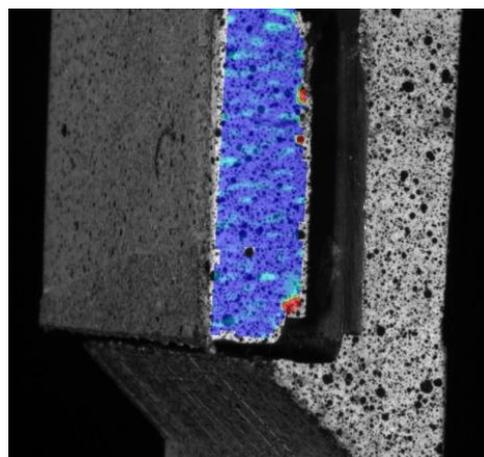
(c)



(d)



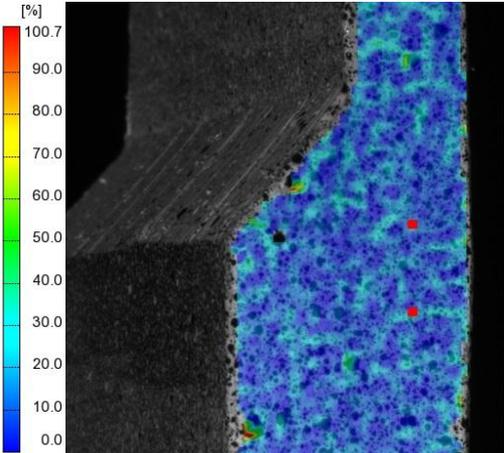
(e)



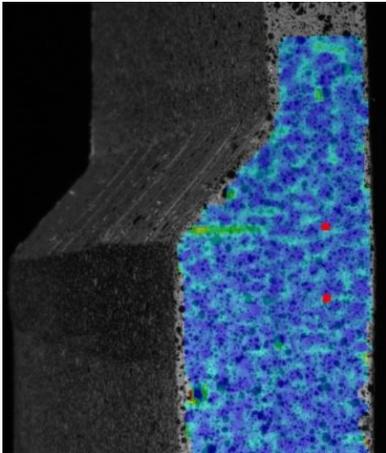
(f)

Provete de 45°, adesivo (a) Estágio 1 (b) Estágio 15 (c) Estágio 35 (d) Estágio 43 (e) Estágio 45 (f) Estágio 46.

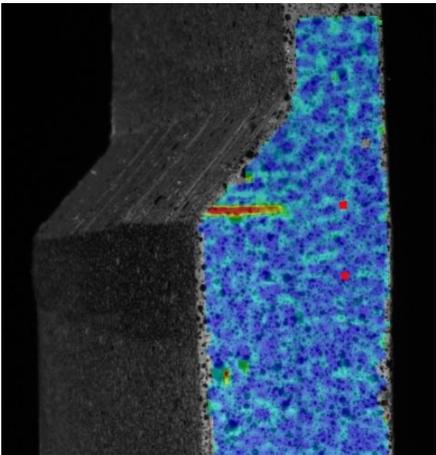
Provete de 45°:



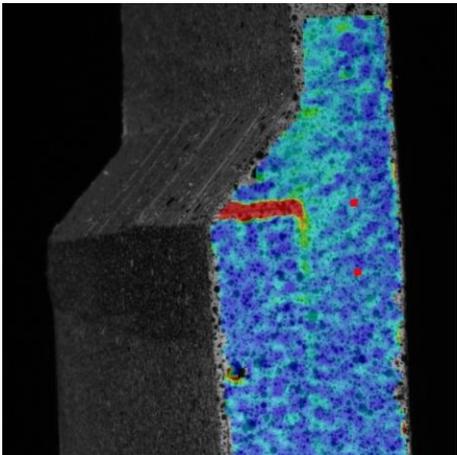
(a)



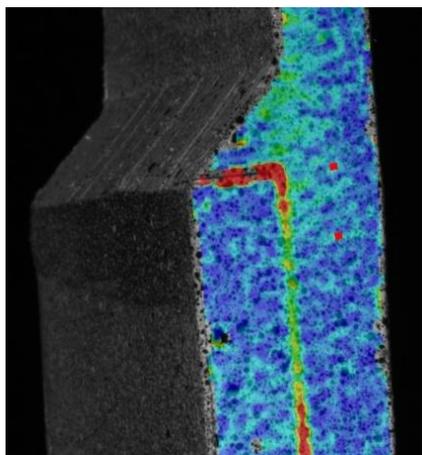
(b)



