

---

**DEMec – SMPT  
MIEM – PFII**  
**Processos de ligação de metais**  
**Juntas adesivas estruturais**

**Lucas F M da Silva**

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**  
Departamento de Engenharia Mecânica

---

*Conteúdo*

- Introdução
- Teoria da adesão
- Selecção do adesivo
- Projecto da junta
- Preparação da superfície
- Fabrico da junta
- Controlo do processo

## Indústria aeronáutica de Bruyne (1957)

- Termoendurecíveis modificados (vinilo/fenólico) mais tenazes



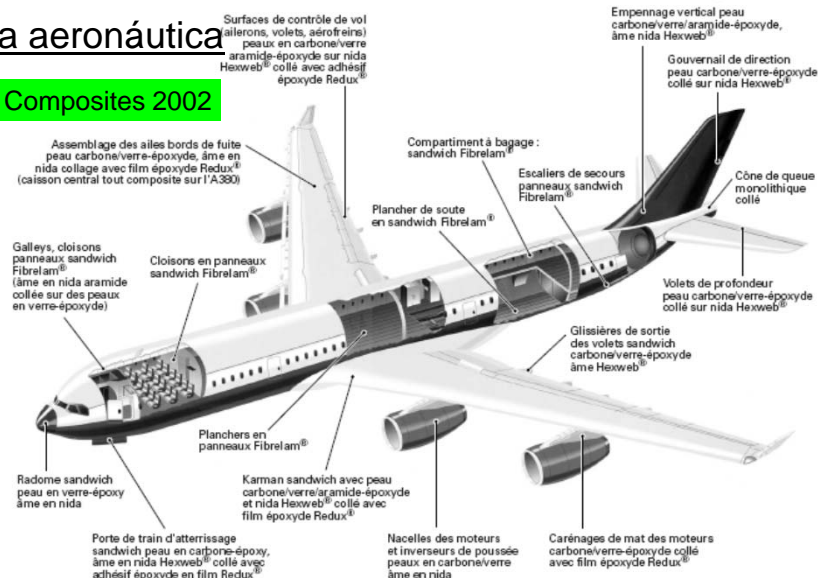
Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

3

## Indústria aeronáutica

Hexcel Composites 2002



Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

4

O adesivos são a melhor maneira de ligar compósitos. Os outros métodos (rebites, parafusos) introduzem muitas concentrações de tensões, o adesivo não: causa uma distribuição de tensão muito mais uniforme. Compósito e adesivo estão casados. ^^

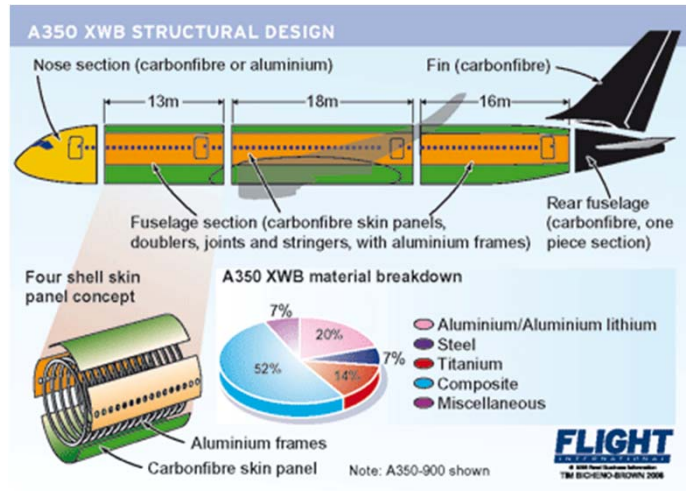
Fenólico - mto frágil. Dps da 2ª G.M. mudou-se fenólico para vinil? qe aumentou a propriedades de tenacidade e a partir dai começou a ser usado para ligar metais.

## Introdução – Aplicações



**FEUP**  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

### Indústria aeronáutica



Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

5

Epóxi muito usado

## Introdução – Aplicações



**FEUP**  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

### Indústria aeroespacial

Désagulier (2011)



Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

6

## Introdução – Aplicações

### Indústria automóvel

- Lotus: chassis de alumínio 6000 colado com epóxico

Lotus



Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFI – Juntas adesivas estruturais

7

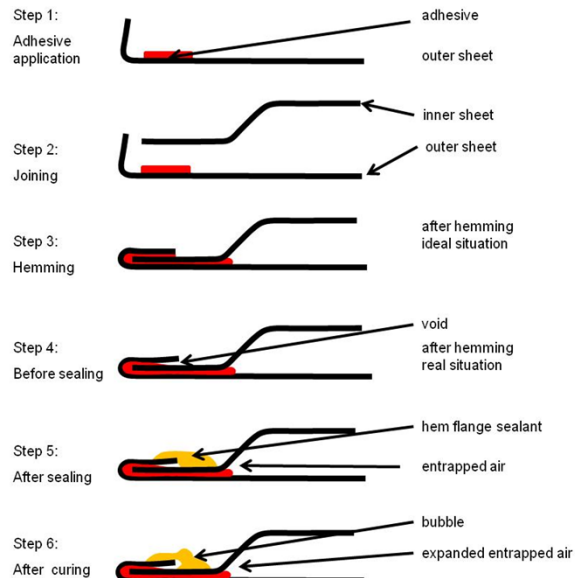
## Introdução – Aplicações

### Indústria automóvel

#### Body shop

#### Hem flange bonding

Burchardt (2011)



Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFI – Juntas adesivas estruturais

8

Especialmente nos automóveis de luxo que usam materiais avançados.

Parte estrutural:  
Ligação da parte interna à externa das portas;  
O capô qe tem 2 partes, são coladas;  
Pára-brisas.  
Parte não estrutural:  
-cabos, plásticos,...

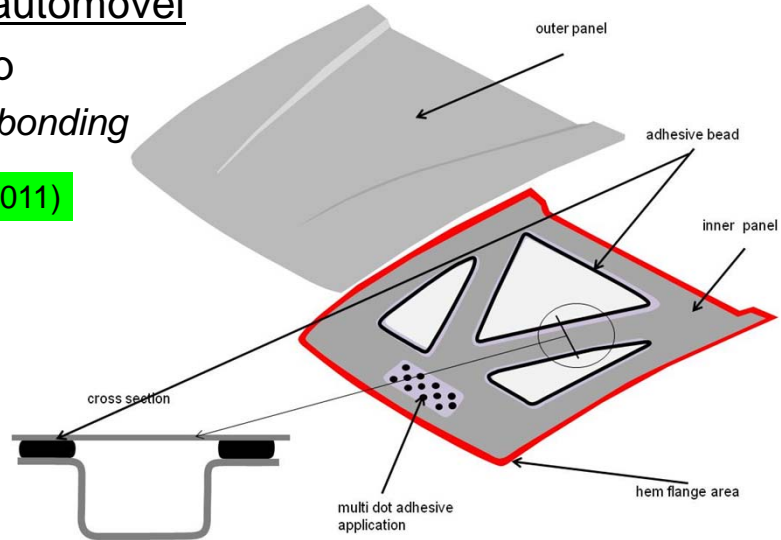
## Introdução – Aplicações

### Indústria automóvel

Body shop

*Anti-flutter bonding*

Burchardt (2011)



## Introdução – Aplicações

### Indústria automóvel

Linha de montagem, *Direct glazing*

Sika

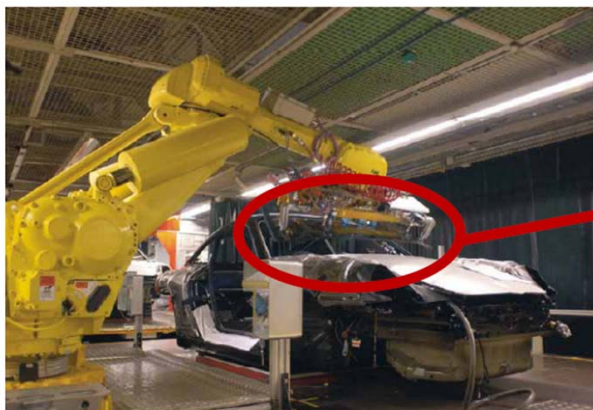
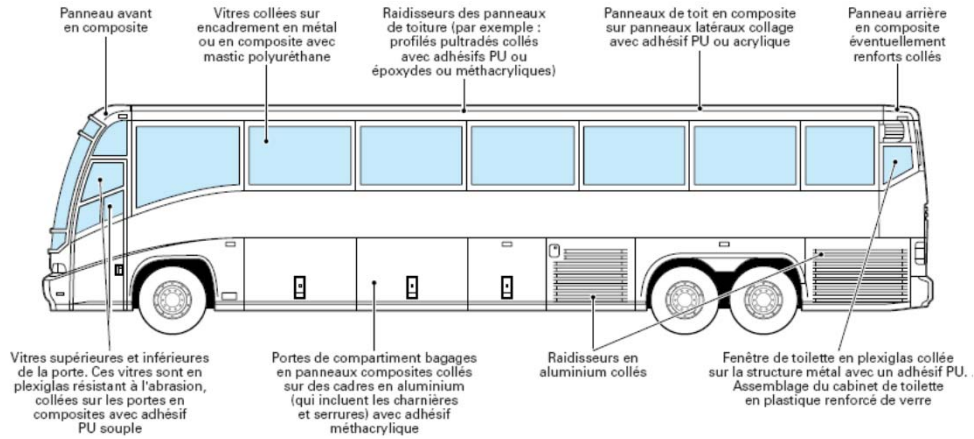


Fig. B

## Autocarros

- Partes laterais e tejadilho
- Poliuretano

Motor Coach Industry/ITW Plexus



Lucas da Silva

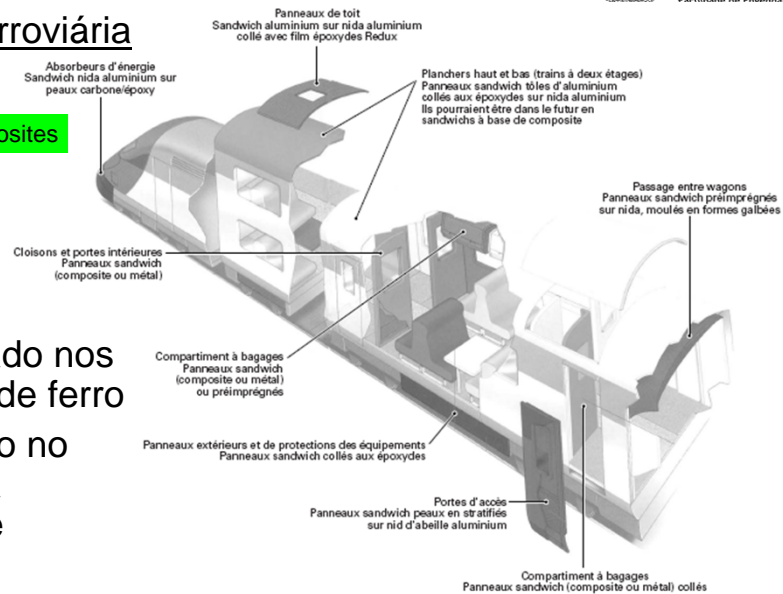
DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

11

## Indústria ferroviária

Hexcel composites

- Pouco usado nos caminhos de ferro
- Mais usado no metro, alta velocidade



Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

12

## Introdução – Aplicações

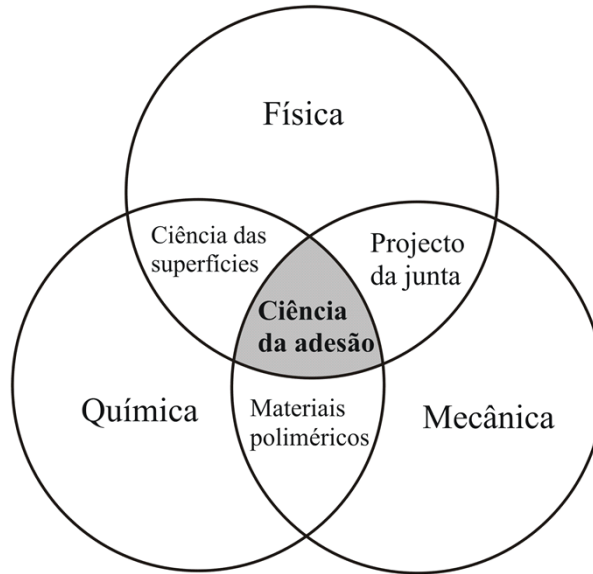
### Indústria naval



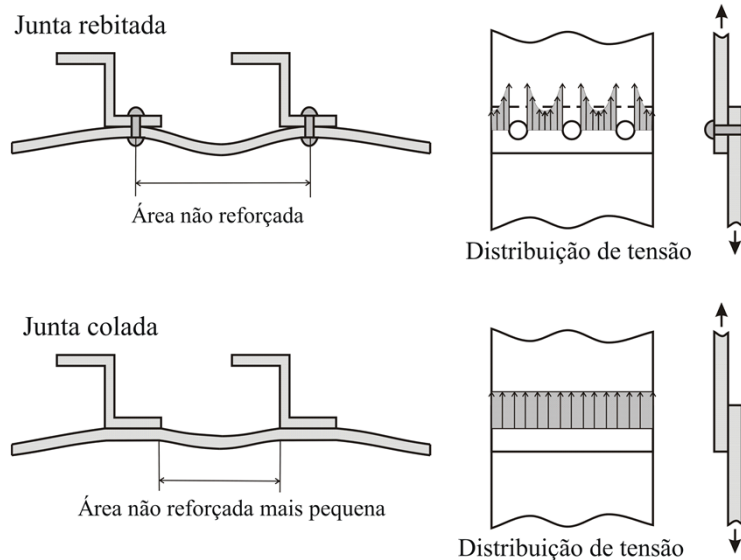
## Introdução – Aplicações

### Construção civil





• **Distribuição das tensões uniforme**



Concentradores de tensão é o local ideal para haver iniciação de fendas e a sua propagação por fagida.

Distribuição da tensão mais uniforme. Isto é verdade ao longo da largura, mas ao longo do comprimento de sobreposição ainda há algumas pequenas concentrações de tensões.

## Introdução – Vantagens

- **Distribuição das tensões uniforme** ⇒ maior resistência à fadiga
- **Amortece as vibrações** ⇒ permite que as tensões sejam absorvidas ou transferidas melhorando assim a **resistência à fadiga**

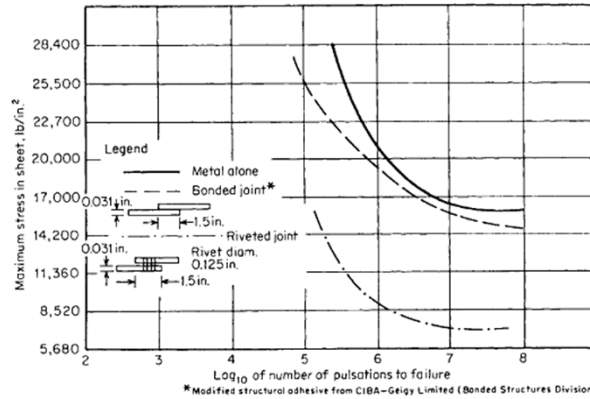


Figure 1.7 Fatigue strengths of aluminum-alloy specimens under pulsating tensile load.<sup>8</sup>

Powis (1968)

Curva de Whöler, S-N ou básica de fadiga.

## Introdução – Vantagens

- Liga **materiais diferentes** em composição, coeficientes de expansão (a flexibilidade do adesivo compensa a diferença)
- Liga **chapas** eficientemente
- Geralmente são o **método mais conveniente e efectivo** de ligar dois materiais, permitindo ser automatizado

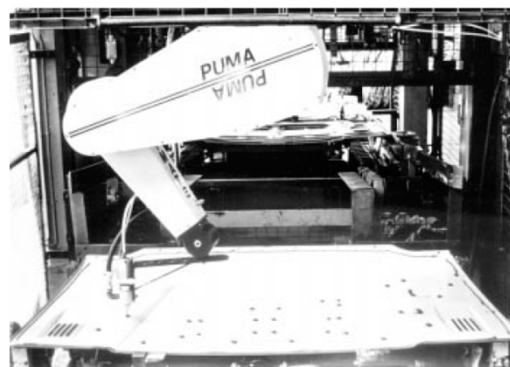
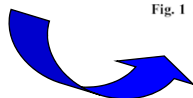


Fig. 1 Automatic and robotic application of adhesives is a fast expanding field and offers many advantages to general engineering industry. The photograph shows the robotic application of an adhesive in the assembly of components in a car production line



Se for para chapas a área resistente do adesivo é maior, até porque fica a trabalhar ao corte, e assim já aguenta mais.

## Introdução – Vantagens

- **Projecto mais flexível** → novos conceitos, materiais (e.g. estruturas em ninho de abelha)
- **Contornos regulares**, evita furos (rebites, parafusos) e marcas devidas à soldadura
- **Contacto contínuo** entre as superfícies ligadas
- Pode **reduzir os custos**; projectos envolvendo ligações com adesivos tendem a ser mais ligeiros e mais económicos

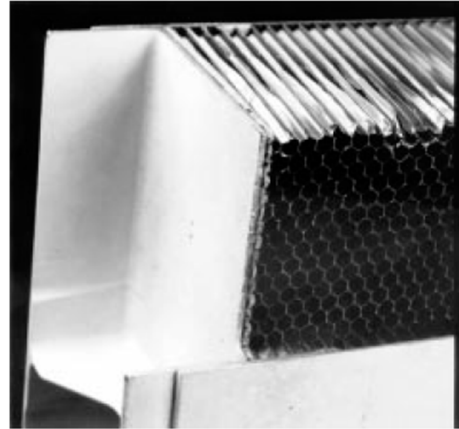


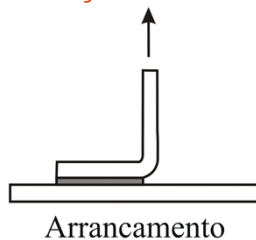
Fig. 3 A section of the rudder of Concorde which consists of an aluminium alloy core and skins which are adhesively bonded together. More recently there has been an increased use of non-metallic core and skin materials

Este material aqui foi inventado graças à ligação com adesivos.