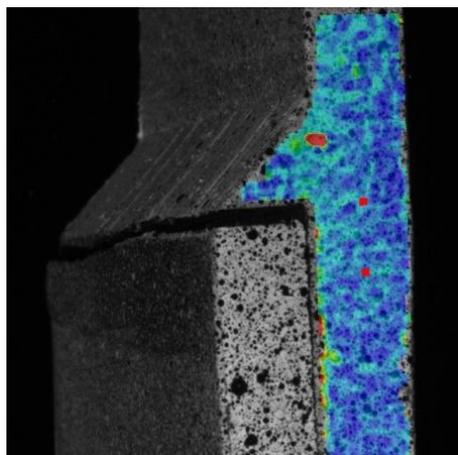
(c)



(d)



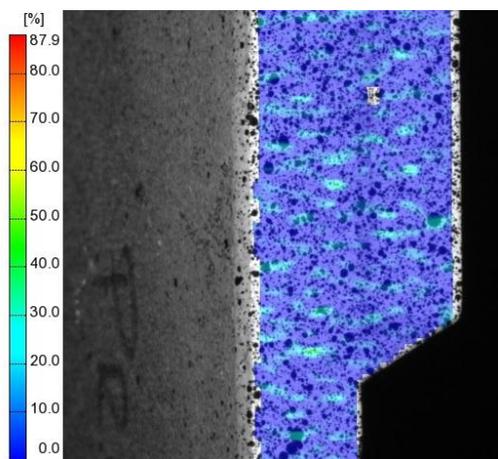
(e)



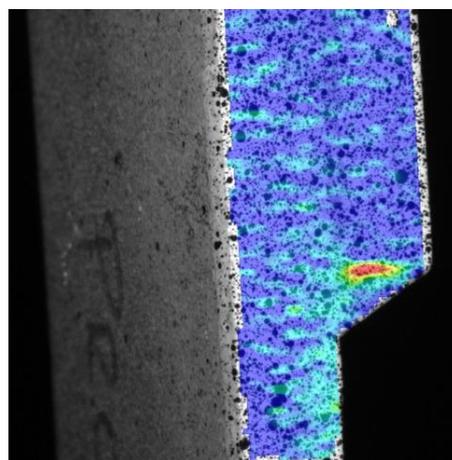
(f)

Provete de 45°, adesivo (a) Estágio 1 (b) Estágio 10 (c) Estágio 17 (d) Estágio 34 (e) Estágio 36 (f) Estágio 38.

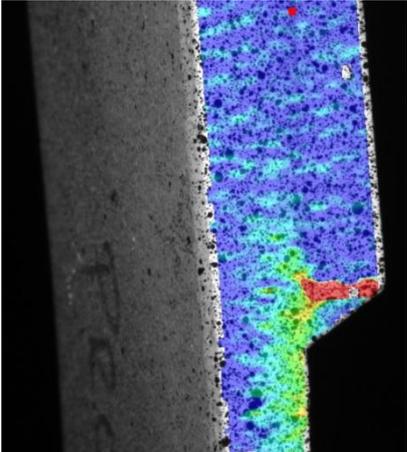
Provete de 60°:



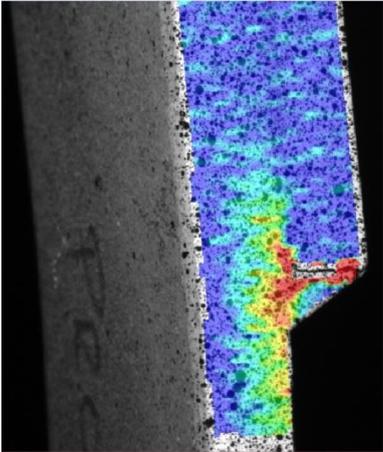
(a)



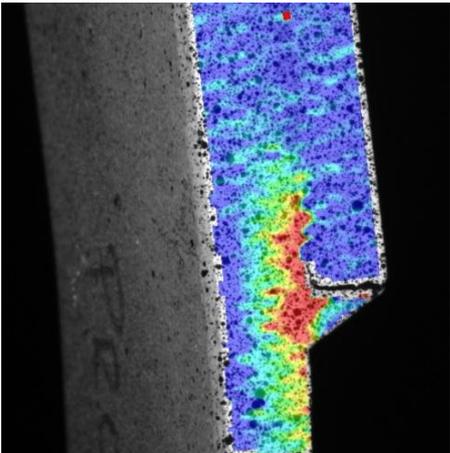
(b)



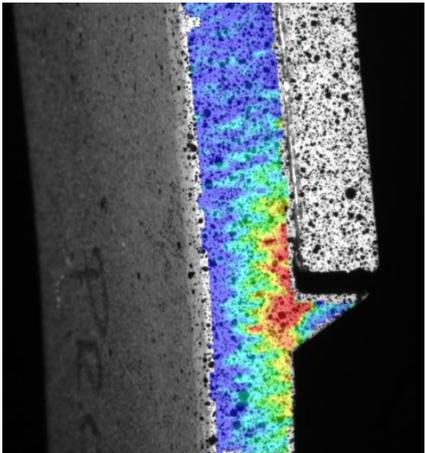
(c)



(d)



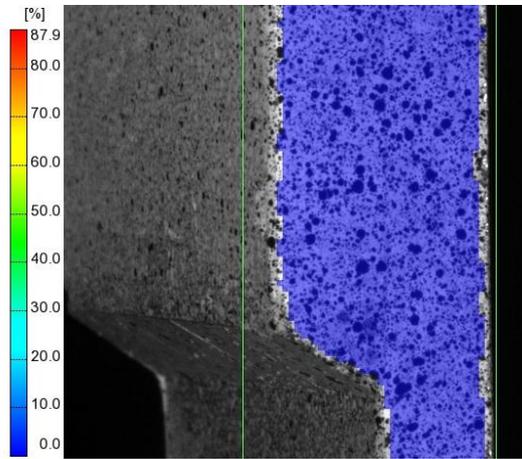
(e)



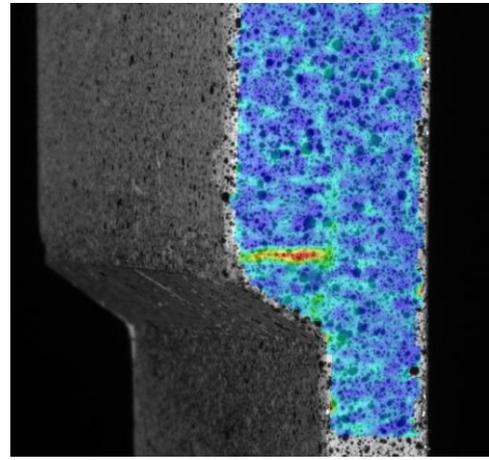
(f)

Provete de 60°, adesivo (a) Estágio 1 (b) Estágio 19 (c) Estágio 23 (d) Estágio 25 (e) Estágio 27 (f) Estágio 30.

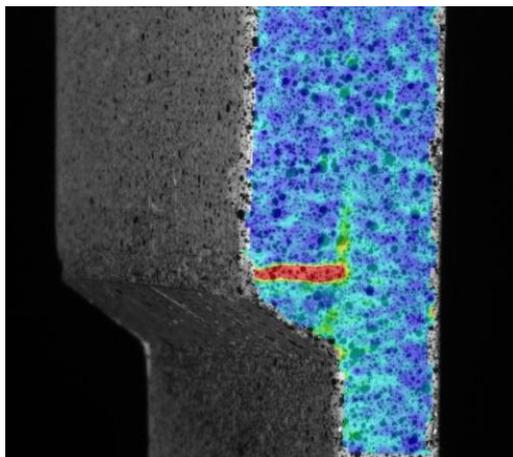
Provete de 60°:



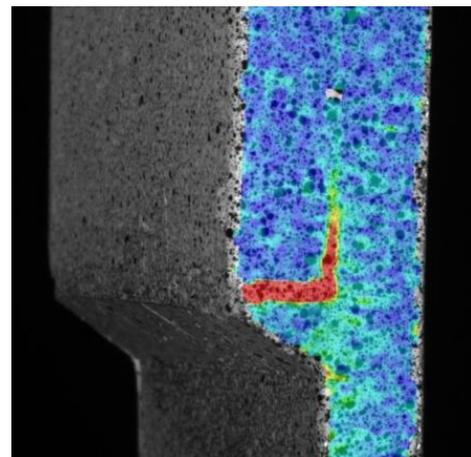
(a)