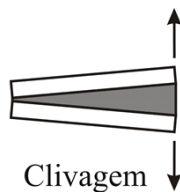
Melhor em termos de resistência à corrosão e amortecimento de vibrações.

## Introdução – Desvantagens

- É necessário um desenho da ligação que elimine ao máximo as **forças de arrancamento** (inimigo nº1), clivagem e impacto



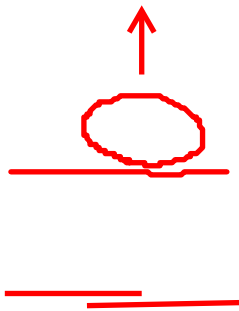
Quando um dos dois materiais não é rígido, a ligação pode estar sujeita a forças de **arrancamento**



Quando os dois materiais são rígidos, a ligação pode estar sujeita a forças de **clivagem**

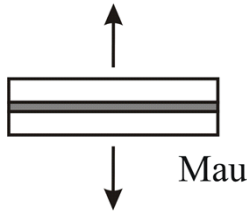
Quando se projeta uma junta é reduzir ao máximo os esforços de arrancamento e solicitar ao máximo o adesivo ao corte, e fazendo com q a area resistente seja a maior possível.

Exemplo da fita cola.



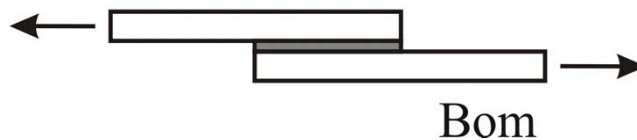
No caso de cima a cola é sujeita a arrancamento e parte pela cola. No segundo está a trabalhar ao corte e é o substrato (a fita cola) qe parte.

## Introdução – Desvantagens



**Evitar tensões localizadas**

**Melhor solução** → solicitar ao **corte**



Esta é, de longe (90%), a junta mais usadas quando se trata de ligar por adesivos pelas razões vistas nos slides antes.

- Há poucos adesivos que aguentam 200°C. enquanto que para um metal em geral são cócegas;  
- absorvem muita humidade, quando em contacto com a água piora as suas propriedades  
- quando se faz uma colagem ela não é instantanea. A aplicação do adesivo é sempre no estado líquido e portanto é preciso uma ferramenta de fixação para manter os substratos em posição até o adesivo endurecer.  
- é preciso limpar a superfície. outros procedimentos não precisam de preparação alguma

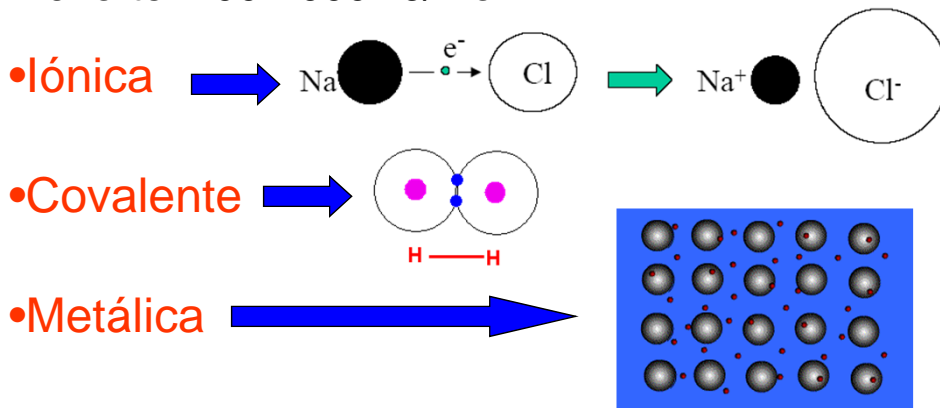
## Introdução – Desvantagens

- Tem limitada resistência a **condições extremas** tais como calor e humidade.
- A ligação não é normalmente realizada instantaneamente o que leva à utilização de **ferramentas de fixação** para manter as peças em posição ⇒ pode ser uma grande desvantagem económica.
- Para obter bons resultados é necessário uma cuidada **preparação das superfícies**; abrasão mecânica, desengorduramento com solvente, ataques químicos, primários, etc.
- Os adesivos são frequentemente **curados** a elevadas temperaturas (forno, prensa,...).
- **Controlo de qualidade** e segurança mais difíceis mas recente desenvolvimento de técnicas não destrutivas.
- Falta de um **critério de dimensionamento universal**.

- curadas = endurecidos.  
Alguns dias outras horas, mas todos passam por fase de endurecimento;  
- não há um critério que permita projetar uma junta qualquer. Há dezenas de tipos. Então um engenheiro vai ver como ligar, ve os criterios e assusta-se. passa para rebites e parafusos que são mais simples.

## Ligação primária

- e- são transferidos ou partilhados
- é forte: 100-1000 kJ/mol

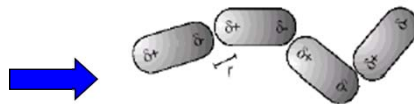


## Ligação secundária

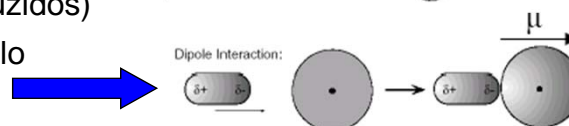
- não há e- transferidos ou partilhados
- interacção de dipolos atómicos/moleculares
- é fraca < 100 kJ/mol

### • van der Waals

- Forças de London ou de dispersão (dipolos induzidos)

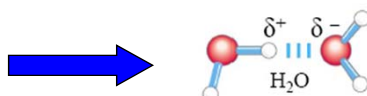


- Forças de Debye (dipolo permanente e dipolo induzido)



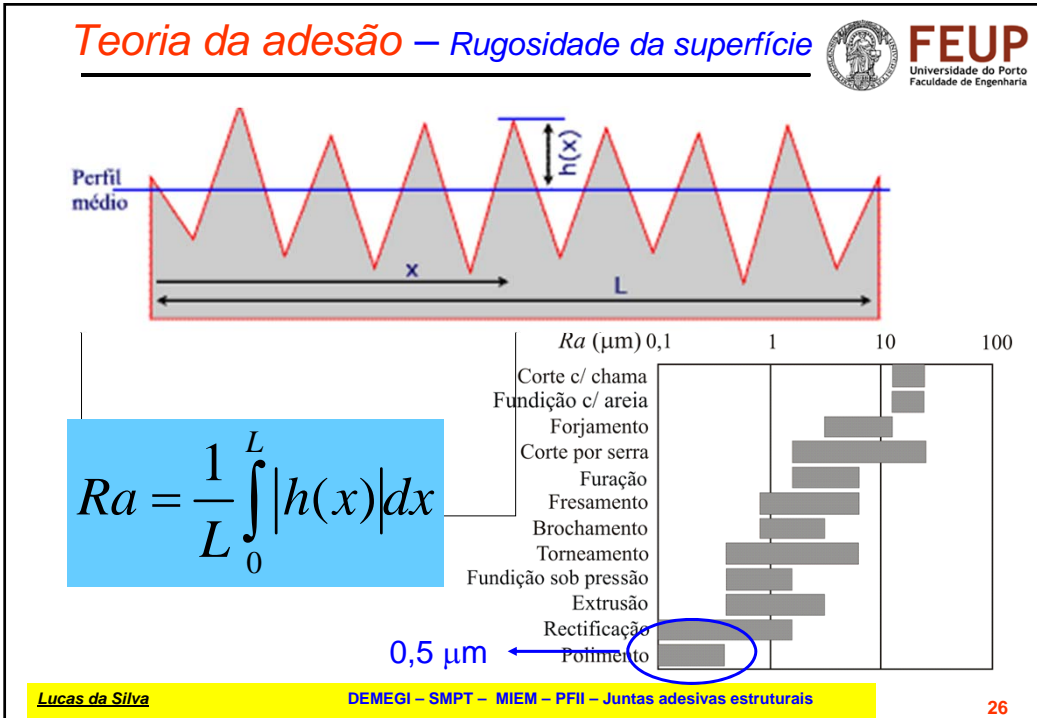
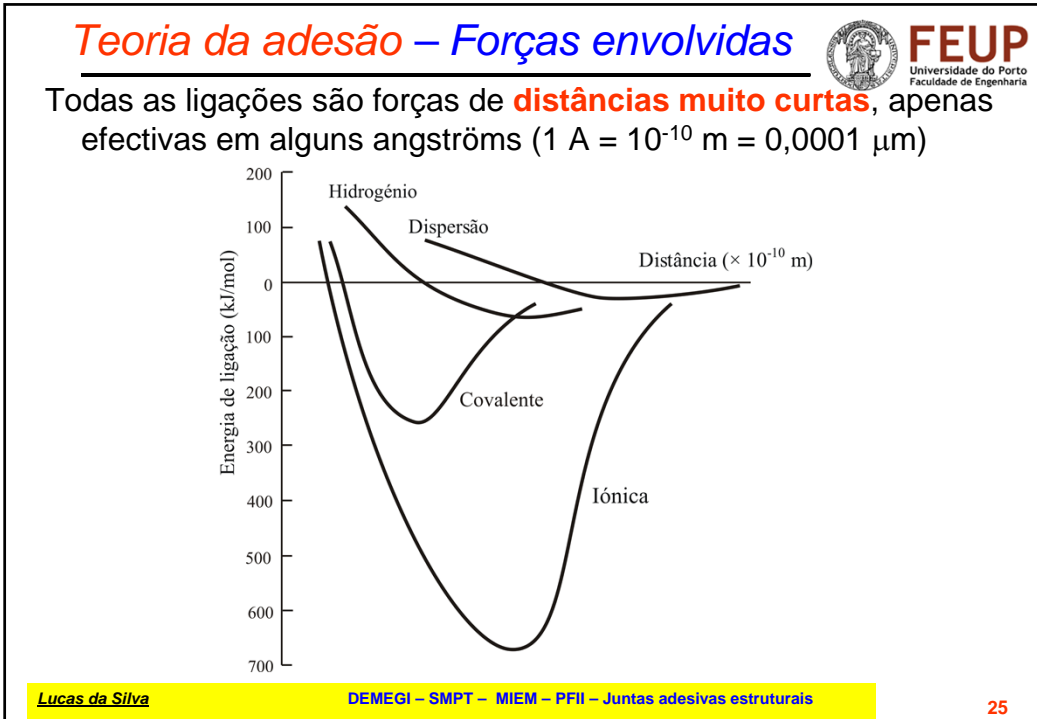
- Forças de Keesom (dipolos permanentes)

### • Hidrogénio



Só em casos muito particulares é que se ve este tipo de ligação nos adesivos. Em geral é de Wan der Waals.

São forças de distancia muito curtas.



0.5 micrometros são 5\*10<sup>-7</sup>. Ou seja mesmo para os melhores polimentos temos distancia entre as superficies 1000x maiores do qe as pequenas distancias necessárias para juntá-las por van der waals. É como tentar juntar montanhas umas em cima das outras. Essas ligações só vao ocorrer nos pontos em qe a distancia é suficientemente proxima para ocorrerem as ligações.

## Teoria da adesão – Rugosidade da superfície



FEUP  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

Rugosidade = 1000 x distância de acção das forças de ligação



Mas se for líquido...



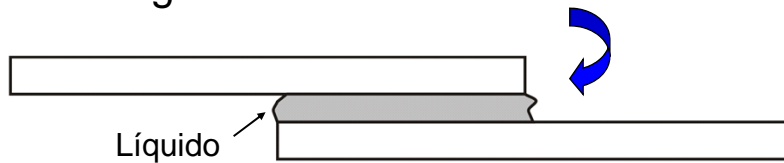
No caso de pormos um líquido junto com a superfície, ele conforma-se a esta e então já está próximo o suficiente em todos os pontos para se darem as tais ligações. Por isso é qe os adesivos são aplicados SEMPRE no estado líquido.

## Teoria da adesão – Mudança de fase

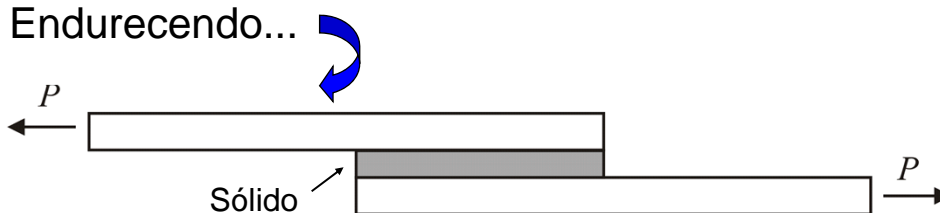


FEUP  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

Boa molhagem mas sem resistência



Endurecendo...



Mas o líquido não tem resistência há qe endurece-lo.



### Processo de endurecimento (cura do adesivo)

- Perda de um solvente (e.g. cola branca da madeira)
- Arrefecimento desde o estado líquido (termofusíveis)
- Reacção química (a maioria dos adesivos estruturais)

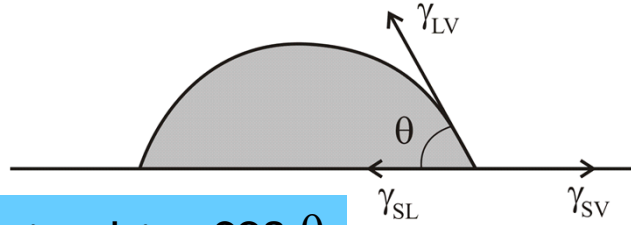
adesivo + endurecedor.



Um para brisas xeio de poeira, quando xove pela primeira vez, a água não forma uma camada uniforme. Fica em gotículas. Mesmo com o para brisas pode nao sair a gordura e poeira, então liga se o detergente qe limpa isso melhor e a partir dai a agua ja se consegue ligar melhor à superfície do vidro.

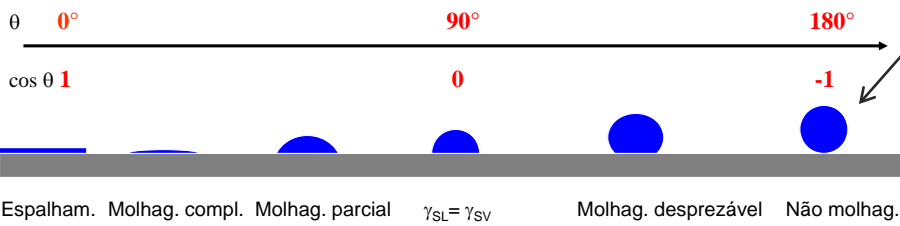
## Teoria da adesão – Molhagem

### Angulo de contacto, $\theta$



$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta$$

Young (1805)



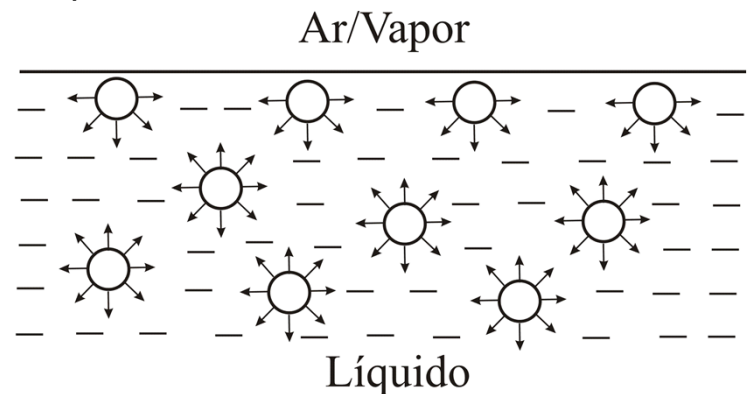
Relaciona energia superficial do solido com a do liquido e da interface.

Mau... não vai dar boa adesão.

## Teoria da adesão – Molhagem

### Energia superficial, $\gamma$

Desequilíbrio das forças de atracção à superfície → energia superficial

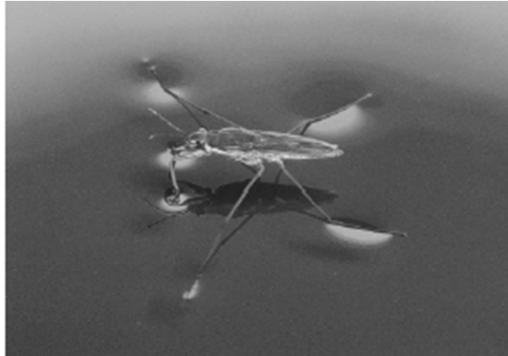


As forças no líquido estão equilibradas em todas as direções, contrariamente às partículas q estão à superfície qe tem a força resultante para baixo. Elas estão com energia extra, e é desta energia qe se está a falar.



Por papel em cima de clip,  
por em cima de agua e  
retirar o papel devagar.

### Energia superficial, $\gamma$



Conhecendo o valor da energia superficial da para prever se vai haver molhagem (boa adesao) ou não, usando o principio da energia minima:  
Se substituirmos o solido com elevada energia sup por um material como o liquido q tem baixa energia sup a energia total do sistema baixa e isso é um processo espontaneo.  
Assim, qdo o adesivo tem energia superficial mais baixa q o solido é facil de colar.

### Princípio de energia mínima

$\gamma_L < \gamma_S \rightarrow$  o líquido espalha-se  
 $\gamma_L > \gamma_S \rightarrow$  o líquido não se espalha

- **Superfícies de elevada energia**  $\gamma_S = 500 \sim 5000 \text{ mJ m}^{-2}$   
(metais e os seus óxidos, vidro e diamante; geralmente materiais duros de elevado ponto de fusão)
- **Superfícies de baixa energia**  $\gamma_S = 5 \sim 100 \text{ mJ m}^{-2}$   
(a maioria dos sólidos orgânicos e os materiais poliméricos; geralmente macios com baixos pontos de fusão)

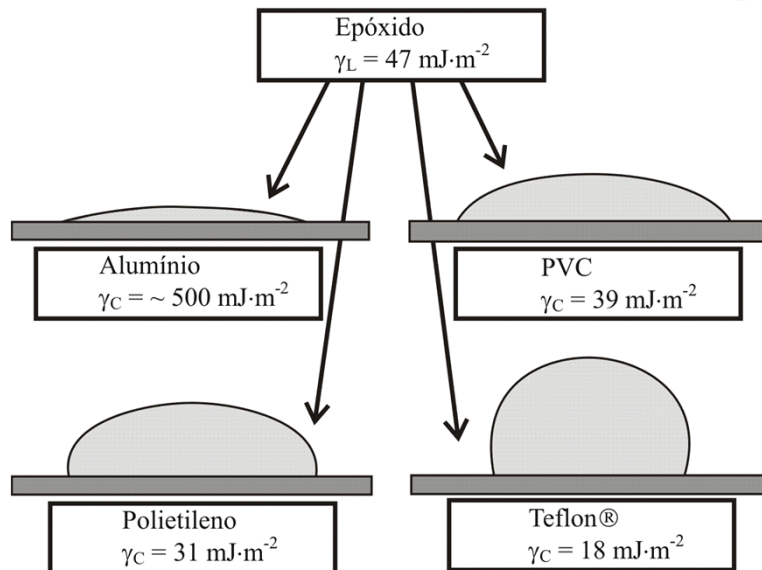
Assim todas as superficies com elevada energia superficial são facéis de molhar --> materiais duros.

## Teoria da adesão – Tensão de superfície crítica



FEUP  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

Adesivo tem energia superficial muito mais baixa q alumínio e então liga-se bem. Tal já não acontece com os polímeros e daí qe seja difícil colar.



## Teoria da adesão – Espalhamento



FEUP  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

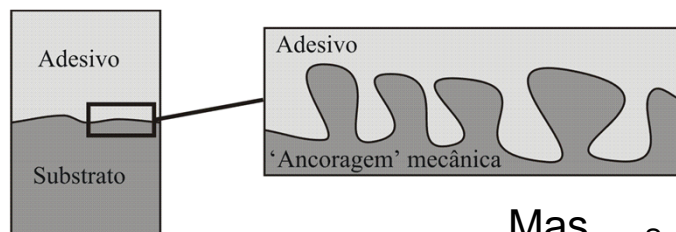
### Como pode o utilizador intervir?

→ Aumentando a energia de superfície do sólido.

- Contaminação da superfície (pós, gorduras, óleos, gases adsorvidos, humidade, etc.) → diminuição da energia de superfície
- Os tratamentos superficiais permitem eliminar os contaminantes e modificar quimicamente a superfície de superfícies de baixa energia (polímeros) qe aumentam a energia superficial do material

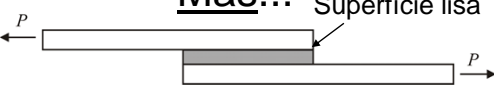
- Mecânica
- Adsorção
- Difusão
- Electrostática

## Mecânica



Exemplo: borracha com têxtil

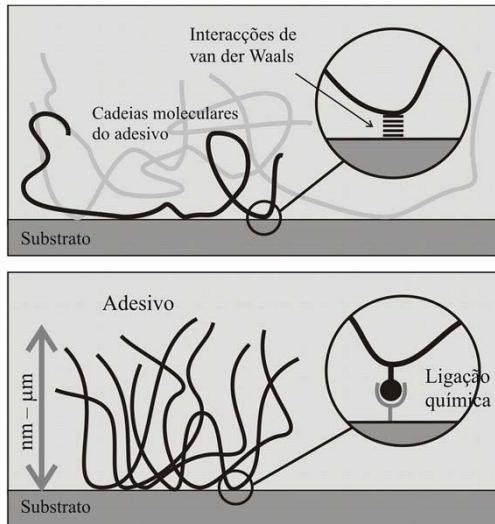


- Mas...** Superfície lisa
- 
- Aumento da área superficial
  - Eliminação de camadas fracas
  - Melhor molhagem
  - Mais dissipação de energia

Quanto maior a rugosidade melhor, por isso é que as superfícies metálicas são sempre grenalhadas ou lixadas (para além de limpar aumenta a rugosidade).

No entanto, quando o ângulo de contacto é  $> 90^\circ$  a rugosidade prejudica.

## Adsorção



### Adsorção física

- Forças de superfície
- Boa molhagem
- Mais importante
- Intervém em todas as ligações

### Adsorção química

- Ligação química
- Ácido-base
- Primárias
- Agentes de ligação

### Etapas do processo de ligação

- 1. Selecção do adesivo**
- 2. Projecto da junta**
- 3. Preparação da superfície**
- 4. Fabrico da junta**
- 5. Controlo do processo**

## Seleccção do adesivo – Classificação



**FEUP**  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

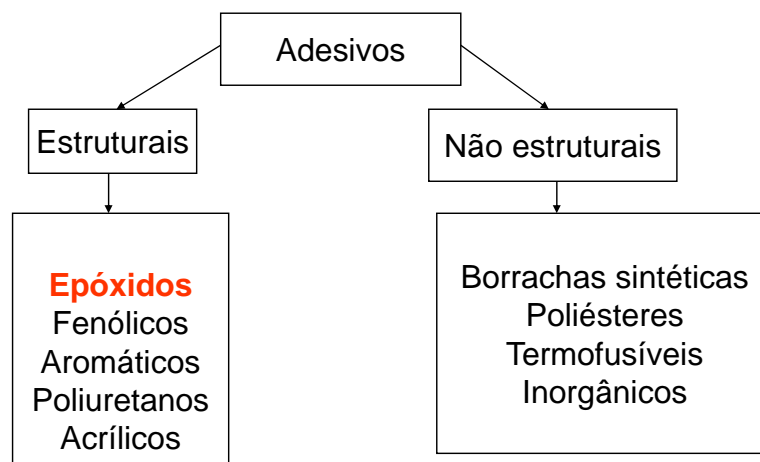
- **Função** (estruturais e não estruturais)
- **Composição química** (termoplásticos, termoendurecíveis, elastoméricos, híbridos)
- **Método de reacção** (reacção química, perda de solvente, perda de água, arrefecimento a partir do estado fundido)
- **Forma física** (líquido, pasta, sólido)
- **Custo**
- **Substratos**
- **Método de aplicação**

## Seleccção do adesivo – Classificação



**FEUP**  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

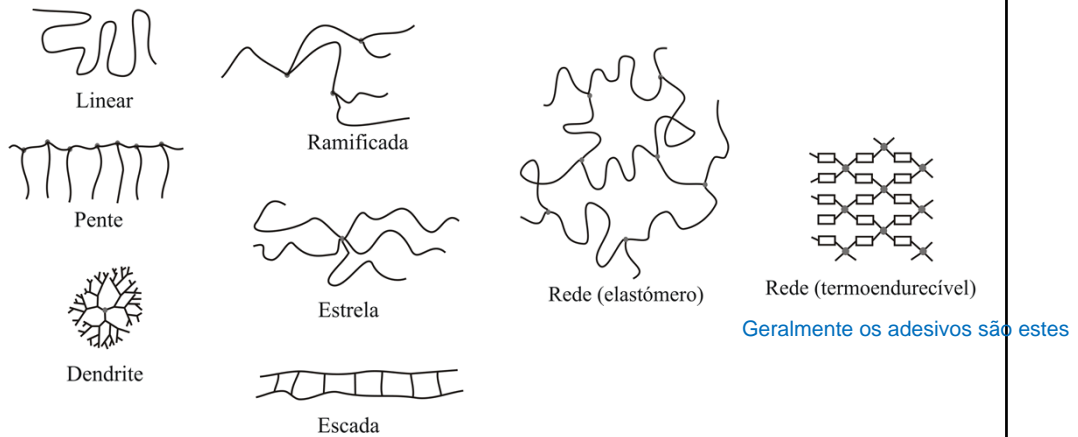
### Função



Para colar selos, ....

## Seleção do adesivo – Classificação

### Composição química

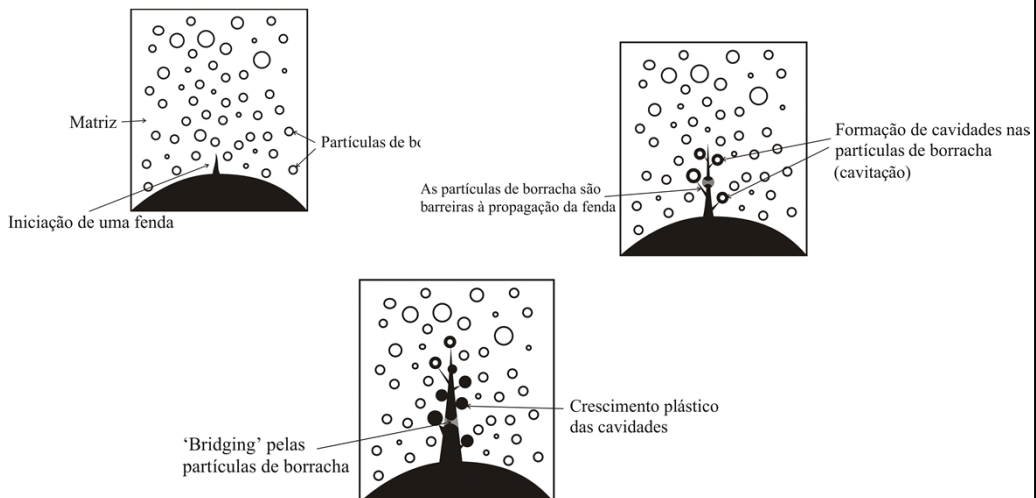


Não se usa epóxi puro pq é muito frágil, n tem def plastica. --> modificar para ter mais tenacidade --> uma das modificações mais usada é por adição de partículas de borracha.

## Seleção do adesivo – Classificação

### Composição química

Adesivos híbridos (e.g. termoendurecível + borracha)



As partículas de borracha criam obstáculos à propagação da fenda e ligam a fenda --> aumenta o material (toughened epoxy)



### 1. Adesivos que curam por reacção química

- Duas partes
- Uma parte, cura por catalisador ou endurecedor
- Cura com a humidade
- Cura por radiação (luz, UV, feixe de electrões, etc.)
- Catálise pelo substrato
- Forma sólida (fita, filme, pó, etc.)

### 2. Adesivos que endurecem por perda de solvente ou água

- Contacto
- Adesivos sensíveis à pressão
- Adesivos reactiváveis
- Adesivos resinosos

### 3. Adesivos que endurecem por arrefecimento a partir do estado fundido

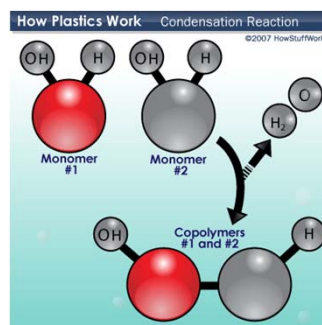
- Termofusíveis
- Termofusíveis sensíveis à pressão e termoendurecíveis



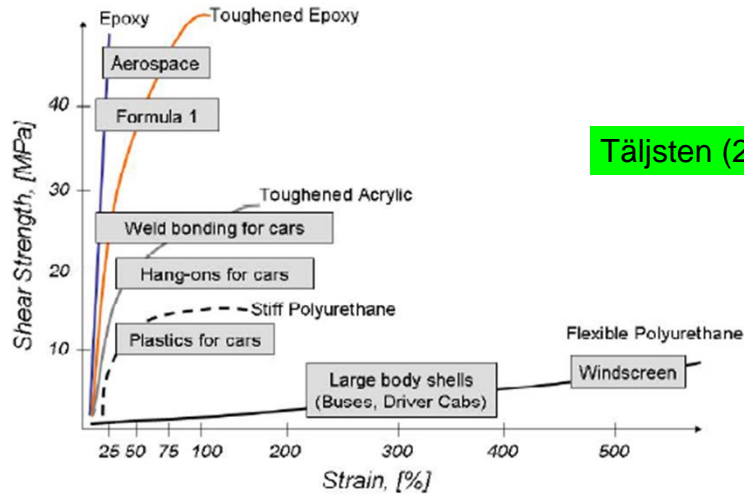
### Reacção química

- Condensação (poliimidas, fenólicos)
- Adição (epóxidos, uretanos, acrílicos)

Libertam uma molécula de água na reacção química, a qual pode expandir causando porosidade (mau, pq é concentração de tensão). Para evitar essa expansão aplica-se mta pressão, p isso é q estes 2 são smp aplicados com mta pressão.



## Seleção do adesivo




## Seleção do adesivo – Epóxidos

EPOXY	Advantages	Applications				
	<p>Excellent mechanical performance</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Good environmental resistance and high toughness</li> <li>• Easy processing</li> </ul>	<table border="0"> <tr> <td>120 °C cure</td> <td>180 °C cure</td> </tr> <tr> <td>Aerospace Sport Leisure Marine Automotive Railways Transport</td> <td>Aerospace Military</td> </tr> </table>	120 °C cure	180 °C cure	Aerospace Sport Leisure Marine Automotive Railways Transport	Aerospace Military
120 °C cure	180 °C cure					
Aerospace Sport Leisure Marine Automotive Railways Transport	Aerospace Military					

Muito resistentes à  
humidade, temperatura,  
mecânica  
No entanto são bastante  
frágeis

## Seleção do adesivo – Fenólicos

Usados para aplicações de altas T<sup>as</sup>

PHENOLIC	Advantages	Applications
	<p><b>Excellent fire resistance</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Good temperature resistance</li> <li>• Low smoke and toxic emissions</li> <li>• Rapid cure</li> <li>• Economic processing</li> </ul>	<p>Aerospace (interior components) Marine Railways</p>



Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

49

## Seleção do adesivo – Poliuretanos

Muito flexíveis.  
Aplicação típica é nos vidros dos autocarros.

<b>Forma</b>	Soluções, pastas	
<b>Método de aplicação</b>	Cartuchos	
<b>Cura</b>	Temperatura ambiente	
<b>Temperatura de serviço</b>	-200 a 80°C	
<b>Vantagens</b>	Bom desempenho a baixa temperatura. Boa tenacidade, molhabilidade. Habilidade de formar uma espuma (os de 2 partes)	
<b>Desvantagens</b>	Curam com humidade, baixa resistência à temperatura	
<b>Resistência ao meio ambiente</b>	<b>Água</b>	Razoável
	<b>Solvente</b>	Razoável/boa
	<b>Óleo</b>	Razoável/boa
<b>Saúde e segurança</b>	Evitar riscos fisiológicos	
<b>Aplicações</b>	Cargas baixas. Aplicações criogénicas. Indústria automóvel, do calçado...	

Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

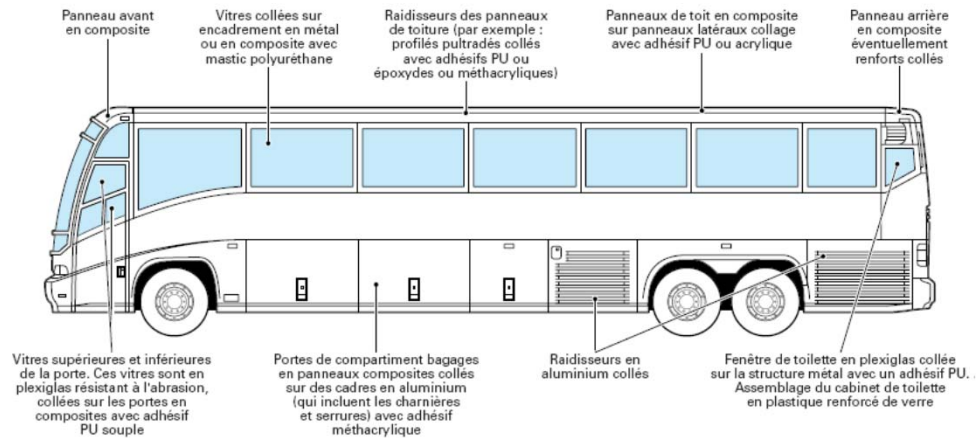
50

## Seleção do adesivo – Poliuretanos



**FEUP**  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

Motor Coach Industry/ITW Plexus



Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

51

## Seleção do adesivo – Anaeróbicos



**FEUP**  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

Aplicação típica: para reforçar ligações aparafusadas.