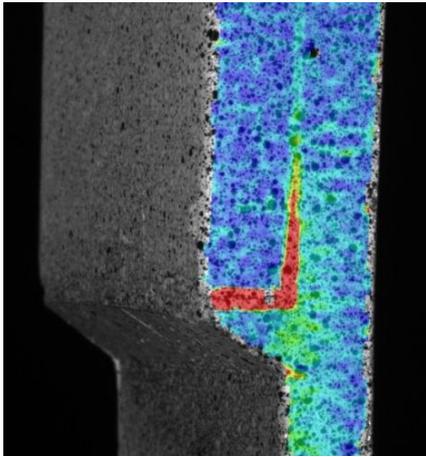
(b)



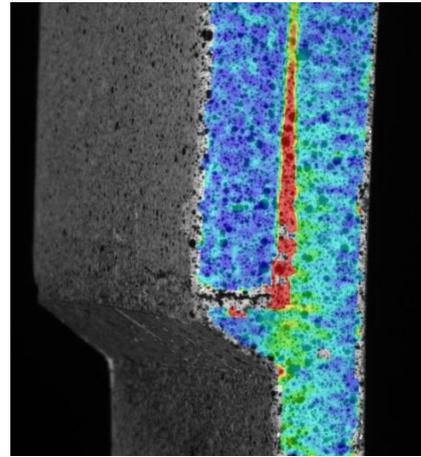
(c)



(d)



(e)

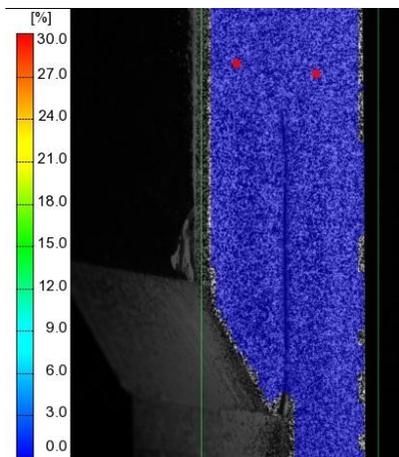


(f)

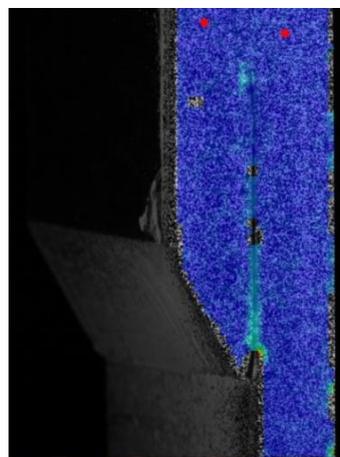
Provete de 60°, adesivo (a) Estágio 0 (b) Estágio 27 (c) Estágio 35 (d) Estágio 40 (e) Estágio 45 (f) Estágio 49.

Provetes com ângulo de *taper* no alumínio:

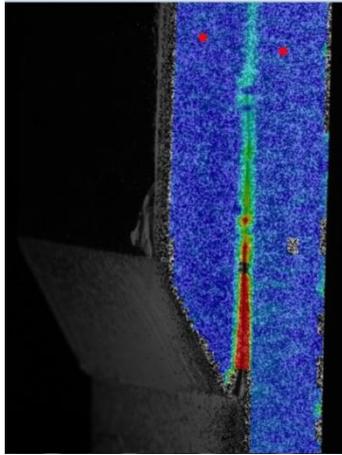
Provete de 30°:



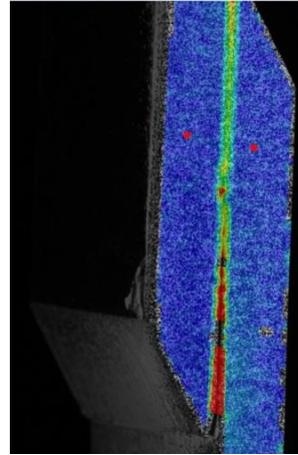
(a)