<b>Forma</b>	Uma parte líquido ou pasta	
<b>Método de aplicação</b>	Pequeno contentor ou aplicação automática	
<b>Cura</b>	Por exclusão de ar. Cura em minutos ou horas a 25°C, ou em 10 min a 120°C	
<b>Temperatura de serviço</b>	-55 a 120°C	
<b>Vantagens</b>	Preparação da superfície não precisa de ser muito cuidada	
<b>Desvantagens</b>	Espessuras finas	
<b>Resistência ao meio ambiente</b>	<b>Água</b>	Boa
	<b>Solvente</b>	Depende da f
	<b>Óleo</b>	Boa
<b>Saúde e segurança</b>	Não causam g	
<b>Aplicações</b>	Pequenos trab de árvores. V	



Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

52

A conhecida "super-cola"

## Seleccção do adesivo – Cianoacrilatos



**FEUP**  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

<b>Forma</b>		Uma parte líquido
<b>Método de aplicação</b>		Pequeno contentor ou aplicação automática
<b>Cura</b>		Em presença de humidade no substrato. Cura em segundos ou minutos a 20°C
<b>Temperatura de serviço</b>		-30 a 80°C
<b>Vantagens</b>		Cura rápida
<b>Desvantagens</b>		A cura rápida impede de ligar grandes áreas. Frágil. Baixa capacidade de preencher espaços.
<b>Resistência ao meio ambiente</b>	<b>Água</b>	Fraca
	<b>Solvente</b>	Razoável/
	<b>Óleo</b>	Boa
<b>Saúde e segurança</b>		A cura rápida é o facto de
<b>Aplicações</b>		Montagem de componentes compostas Indústria



Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

53

Todos os acrílicos têm 1 coisa comum: endurecem muito rapidamente. Os acrílicos modificados são bons para colar todos os materiais... mesmo os plásticos

## Seleccção do adesivo – Acrílicos modificados



**FEUP**  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

<b>Forma</b>		Duas partes
<b>Método de aplicação</b>		Contentor, misturador, sistemas completamente automatizados
<b>Cura</b>		Catalisados por um iniciador que permite uma cura rápida
<b>Temperatura de serviço</b>		-40 a 120°C
<b>Vantagens</b>		Podem curar rapidamente. Habilidade em ligar superfícies mal preparadas. Boa resistência ao meio ambiente
<b>Desvantagens</b>		A resistência e o módulo são mais baixos do que para os epóxicos
<b>Resistência ao meio ambiente</b>	<b>Água</b>	Boa
	<b>Solvente</b>	Boa
	<b>Óleo</b>	Boa
<b>Saúde e segurança</b>		Não causam grandes problemas à saúde
<b>Aplicações</b>		Montagem rápida de pequenos e grandes componentes

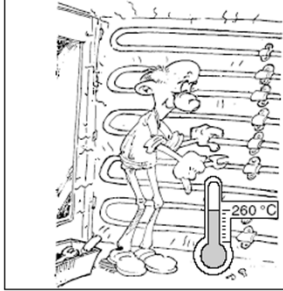
Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

54

## Seleção do adesivo – Aromáticos

### BISMALEIMIDE (AND POLYIMIDE)



#### Advantages

Excellent resistance to high temperatures

- Service temperature up to 260 °C
- Good mechanical characteristics
- Good resistance to chemical agents, fire and radiation

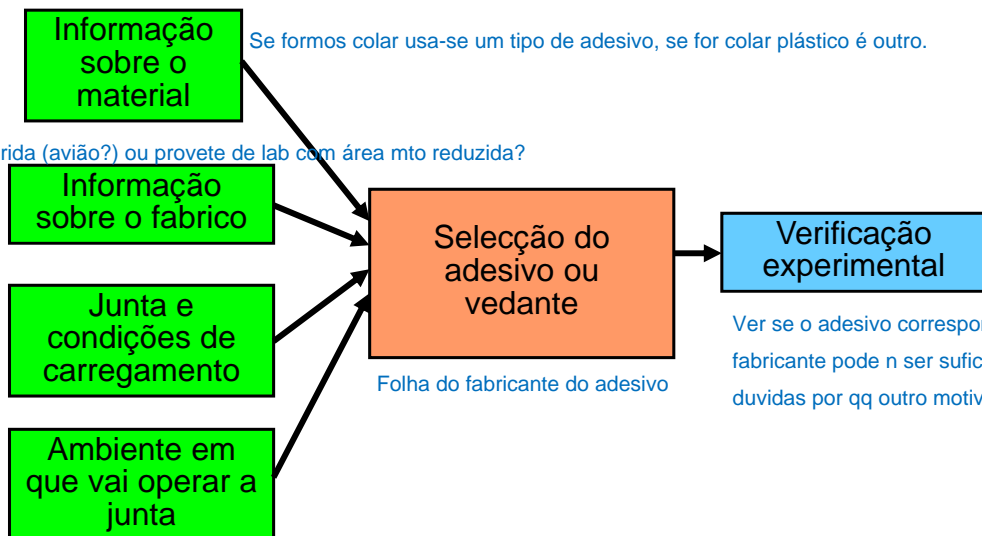
#### Applications

Aeroengines  
High temperature components

Usados em formula 1, em aviões super sónicos...

## Seleção do adesivo – Processo de seleção

4 parâmetros a ter em conta na seleção do adesivo





## Ensaio de tracção

EN ISO 527-2



Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

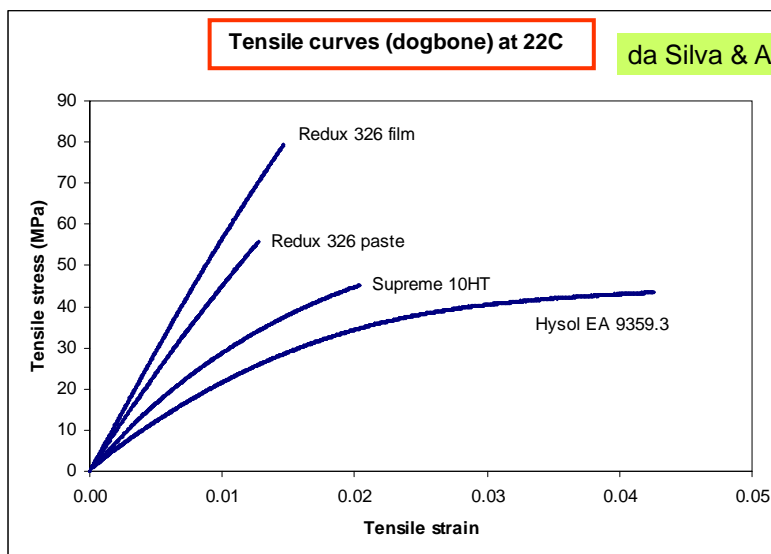
57

Aqui está-se a ensaiar o adesivo no estado maciço, mas em geral o adesivo não é usado assim é usado numa junta. Será q as propriedades do adesivo assim e num junta são diferentes? Há controvérsia ao melhor ensaio para caracterizar o adesivo.



Tensile curves (dogbone) at 22C

da Silva & Adams (2005)



Lucas da Silva

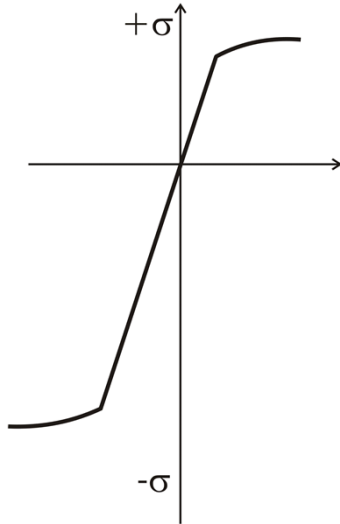
DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

58

## Seleccção do adesivo – Processo de selecção



FEUP  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia



Tracção vs compressão

$$\sigma_c = 1,2 \text{ a } 1,4 \sigma_t$$

Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

59

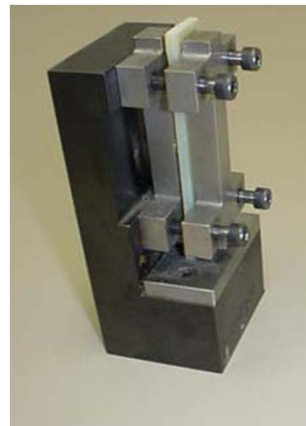
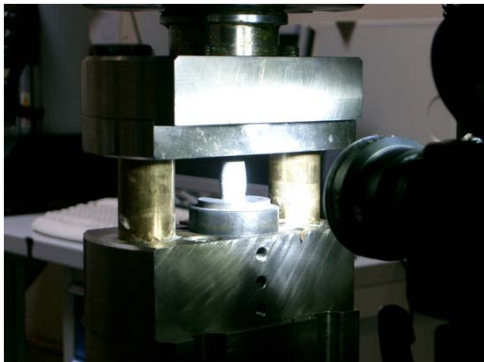
## Seleccção do adesivo – Processo de selecção



FEUP  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

### Ensaio de compressão

ASTM D 695



Lucas da Silva

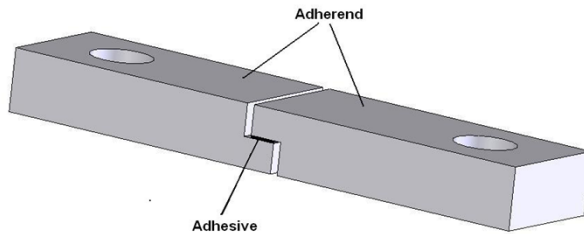
DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

60

Enquanto qe nos metais sabendo o seu comportamento à tração dá para prever o comportamento à compressão, nos adesivos fazer essa previsão não é 100% correto --> é preciso ensaiar à compressão.



Ensaio de corte (Thick Adherend Shear Test – TAST) ISO 11003-2, ASTM D 5656



ISO 11003-2, ASTM D 5656

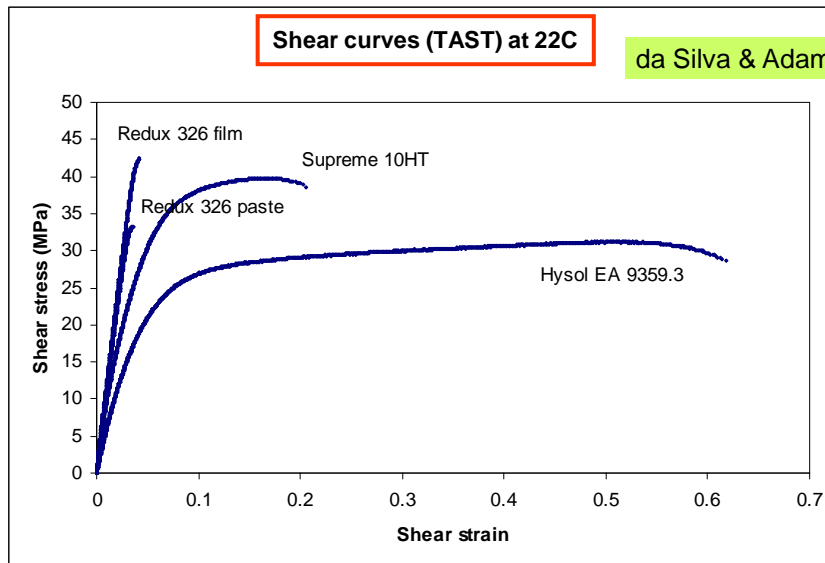
da Silva et al. (2008)

Este é dos ensaios mais usados para caracterizar ao corte. Substratos bem espessos para garantir que a distribuição de tensão ao longo do comprimento da sobreposição é uniforme. Só que para medir as deformações do adesivo repar-se que é um filme muito fino e portanto é difícil, pelo que é preciso equipamento altamente sofisticado.



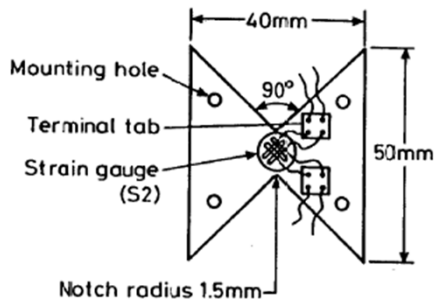
Shear curves (TAST) at 22C

da Silva & Adams (2005)



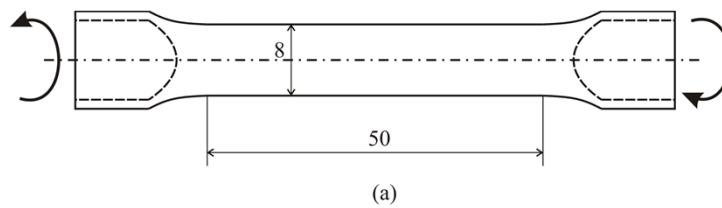
## Ensaio de corte

*Arcan* ou borboleta



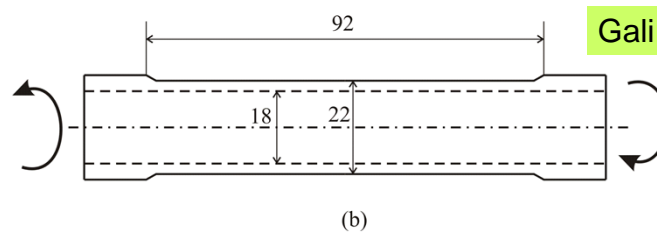
## Ensaio de corte Torção

Chen et al. (2010)



(a)


Gali et al. (1981)



(b)

Cada vez mais se usam conceitos da mecânica da fratura para projetar as juntas e não conceitos da mecânica dos meios contínuos. E para projetar em termos da mecânica da fratura é preciso da tenacidade do material e a resistência do material à propagação de fendas. Então é preciso ensaiar um provete qe tem uma fenda, carregá-lo, medir a força correspondente ao momento em qe a propagação estável da fenda e com algumas formulas matematicas deduz-se a tenacidade.

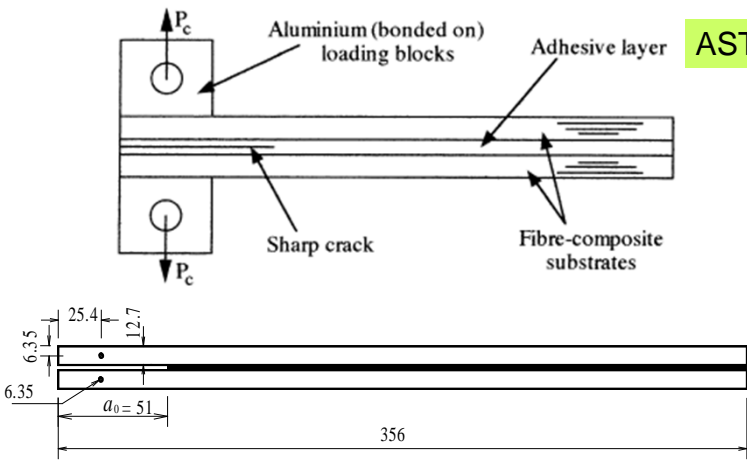
**Seleção do adesivo – Processo de seleção**



**FEUP**  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

**Ensaio de tenacidade**

*Modo I (Double cantilever beam - DCB)*




**ASTM D 3433**

*Lucas da Silva*

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

65

**Seleção do adesivo – Processo de seleção**



**FEUP**  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

**Ensaio de tenacidade**

*Modo I*

$$G_c = \frac{P_c^2}{2b} \frac{dC}{da}$$

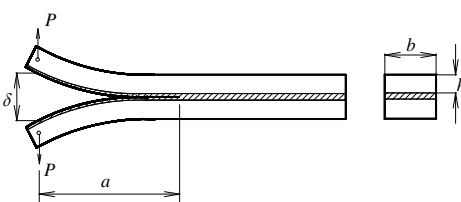
$$C = \delta/P$$

**Irwin (1963)**

$$\delta = \frac{8Pa^3}{Eb^3} + \frac{12Pa}{5Gb}$$

(teoria das vigas)

$$G_{Ic} = \frac{6P_c^2}{b^2h^3} \left( \frac{2a^2}{E} + \frac{h^2}{5G} \right)$$



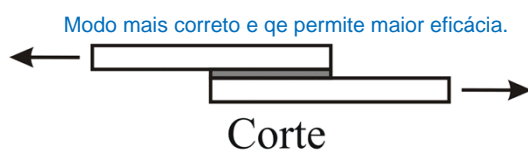
*Lucas da Silva*

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

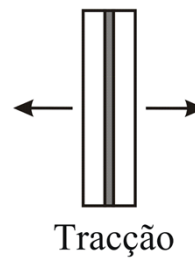
66

1. Selecção do adesivo
2. **Projecto da junta**
3. Preparação da superfície
4. Fabrico da junta
5. Controlo do processo

### *Projecto da junta – Modos de carregamento*

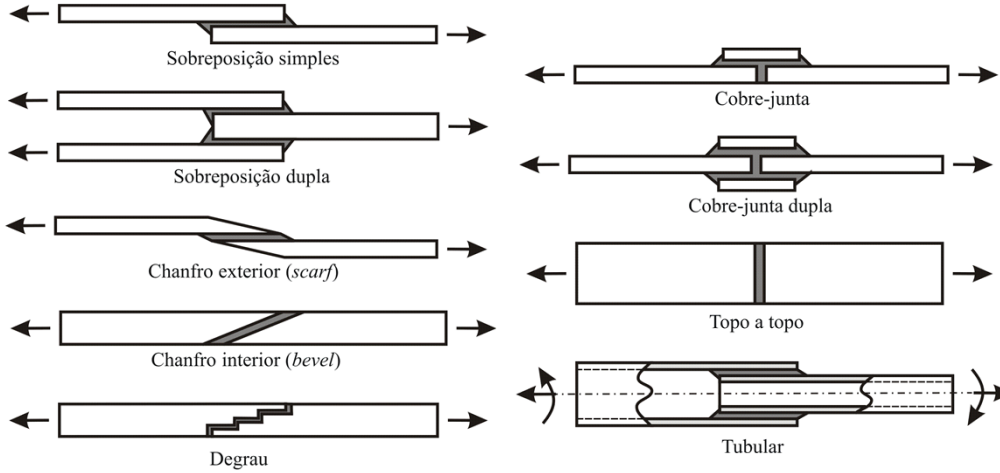


Mas na prática não existe sempre só corte, é difícil garantir isso.



## Projecto da junta – Tipos de juntas

Mesmo nestas onde parece só haver corte, há momento fletor qe introduz forças de arrancamento.



mtto raro usar-se esta

Usado em tubagens, industria petrolifera.

Dois passos no projeto da junta:

1º saber o nível de tensão em toda a estrutura.

2º aplicar um critério de rotura. Ex: qdo a tensao de corte no adesivo atingir a tensao de corte de rotura, ele parte.