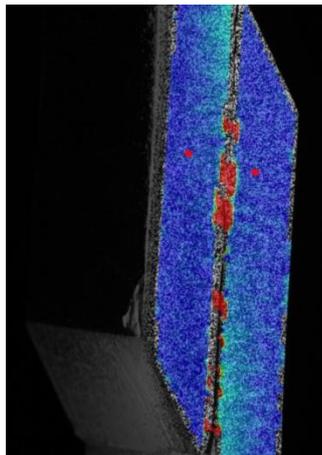
(b)



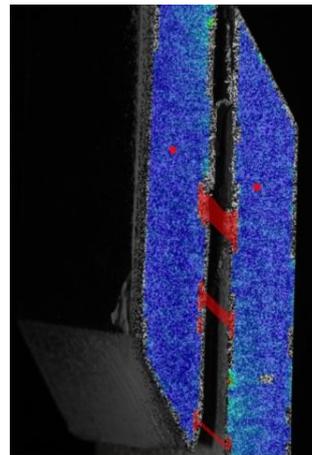
(c)



(d)



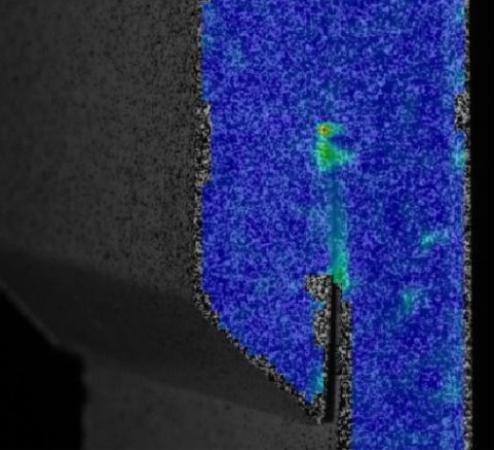
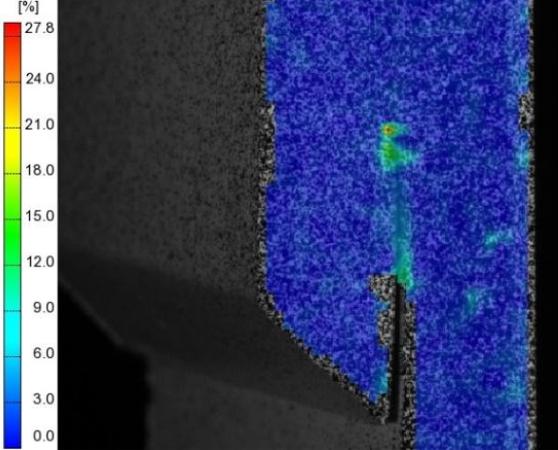
(e)



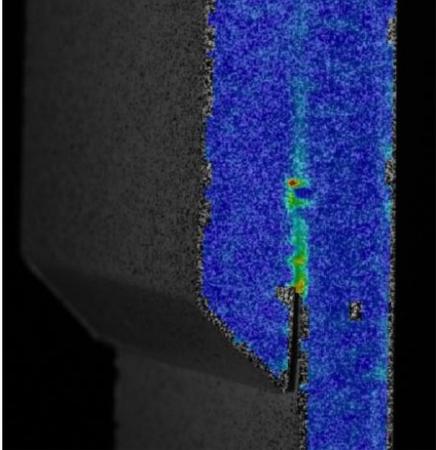
(f)

Provete de 30°, alumínio (a) Estágio 0 (b) Estágio 2 (c) Estágio 38 (d) Estágio 46 (e) Estágio 56 (f) Estágio 57.

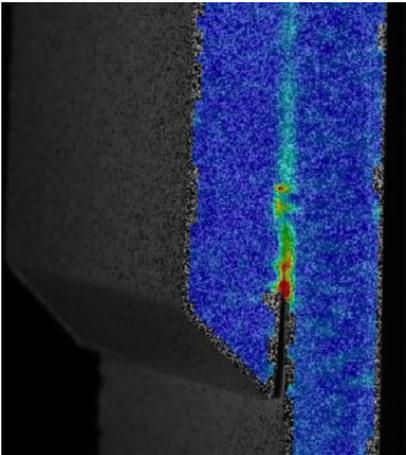
Provete de 45°:



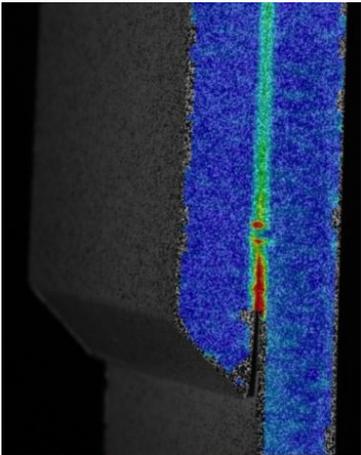
(a)



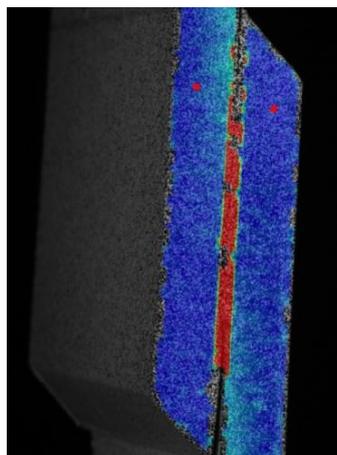
(b)



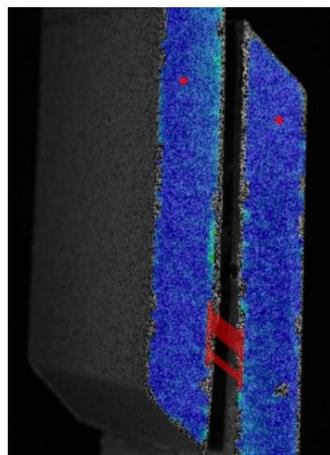
(c)



(d)



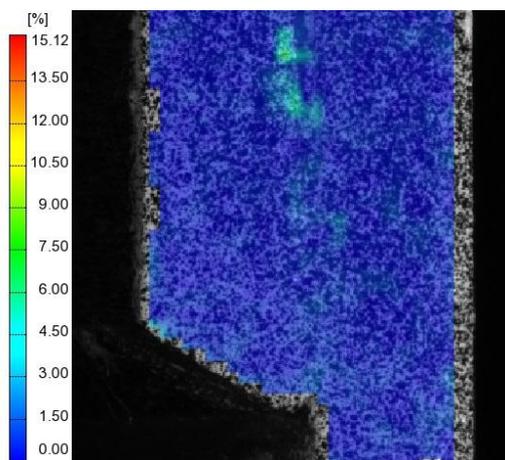
(e)



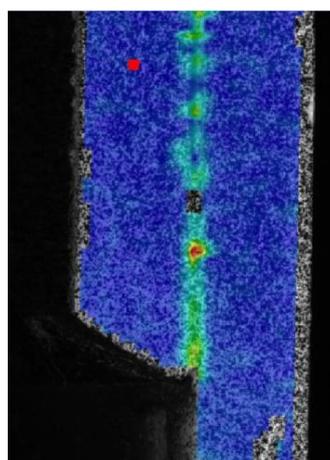
(f)

Provete de 45°, alumínio (a) Estágio 1 (b) Estágio 17 (c) Estágio 26 (d) Estágio 34 (e) Estágio 43 (f) Estágio 47.

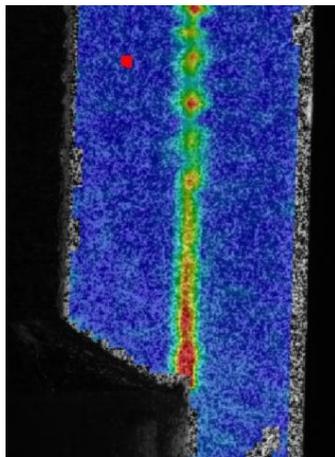
Provete de 60°:



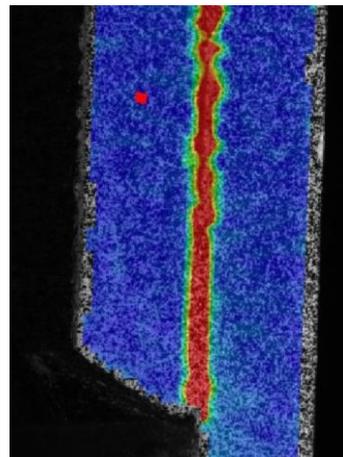
(a)