## Projecto da junta – Análise das tensões

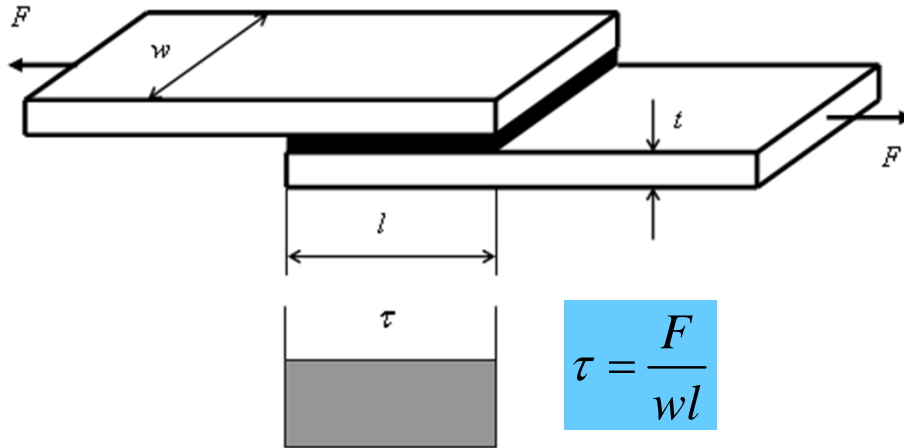
Relativamente ao 1º (determinar o nivel de tensao na junta)

### Duas possibilidades:

- Métodos analíticos → projecto
- Métodos numéricos (método dos elementos finitos) → investigação

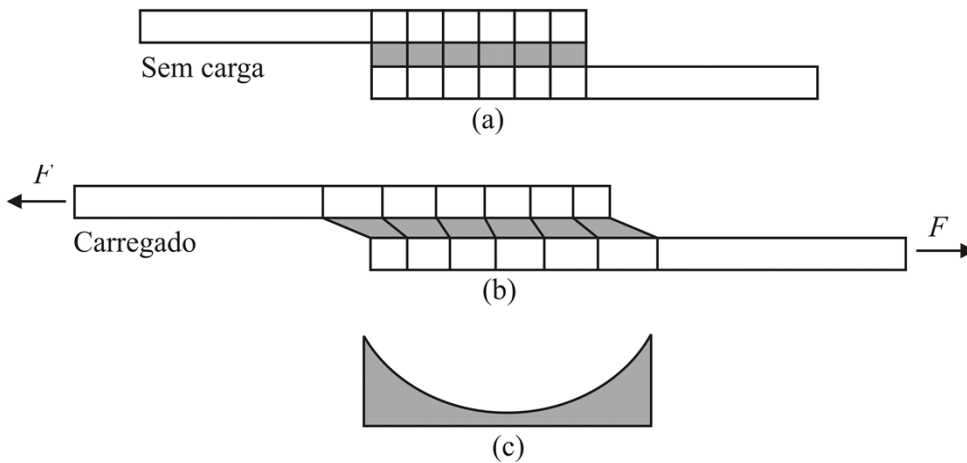
apenas para geometrias simples. Chega-se a eq diferenciais, e qe depois com várias simplificações a equações qe se podem usar para saber o estado de tensao.

## Análise simples (método analítico)



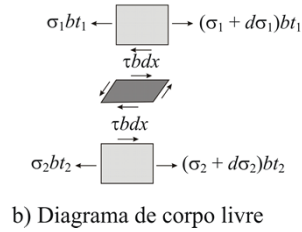
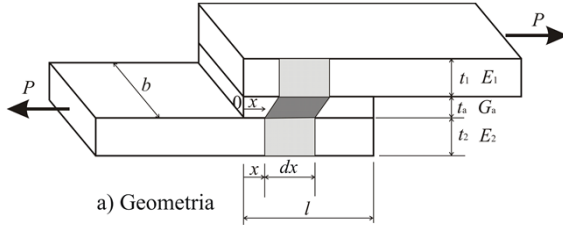
Este é dos métodos mais simples: supõe que a tensão de corte ao longo do comprimento de sobreposição é constante. Tensão = força / área. Esta abordagem tem um > erro enorme, a não ser que os substratos sejam muito rígidos e o adesivo muito flexível. Por exemplo: aço com silicone tem erro pequeno, mas aço com epóxi já tem erro grande, pq o aço já se deforma.

## Volkersen (1938)



Notar que não só o adesivo mas também o substrato se deforma. Essa deformação não gradual, solicita o adesivo ao corte de modo não uniforme. Então a distribuição da tensão de corte no adesivo tem a forma (c), com concentração de tensão na extremidade da superfície.

**Volkersen (1938)**



Balanço das forças do substrato de cima:

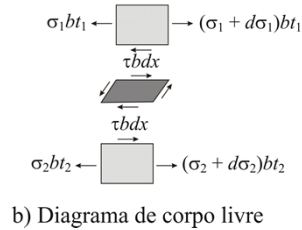
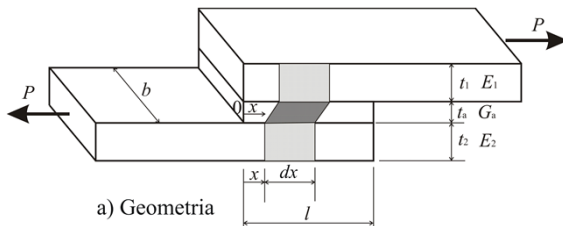
$$\sigma_1 b t_1 + \tau b dx = (\sigma_1 + d\sigma_1) b t_1 \Rightarrow \frac{d\sigma_1}{dx} = \frac{\tau}{t_1}$$

Balanço das forças do substrato de baixo:

$$\sigma_2 b t_2 = (\sigma_2 + d\sigma_2) b t_2 + \tau b dx \Rightarrow \frac{d\sigma_2}{dx} = -\frac{\tau}{t_2}$$

O 1º a propor uma equação para distribuição (c) foi o Volkersen. Ainda é mto usado na industria aeroespacial p ex.

**Volkersen (1938)**



Equilíbrio da junta:

$$P = \sigma_1 b t_1 + \sigma_2 b t_2$$

Deformação de corte no adesivo:

$$\gamma = \frac{\tau}{G_a} = \frac{1}{t_a} (u_1 - u_2) \Rightarrow \frac{d\gamma}{dx} = \frac{1}{G_a} \frac{d\tau}{dx} = \frac{1}{t_a} \left( \frac{du_1}{dx} - \frac{du_2}{dx} \right) = \frac{1}{t_a} \left( \frac{\sigma_1}{E_1} - \frac{\sigma_2}{E_2} \right)$$

Volkersen (1938)

$$\frac{d\sigma_1}{dx} = \frac{\tau}{t_1} + \frac{d\sigma_2}{dx} = -\frac{\tau}{t_2} + \frac{1}{G_a} \frac{d\tau}{dx} = \frac{1}{t_a} \left( \frac{\sigma_1}{E_1} - \frac{\sigma_2}{E_2} \right)$$

$$\frac{1}{G_a} \frac{d\tau}{dx} = \frac{t_1}{G_a} \frac{d^2\sigma_1}{dx^2} = -\frac{t_2}{G_a} \frac{d^2\sigma_2}{dx^2} \Rightarrow t_1 \frac{d^2\sigma_1}{dx^2} = \frac{G_a}{t_a} \left( \frac{\sigma_1}{E_1} - \frac{\sigma_2}{E_2} \right)$$

A partir de  $P = \sigma_1 b t_1 + \sigma_2 b t_2 \Rightarrow \sigma_2 = \frac{P}{w t_1} - \sigma_1 \frac{t_1}{t_2}$

Substituindo em  $t_1 \frac{d^2\sigma_1}{dx^2} = \frac{G_a}{t_a} \left( \frac{\sigma_1}{E_1} - \frac{\sigma_2}{E_2} \right)$

$$\frac{d^2\sigma_1}{dx^2} - \lambda^2 \sigma_1 + C_0 = 0 \quad \text{com} \quad \lambda^2 = \frac{G_a}{t_a} \left( \frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right) \quad C_0 = \frac{G_a}{t_a} \frac{P}{b E_2 t_2 t_1}$$

Volkersen (1938)

$$\sigma_1 = -\frac{C_0}{\lambda^2} \cosh(\lambda x) + \left\{ \frac{C_0}{\lambda^2} [\cosh(\lambda l) - 1] + \frac{P}{b t_1} \right\} \frac{\sinh(\lambda x)}{\sinh(\lambda l)} + \frac{C_0}{\lambda^2}$$

A partir de  $\frac{d\sigma_1}{dx} = \frac{\tau}{t_1}$

$$\tau = t_1 \frac{d\sigma_1}{dx} = -\frac{C_0 t_1}{\lambda^2} \lambda \sinh(\lambda x) + \left\{ \frac{C_0 t_1}{\lambda^2} [\cosh(\lambda l) - 1] + \frac{P}{l} \right\} \frac{\lambda \cosh(\lambda x)}{\sinh(\lambda l)}$$

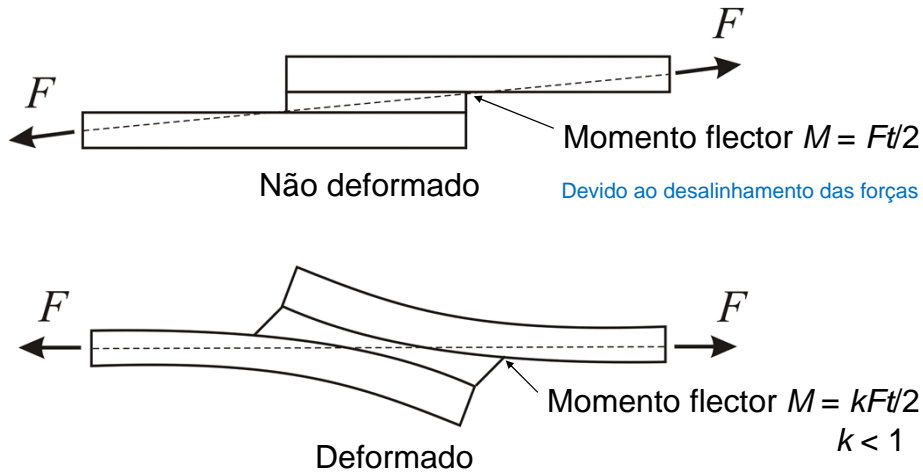
Substituindo  $C_0$  e  $\lambda^2$  e usando  $\bar{\tau} = \frac{P}{bl}$

$$\frac{\tau(x)}{\bar{\tau}} = \frac{\lambda l}{k \sinh(\lambda l)} \left[ (k-1) \cosh(\lambda(l-x)) + \cosh(\lambda x) \right]$$

$$\lambda^2 = \frac{G_a}{t_a} \left( \frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right) \quad k = \frac{E_1 t_1}{E_2 t_2} + 1$$

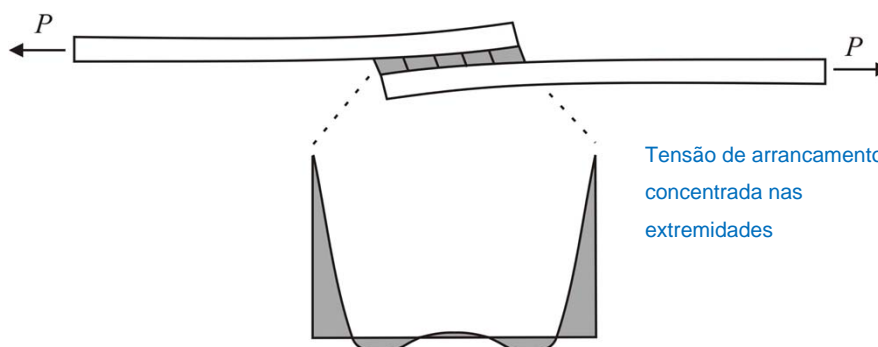
Dá a tensão de corte no adesivo em função de x

### Goland e Reissner (1944)



No entanto a equação anterior não tem em conta que a junta também sofre um momento flector.

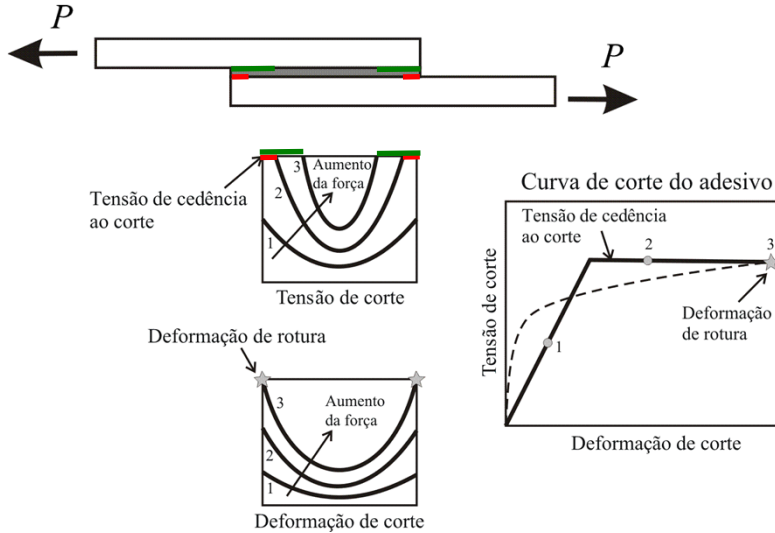
### Goland e Reissner (1944)



A zona crítica é por isso quase sempre na extremidade da sobreposição.



Hart-Smith (1973)

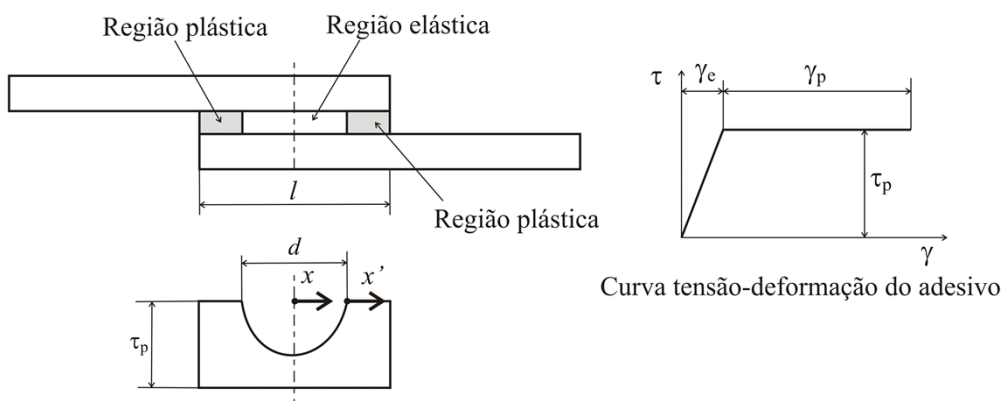


Ainda assim, todos os anteriores desprezaram o efeito da plasticidade do adesivo.

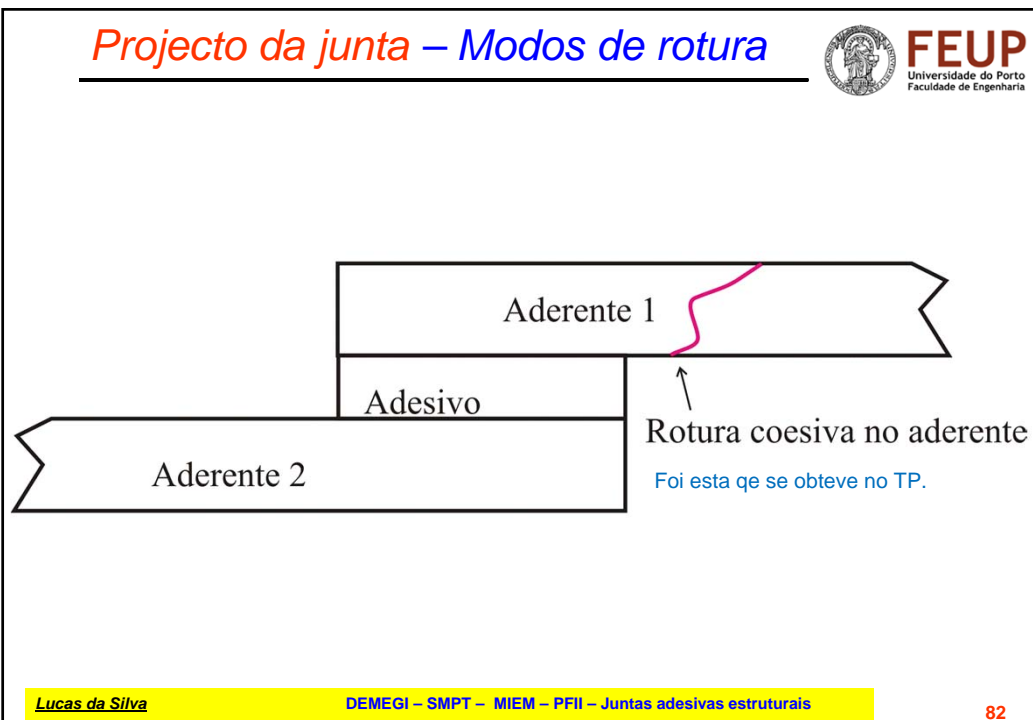
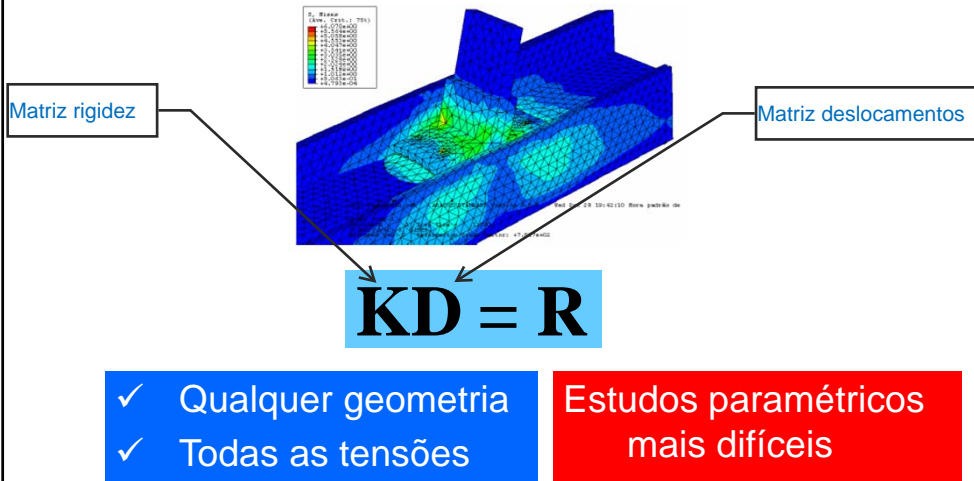
Em adesivos frágeis o meio não trabalha. Quanto mais dúctil for mais parte da sobreposição trabalha.



Hart-Smith (1973)



## Método dos elementos finitos



Tendo determinado o nível de tensão, agora pode-se aplicar o critério de rotura. Mas para isso é preciso saber como é qe a junta parte.

- Rotura coesiva no adesivo (mais comum)
- Rotura coesiva no aderente/substrato (mais raro, mas era o ideal)
- Rotura adesiva (interface) --> junta mal feita... repetir a montagem. As forças de adesão devem ser, se for bem feito, > qe as forças de coesão.

## Projecto da junta – Critérios de rotura



**FEUP**  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

### No adesivo

- Adesivo frágil → tensão máxima (Volkersen ou G&R)
- Adesivo dúctil → deformação máxima (Hart-Smith)
- Adesivo muito dúctil → cedência generalizada (análise simples)
- Mecânica da fractura
- Mecânica do dano

qdo atinge a tensão de corte máxima do adesivo parte.

Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

83

## Projecto da junta – Critérios de rotura



**FEUP**  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

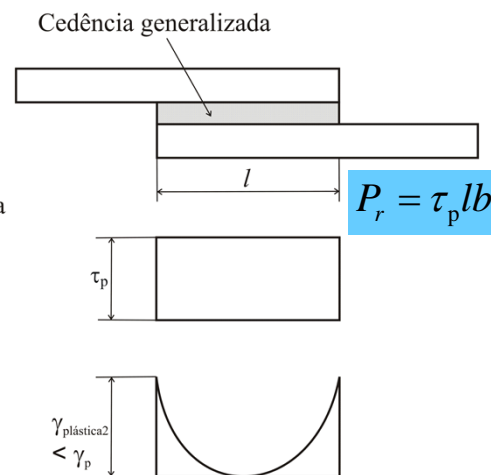
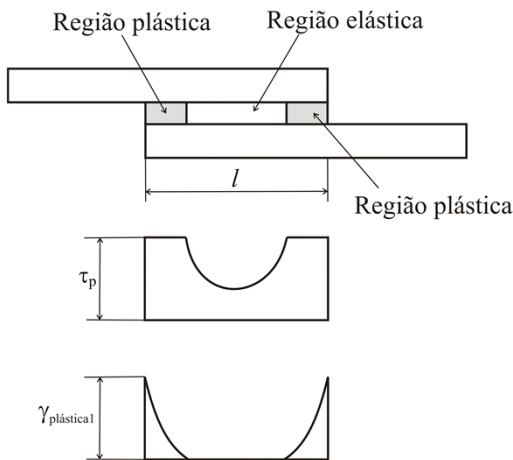
Critério da

### Cedência generalizada

situação ideal (parte pelo substrato), mas é raro acontecer.

→ Para adesivos dúcteis

Crocombe (1989)



método que calcula a força de rotura correspondente ao momento em q todo o comprimento de sobreposição atingiu a tensão de cedencia do adesivo. Isto so acontece c adesivos mto ducteis.

Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

84

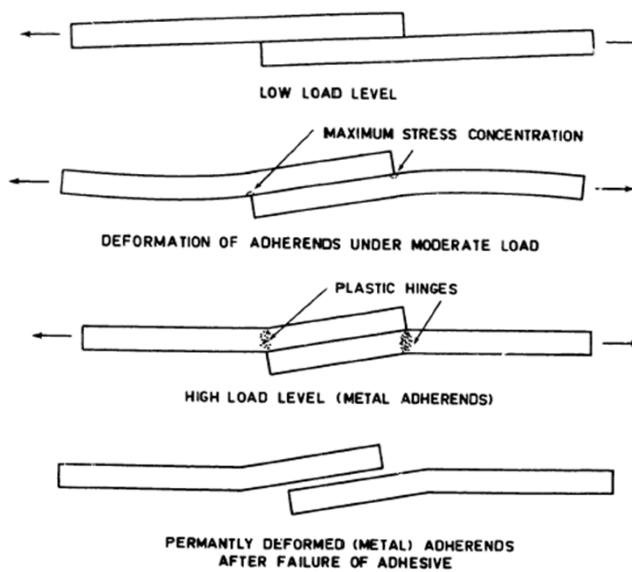
Deste lado o que acontece para um adesivo de ductilidade limitada. Deforma plasticamente nas extremidades mas não no meio. O adesivo parte pq atingiu a sua deformação máxima (na extremidade).

Para um adesivo ainda mais dúctil pode-se atingir a tensão de cedencia ao longo de todo o comprimento de sobreposição antes de se atingir a deformação de rotura. E nesse caso o que controlada rotura é qdo se atinge a deformação plástica ao longo de todo o comprimento de sobreposição. Para prever a força de rotura é multiplicar a tensão de rotura pela área de resistência.

## Projecto da junta – Critérios de rotura



### Metals

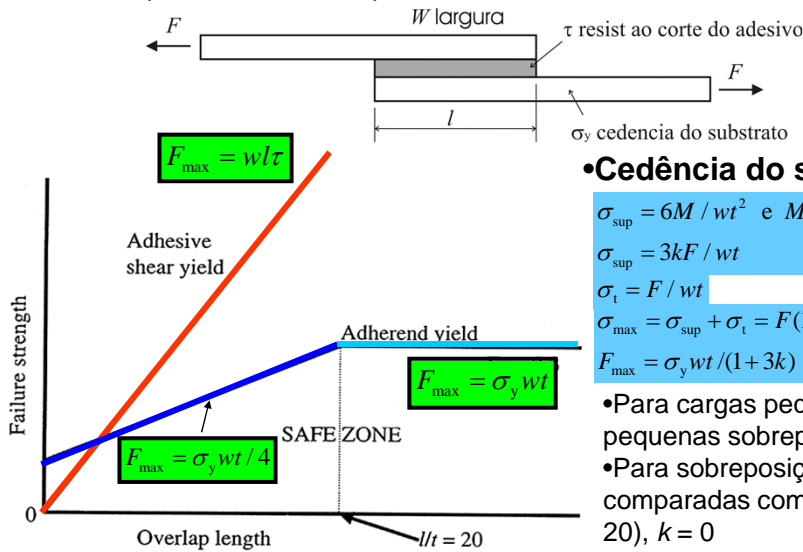


Mas nem sempre a rotura é controlada pelo adesivo. às vezes é pela def. plastica do aço, caso dos aços macios. Então para obter uma previsão da tensão de rotura aqil qe se deve fazer é determinar a força correspondente ao inicio da plastificação do substrato.

## Projecto da junta – Critérios de rotura



### Metals (Adams, 1997)



#### •Cedência do substrato

$$\sigma_{sup} = 6M / wt^2 \text{ e } M = kFt / 2 \text{ (G\&R)}$$

$$\sigma_{sup} = 3kF / wt$$

$$\sigma_t = F / wt$$

$$\sigma_{max} = \sigma_{sup} + \sigma_t = F(1 + 3k) / wt$$

$$F_{max} = \sigma_y wt / (1 + 3k)$$

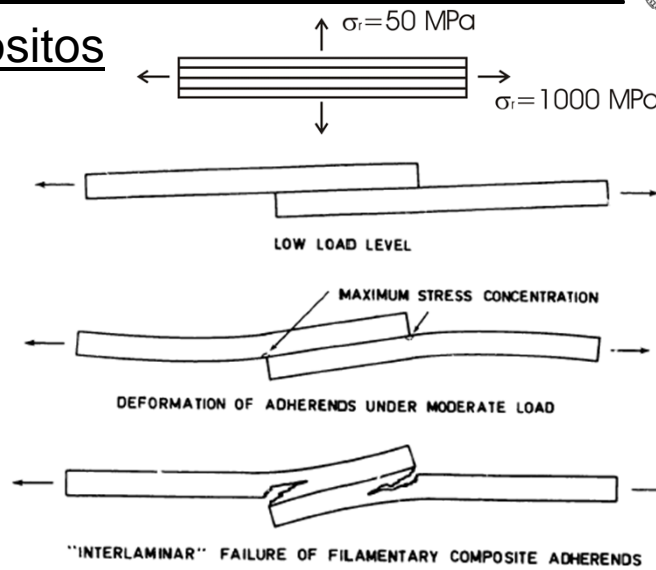
- Para cargas pequenas e pequenas sobreposições,  $k = 1$
- Para sobreposições grandes comparadas com a espessura ( $l/t = 20$ ),  $k = 0$

## Projecto da junta – Critérios de rotura



FEUP  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

### Compósitos



Os compósitos no sentido das fibras têm resistências muito altas, mas no sentido perpendicular é muito baixa (na ordem da das resinas).

Muito frequente nos compósitos causada pelas forças de arrancamento nas extremidades da zona de sobreposição --> extremidades deve ser reforçada.

Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

87

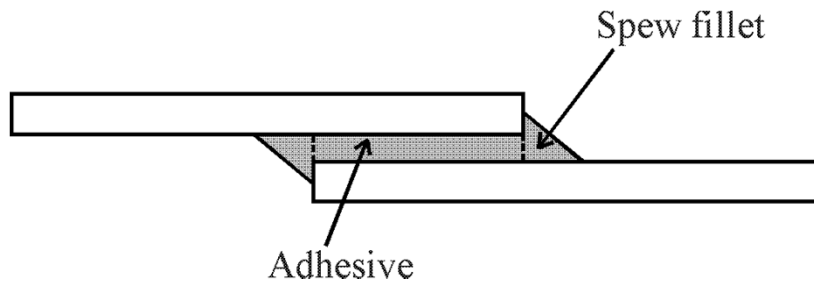
Métodos para reduzir os picos de tensões de arrancamento nas extremidades do comprimento de sobreposição.

## Projecto da junta – Optimização



FEUP  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

### Filete de adesivo



Usar excesso de adesivo na extremidade de sobreposição para garantir uma transmissão de forças mais suave.

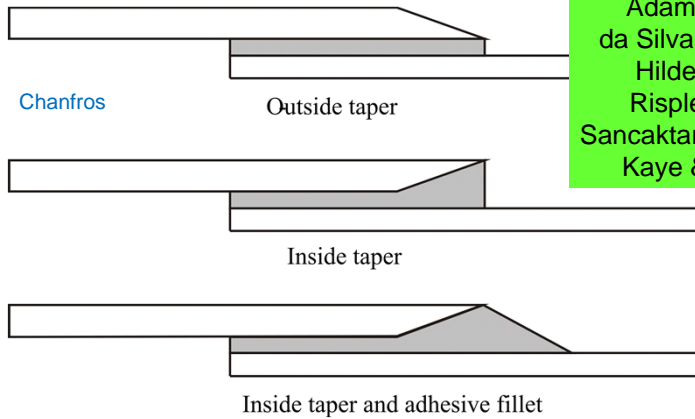
Adams & Peppiatt (1974)  
Crocombe & Adams (1981)  
Dorn & Liu (1993)  
Tsai & Morton (1995)

Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

88

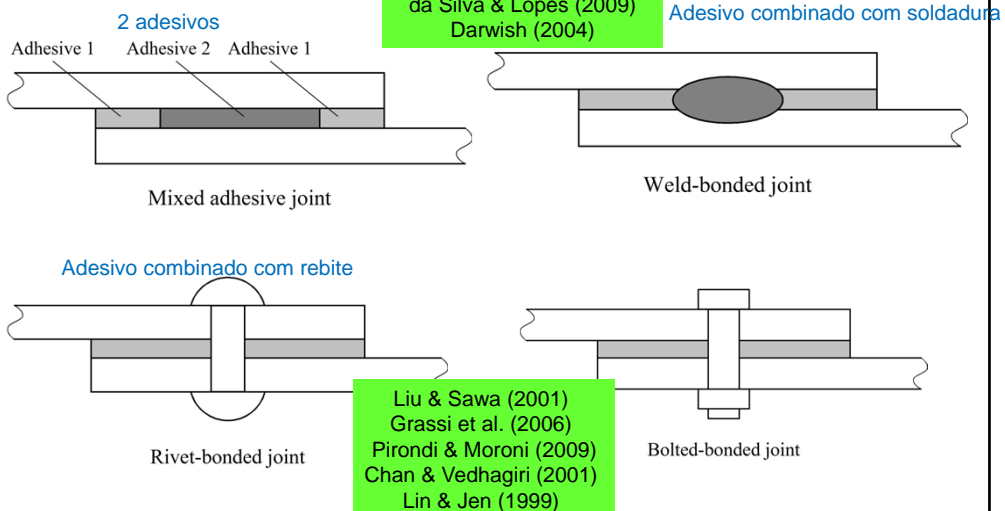
## Geometria dos substratos



Cherry & Harrison (1970)  
Adams et al. (1986)  
da Silva & Adams (2007)  
Hildebrand (1994)  
Rispler et al. (2000)  
Sancaktar & Nirantar (2003)  
Kaye & Heller (2005)

Combina chanfro com fillet. Com esta geometria consegue se resistencia 2-3xs superior ao qe se consegue se fosse angulo reto (sem qq reforço)

## Juntas híbridas

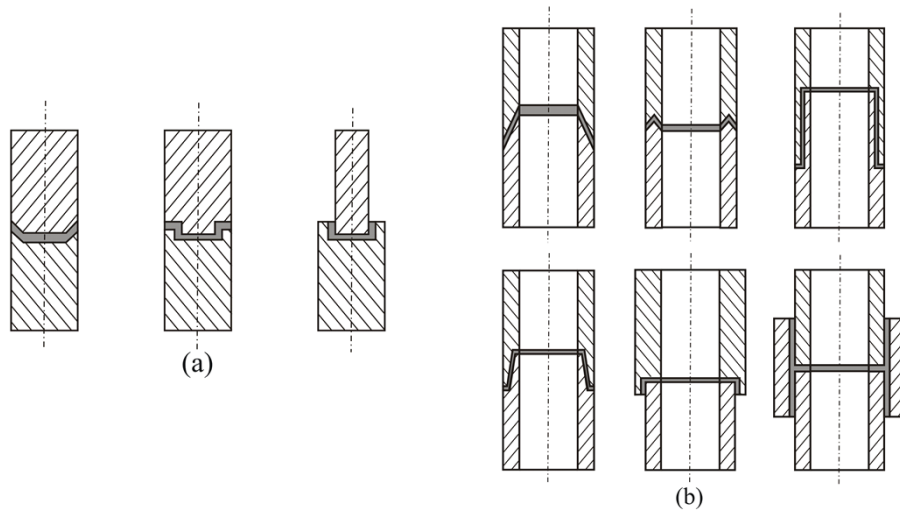


## Projecto da junta – Juntas tubulares



**FEUP**  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

### Juntas para varões (a) e tubos (b)



Lucas da Silva

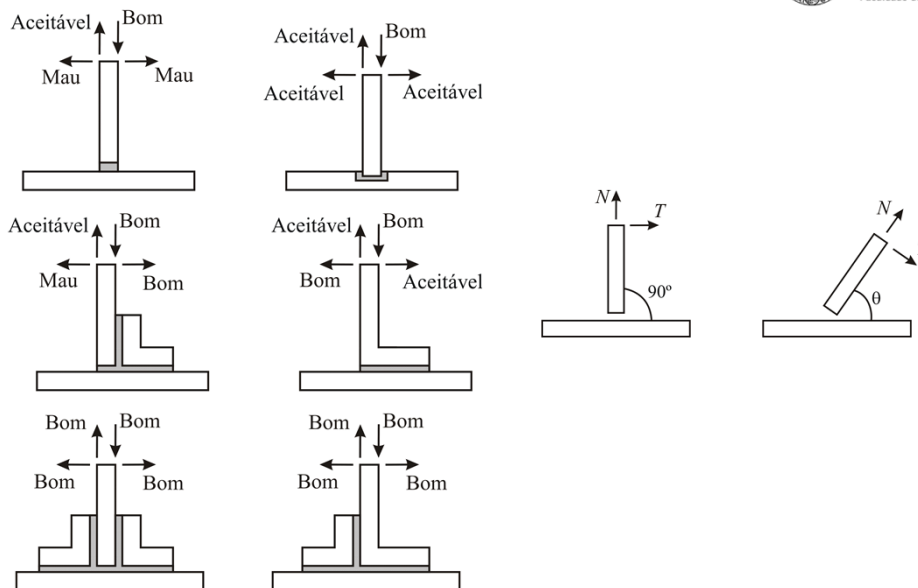
DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

91

## Projecto da junta – Juntas em T



**FEUP**  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia



Lucas da Silva

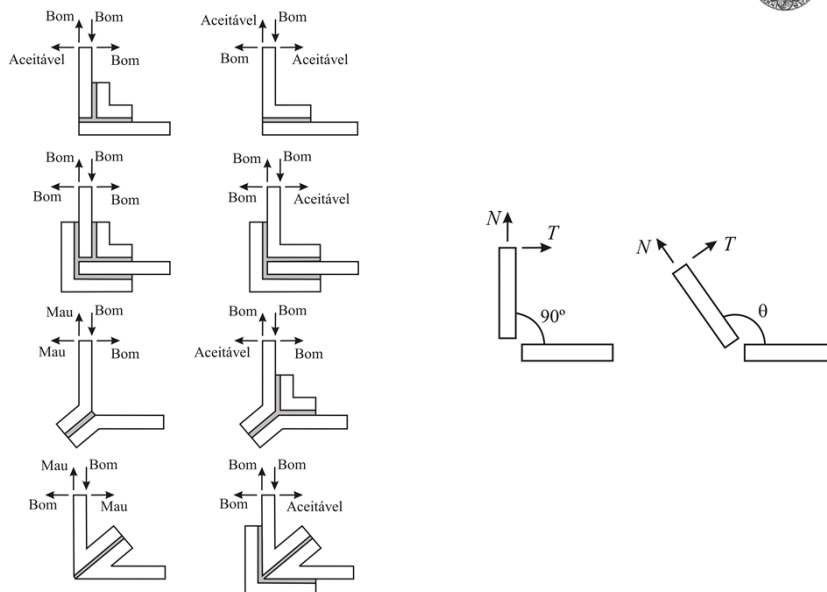
DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

92

## Projecto da junta – Juntas em canto



**FEUP**  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia



Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

93

Todos os projetos, de qq maneira, têm sempre 1 coisa em comum: tentar reduzir ao máximo as forças de arrancamento e solicitar ao máximo as de corte.