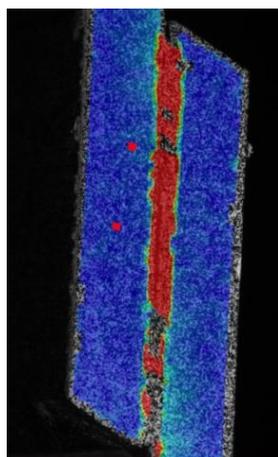
(b)



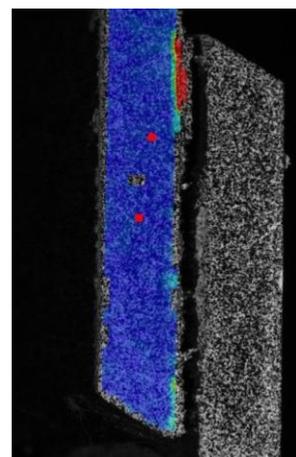
(c)



(d)



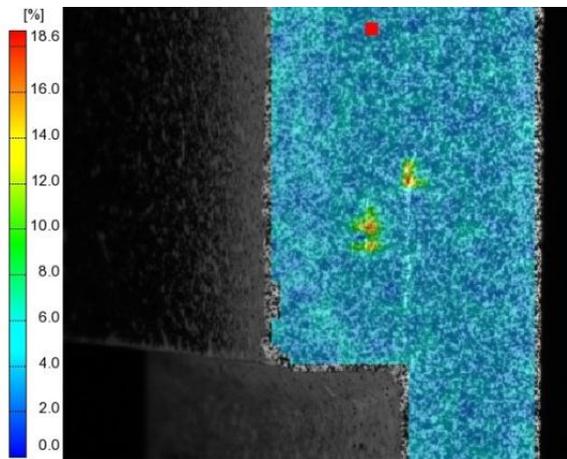
(e)



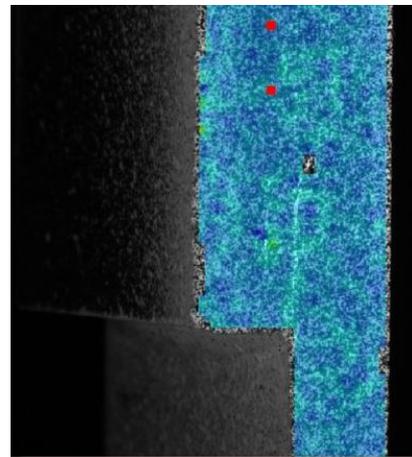
(f)

Provete de 60°, alumínio (a) Estágio 1 (b) Estágio 20 (c) Estágio 28 (d) Estágio 33 (e) Estágio 44 (f) Estágio 45.

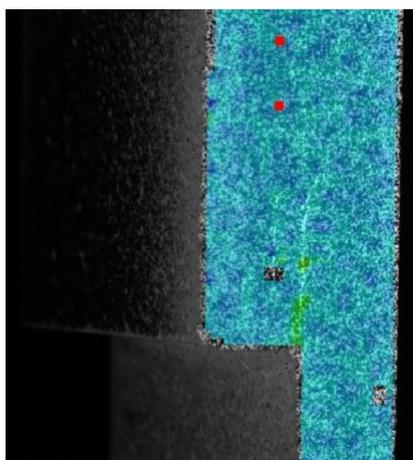
Provete de 0°:



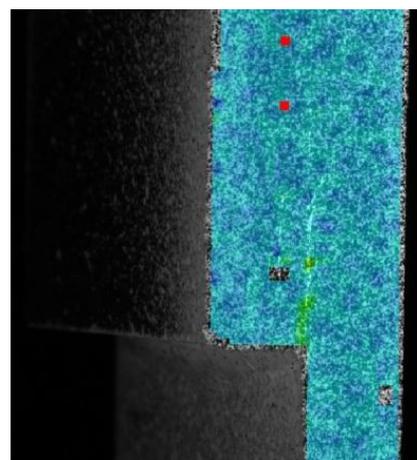
(a)



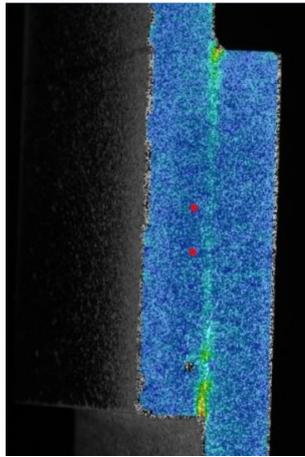
(b)