**FEUP**  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

1. Selecção do adesivo
2. Projecto da junta
3. Preparação da superfície
4. Fabrico da junta
5. Controlo do processo

Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

94

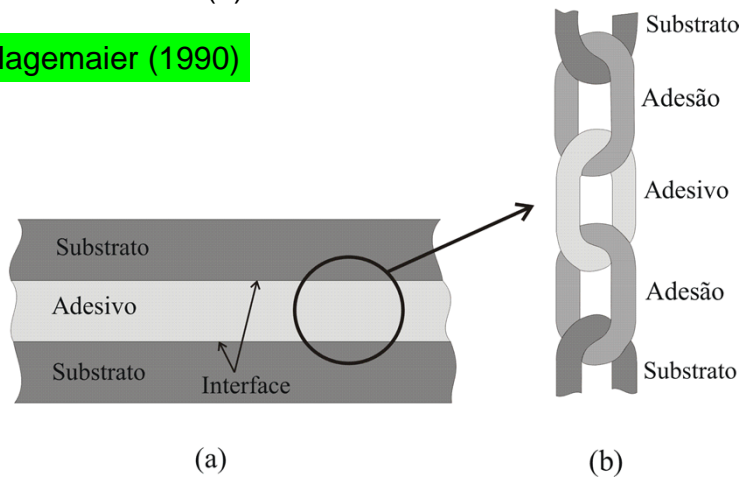
## Preparação da superfície – Superfícies



FEUP  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

Numa junta ideal o substrato deve ser o elo mais fraco. A junta adesiva (a) pode ser dividida em pelo menos cinco regiões que são similares a elos (b) numa corrente.

Hagemmaier (1990)



A preparação da superfície é para garantir que a rotura se dá neste e no substrato e não na adesão.

## Preparação da superfície Características que afectam a adesão

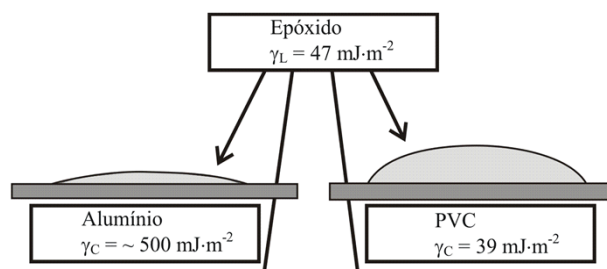


FEUP  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

### Contaminação

Os contaminantes (óleos, gorduras, impressões digitais, agentes desmoldantes, etc.) têm uma baixa energia superficial → diminui a molhagem → diminui a adesão

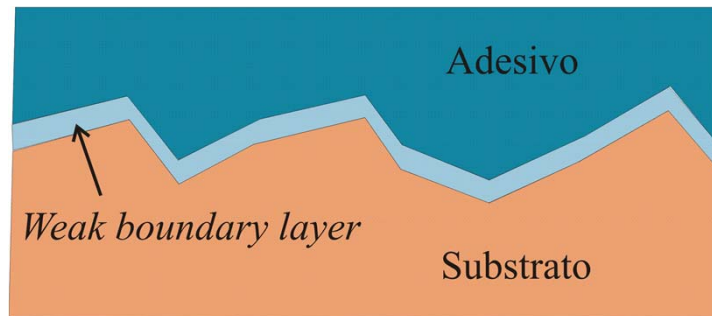
Contaminação reduz energia superficial.



## Weak boundary layer

Filmes contaminantes, camadas de óxidos, ferrugem, partículas, etc.

mal agarrados à superfície, fracos



## Qualquer tratamento contém:

1. Limpeza
2. Abrasão mecânica ou modificação química

**Processos passivos:** não alteram a química da superfície (removam substâncias que estão fracamente ligadas)

**Processos activos:** alteração química da superfície

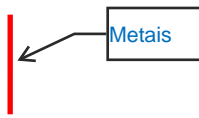
quando é necessária elevada durabilidade. --> no caso do Al criar à superfície um óxido qe esteja bem agarrado à superfície e qe seja resistente à corrosão para se manter intacto com o tempo. O prob da durabilidade de uma junta é mais a interface q o adesivo.

No caso dos polimeros e compostos os processos ativos são usados para aumentar a energia superficial

### Processos passivos

- Métodos abrasivos Ex: lixa, granalhagem, escova
- Solventes
- Detergentes

### Processos activos

- Ataque químico 
- Anodização
- Tratamento por chama, descargas de corona e plasmas

### Metais

#### Aço

Abrasão (granalhagem com alumina) +  
solvente (acetona)

#### Alumínio

Ataque químico com ácido sulfúrico +  
passagem por água + secagem

## Preparação da superfície – Avaliação

→ Não há norma e é difícil de quantificar.

Exemplo: water-break test

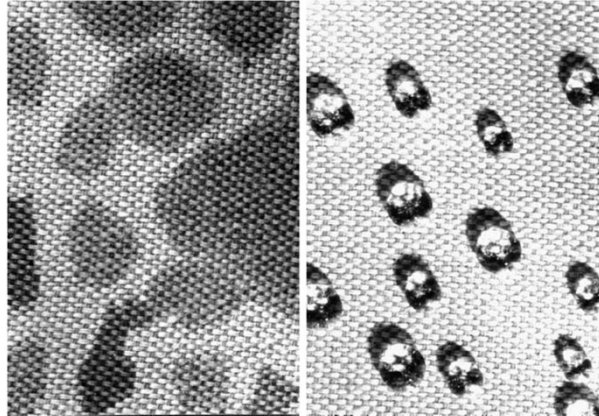
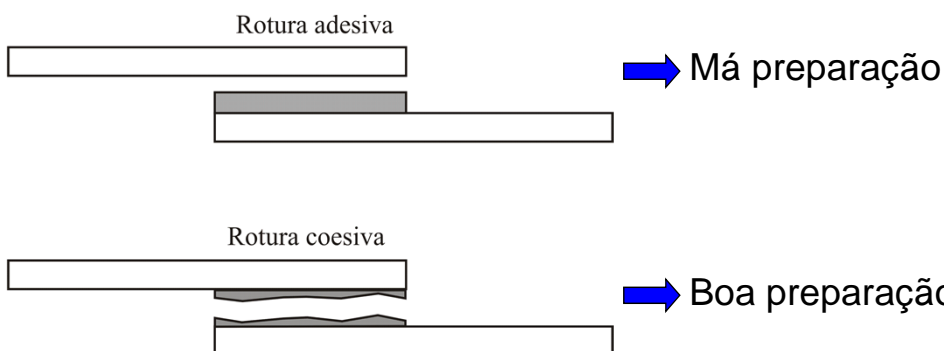


Figure 5.2 Example of water break free test for treated polymeric fabric. (Photo courtesy of Krüss USA).

Aplicar um spray à superfície. Se formar um filme uniforme, se se espaçar bom. Se formar gotículas é pq a E sup ainda é demasiado baixa.

## Preparação da superfície – Avaliação

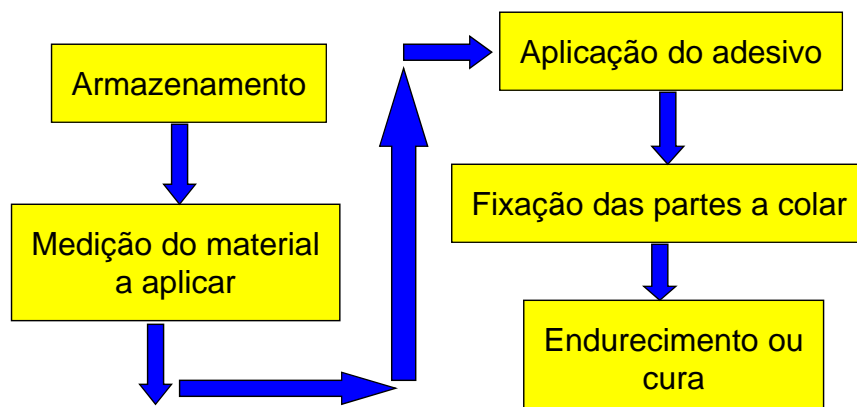
### Ensaio destrutivo



Em casos de estruturas qe pretendem elevada durabilidade o teste deve ser também feito passado algum tempo depois de fabricada a junta.

1. Selecção do adesivo
2. Projecto da junta
3. Preparação da superfície
- 4. Fabrico da junta**
5. Controlo do processo

### *Fabrico da junta – Etapas do fabrico*



## Fabrico da junta – Armazenamento



FEUP  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia



→ Temperatura ambiente



→ Baixa temperatura  
(frigorífico ou congelador)

Cuidados a ter:  
principalmente quando a resina e o endurecedor já estão pré-misturados. Porque se se mantiver os dois à T<sup>a</sup> ambiente eles já começam a endurecer, pq tem tempo de armazenamento mto reduzido. Deve-se por no frigorífico. Se estiverem separados podem estar à T<sup>a</sup> ambiente

## Fabrico da junta – Armazenamento



FEUP  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

### Efeito das condições ambientais

Van Twisk & Aker (1990)

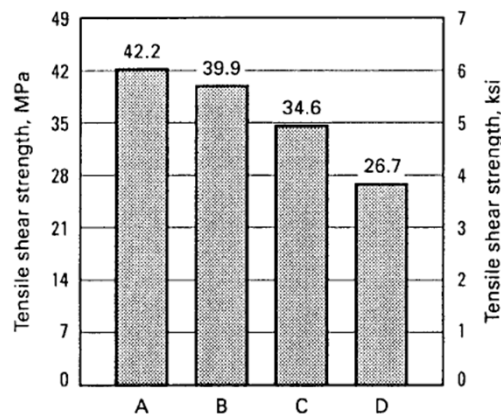


Figure 18.3 Effect of aging conditions on epoxy film adhesive: (a) fresh adhesives, (b) cured after aging 90 days at 24°C, (c) cured after 90 days at 32°C, (d) cured after 1 hr at condensing humidity.<sup>3</sup>

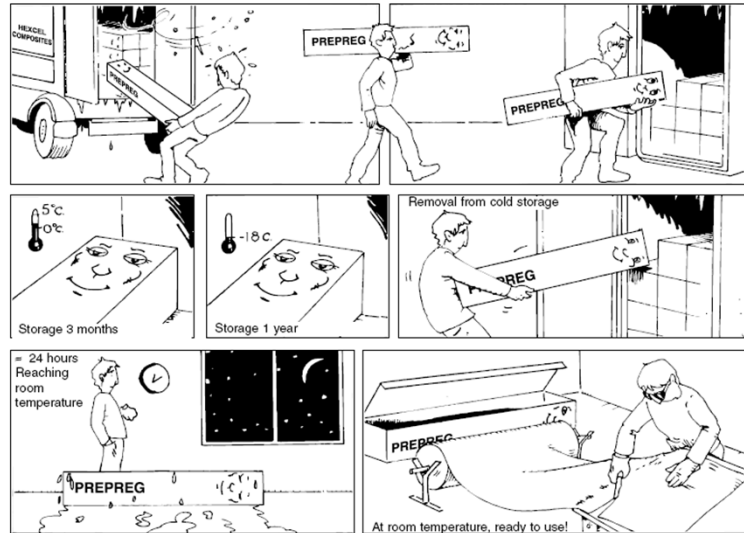
Self-life (tempo de armazenamento). Anda à volta dos 6 meses. A partir daí já não se pode usar

## Fabrico da junta – Armazenamento



**FEUP**  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

### Produtos refrigerados e congelados



Lucas da Silva

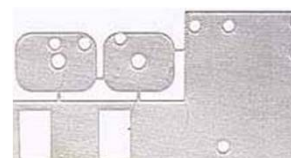
DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

107

## Fabrico da junta – Medição do material a aplicar



**FEUP**  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia



Especialmente importante qdo se tem o adesivo em pistola ou lata, É preciso medir para misturar a parte endurecedora e a parte da resina de acordo com a ficha do fabricante. Se se medir mal, o adesivo pode ficar demasiado duro ou não curar.

Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

108

## Líquido

- Espátula, rolo, cartucho, seringa, etc.

- Fáceis de aplicar
- Muito desperdício
- Qualquer geometria
- Boa molhagem

Só para trabalhar em espessuras?...



pq vaza facilmente para fora da junta

## Pasta

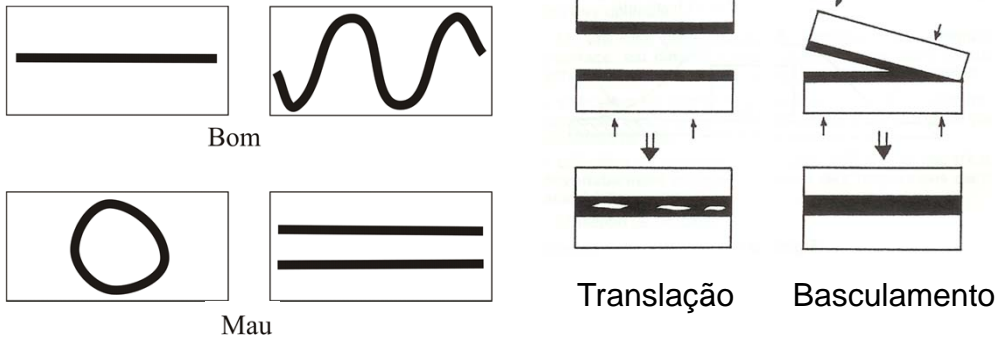
- Pistola, espátula
- Simples
- Pouco desperdício

Para grandes variações de espessura.



## Pasta

- Padrão de aplicação para evitar aprisionamento de ar



## Pasta

Sika (2009)



Em geral para a industria aeronautica pq se trata de areas enormes e planas.

## Filme

- Desperdício mínimo
- Não há mistura
- Fácil
- Boa reprodutibilidade
- Espessura uniforme
- Superfícies planas
- Caro



Depois de aplicar o adesivo:

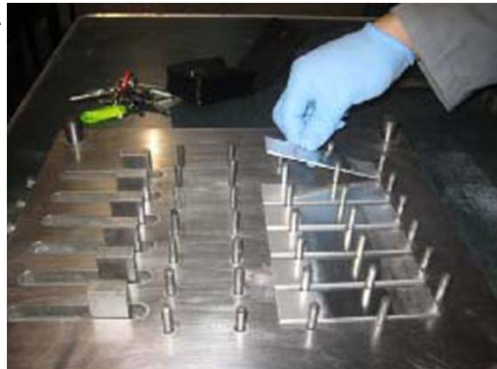
- Manter as superfícies em contacto
- Evitar variações de espessura
- Permitir uma **boa molhagem** dos ‘vales’
- **Evitar a formação de bolhas de gás** (adesivos que curam por condensação e.g. fenólicas, poliimidadas, etc). A pressão deve ser superior à pressão do vapor de água.