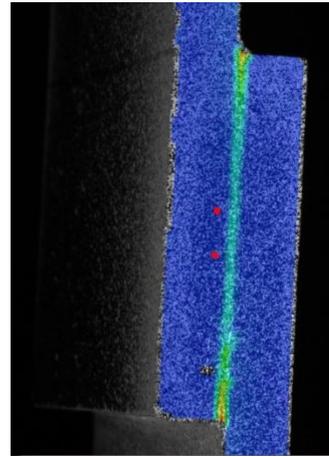
(c)



(d)



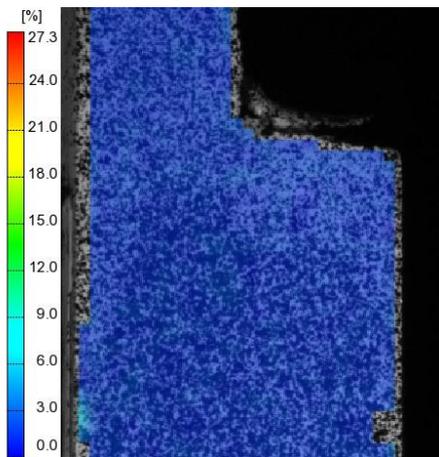
(e)



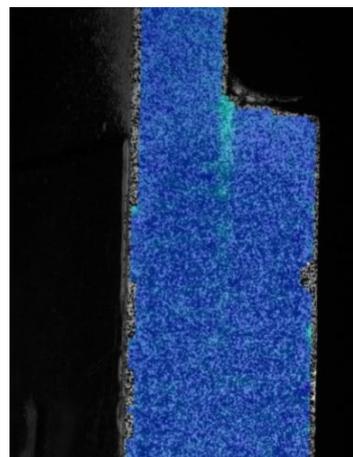
(f)

Provete de 0°, alumínio (a) Estágio 1 (b) Estágio 10 (c) Estágio 18 (d) Estágio 26 (e) Estágio 36 (f) Estágio 45.

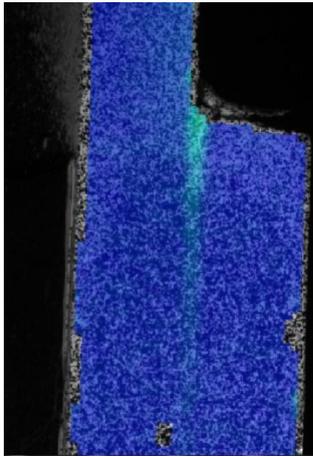
Provete de 0°:



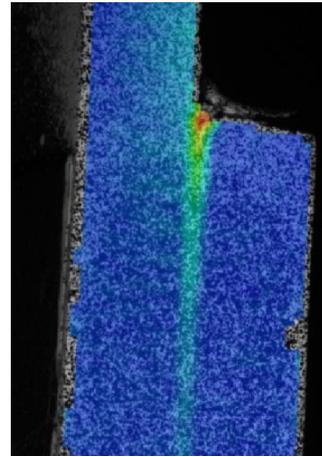
(a)



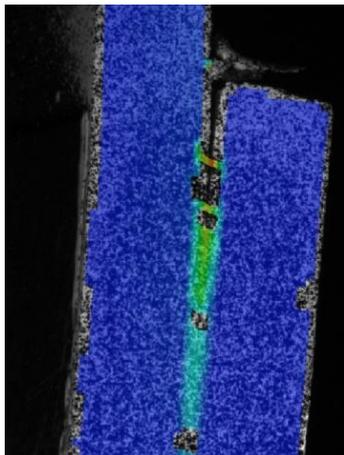
(b)



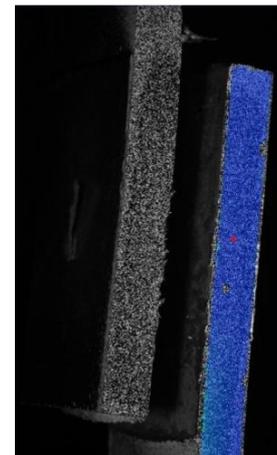
(c)



(d)



(e)



(f)

Provete de 0° (a) Estágio 10 (b) Estágio 32 (c) Estágio 43 (d) Estágio 53 (e) Estágio 65 (f) Estágio 67.