## Equipamento

Para manter as partes em contacto

- Grampos
- Moldes de fixação
- Molas
- Pesos

Molde usado no trabalho  
prático



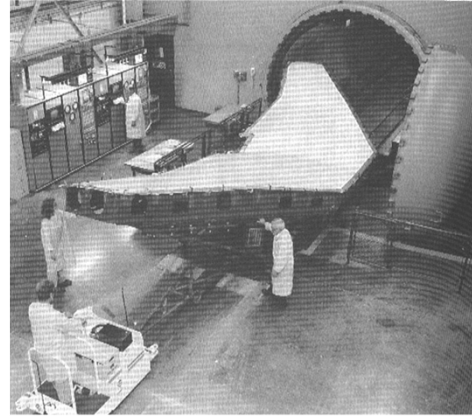
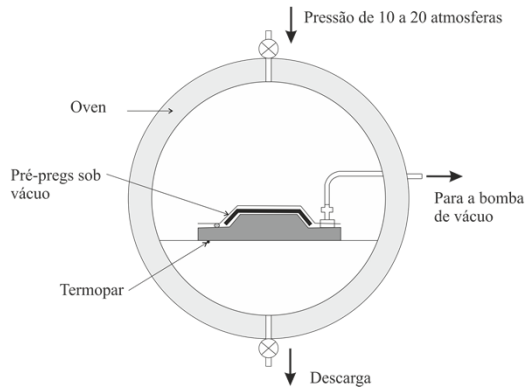
## Equipamento

- **Prensas**



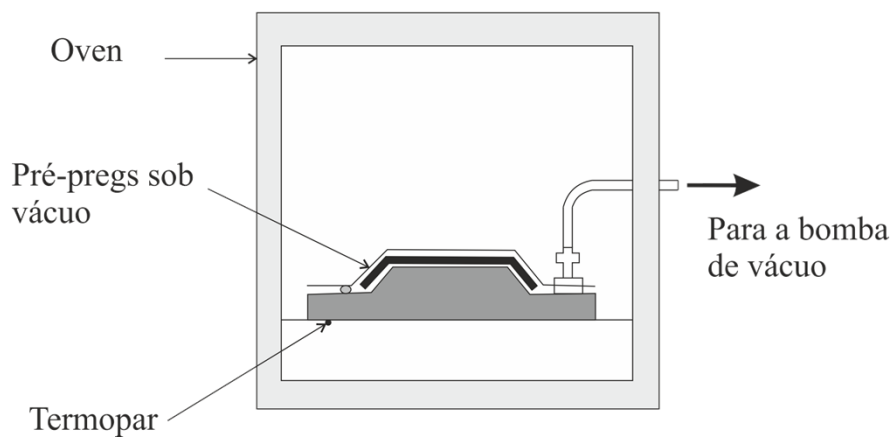
## Equipamento

- Autoclave



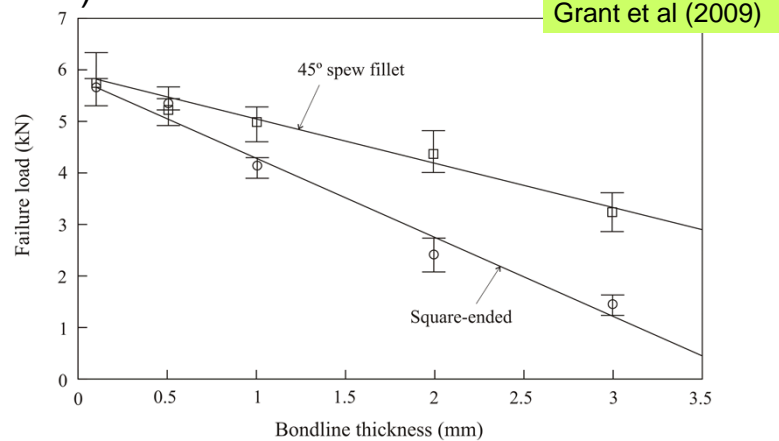
## Equipamento

- Saco de vácuo



## Controlo da espessura

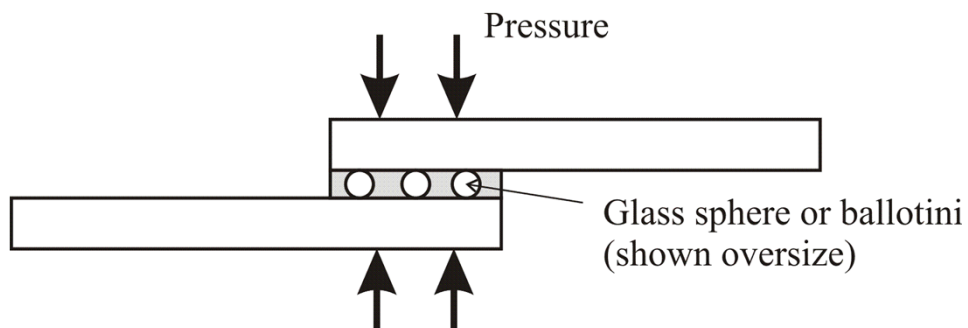
- Importante para desempenho mecânico da junta (0,1 a 0,2 mm)



Espessura da junta influencia a sua resistencia.

## Controlo da espessura

- Microesferas ou tecidos (filmes integrados)



## Controlo da espessura

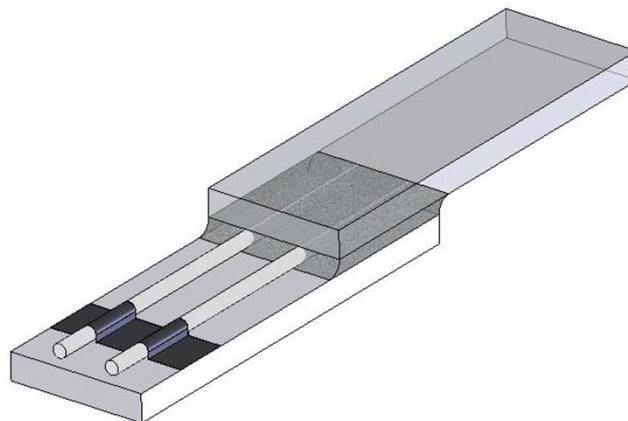
- **Calços** Método usado no trabalho prático (ver img do molde uns slides antes)



Calço (controla a espessura e o filete)

## Controlo da espessura

- Fios





### Cura

- Reacção química (a maioria dos adesivos estruturais)
- Perda de um solvente (e.g. cola branca da madeira)
- Arrefecimento desde o estado líquido (termofusíveis)



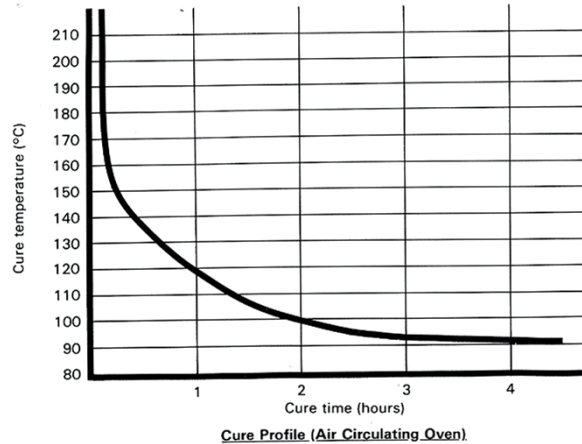
### Reacção química

- Dependendo dos adesivos, pode ser à temperatura ambiente ou a altas temperaturas
- Pode ser necessário pressão (e. g. poliimididas)
- Exemplos:
  - Epóxido → 120°C, 1h
  - Bismaleimida (para altas temperaturas) → 175°C, 2h + 230°C, 2h
- A cura é acelerada com a temperatura
- A  $T_g$  aumenta com a temperatura de cura mas atenua a degradação do adesivo

Temperatura de transição vítrea

## Reacção química

- O tempo de cura depende da temperatura



Permaabond  
ESP 110

Cuidado: (sai no teste) qdo o fabricante diz q é 100°C 1h, é quando o adesivo atinge 100°C não qdo o sensor de Tª do forno atinge 100°C. É preciso por 1 termometro na cola e só qdo a cola atinge os 100°C é qe se começa a contar 1h.

## Equipamento

- O que conta é a temperatura do adesivo
- Fornos (boa ventilação)
- Pratos quentes (prensa)



## *Fabrico da junta – Segurança e ambiente*



**FEUP**  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

Importante pq andamos a trabalhar com prod químicos. Quem faz isto uma vez por ano e não usa, ainda vá, mas todos os dias já n é bom.

- Usar luvas e máscaras
- Local bem ventilado, com extracção de ar
- Guardar em lugar seguro os solventes (facilmente inflamáveis)
- Reacção exotérmica → não usar espessuras grandes (o adesivo pode queimar)



**FEUP**  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

1. Selecção do adesivo
2. Projecto da junta
3. Preparação da superfície
4. Fabrico da junta
5. **Controlo do processo**

Propriedades físicas e químicas

Cor, viscosidade, *shelf life*, *working life*,  
densidade,  $T_g$ , etc...

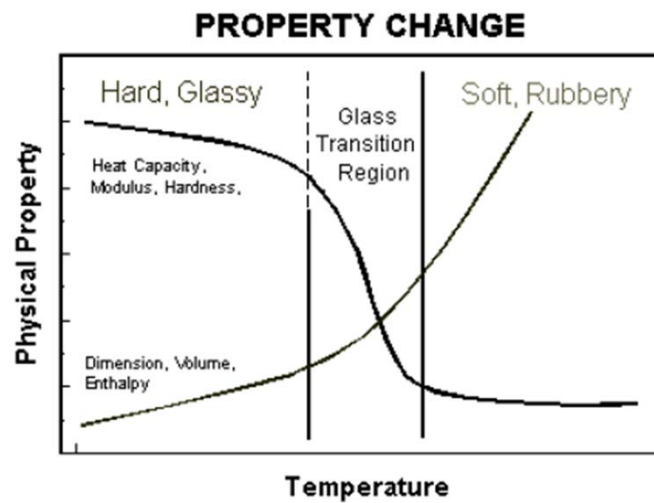
Propriedades mecânicas

Corte, tracção, compressão, tenacidade

Durabilidade

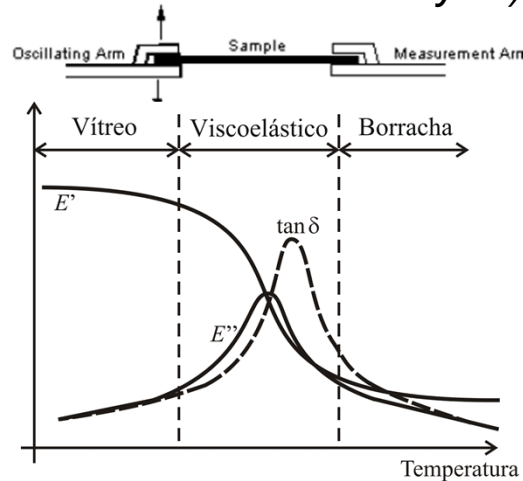
Temperatura, humidade

Propriedades físicas –  $T_g$



## Propriedades físicas – $T_g$

- DMA (*Dynamic Mechanical analysis*)



Método mais usado:  
consiste em fazer vibrar um provete de adesivo e medir o desfasamento da tensão e a deformação aplicada,  $\varphi$  tem a ver com o amortecimento. O amortecimento tem um pico na  $T_g$ .

## Propriedades mecânicas

- Tracção, compressão e corte
- Constantes elásticas ( $E$ ,  $G$ ,  $\nu$ )
- Resistência à deformação plástica (tracção, corte, compressão)
- Ductilidade (tracção, corte, compressão)
- Tenacidade ( $G_{Ic}$ ,  $G_{IIc}$ , etc.)

## Controlo do processo – Processo de colagem



**FEUP**  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

- Inspeção visual Ver a cor (se esta bem misturado), s os substratos estão bem alinhados
- Consistência
- Viscosidade
- Aprisionamento de ar (*air entrapment*)
- Não ultrapassar a *shelf life* Tempo qe se tem desde a mistura até à aplicação do adesivo. Os acrílicos é de segundos
- Laboratório e ferramentas devem estar limpos
- Temperatura de 18 a 32°C e humidade de 20 a 65%
- Controlo da espessura
- Controlo do processo de cura (temperatura, tempo e pressão)

## Controlo do processo – Ensaios destrutivos



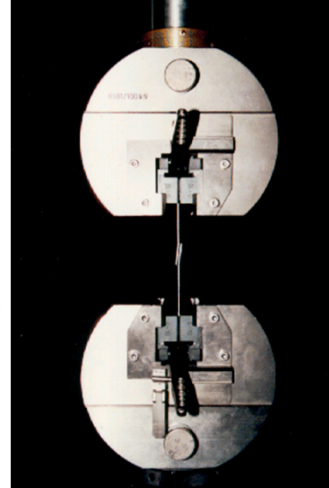
**FEUP**  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

- Juntas de simples sobreposição
- Juntas de dupla sobreposição
- *Peel*
- Clivagem
- Impacto
- Fadiga
- Fluência
- Atmosféricos

É o mais usado (falado alguns slides acima)

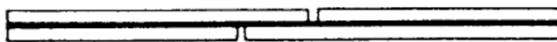
## Juntas de simples sobreposição (*Single lap joint*)

ASTM D 1002

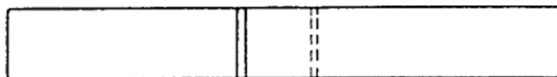


## Juntas de sobreposição modificada

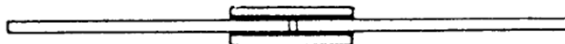
### Juntas de sobreposição laminada



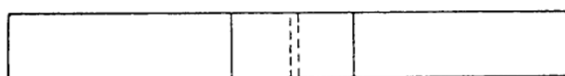
ASTM D 3165



### Juntas de dupla sobreposição



ASTM D 3528

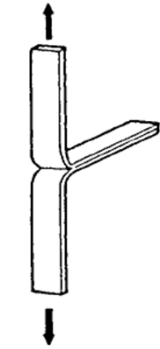


Peel (arrancamento)

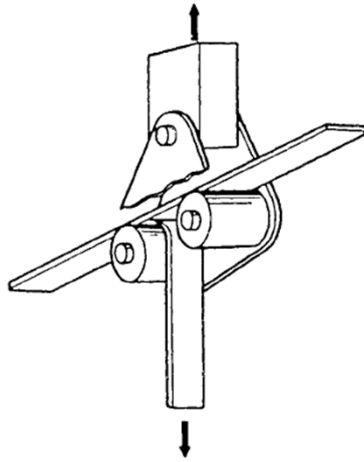
ASTM D 1781

ASTM D 3167

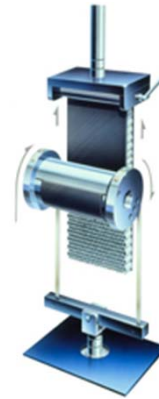
ASTM D 1876



T-peel



Floating roller peel



Climbing drum peel

Impacto

ASTM D 950

Parecido com o Charpy

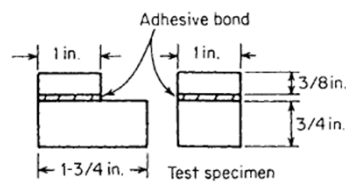
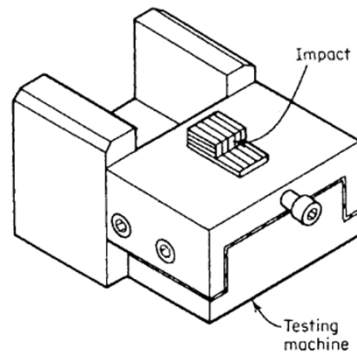


Figure 4.15 Impact test specimen. [From ASTM D 950]

## Impacto

ISO 11343

Muito usado na industria  
automovel

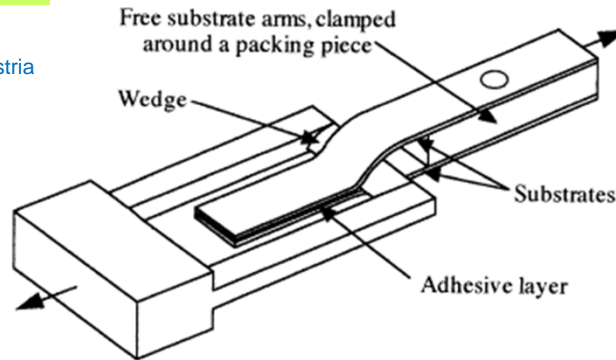


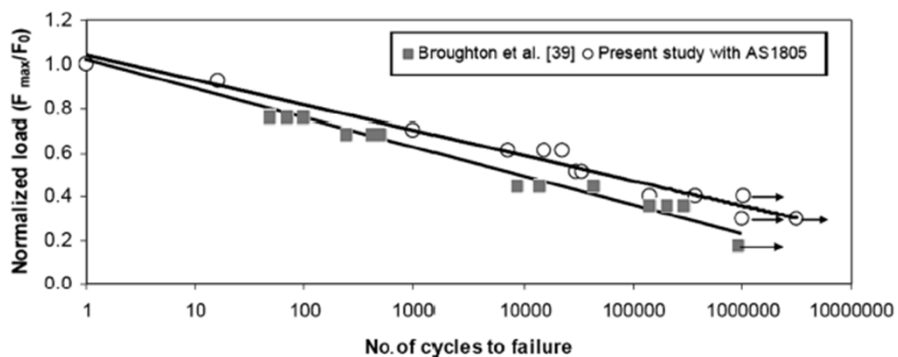
Fig. 26 Sketch of the impact wedge peel joint specimen

## Fadiga

Curva S-N e lei de Paris

ASTM D 3166

Banea et al. (2009)



## Fluência

ASTM D 2294

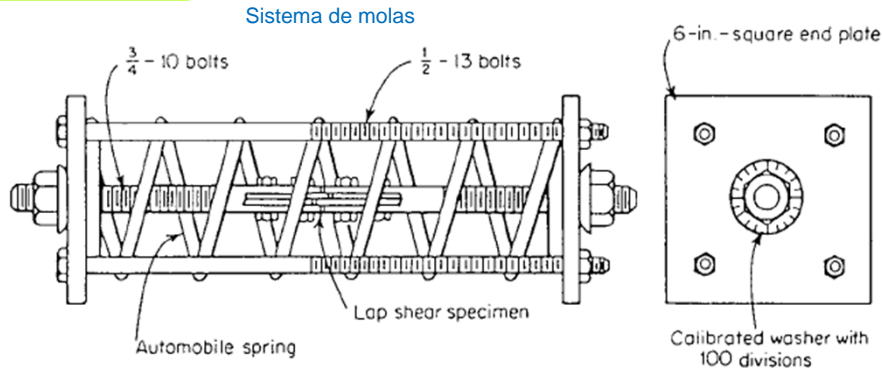
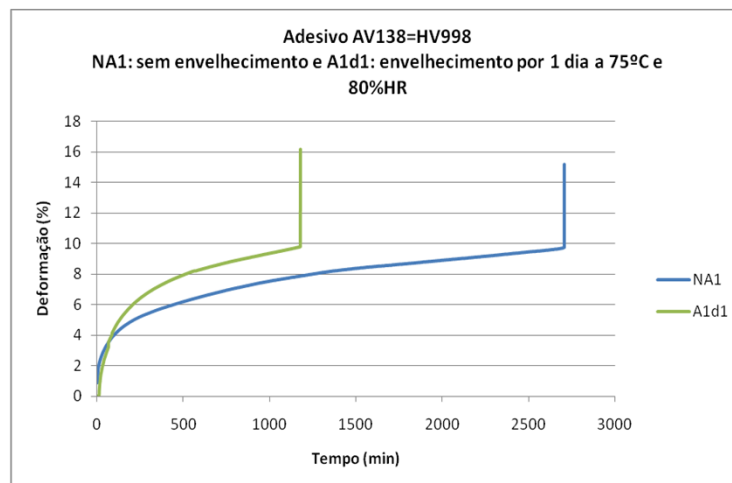


Figure 4.16 Compressive spring with tension creep-shear specimen.<sup>4</sup>

## Fluência

ASTM D 2294



## Atmosféricos

ASTM D 896

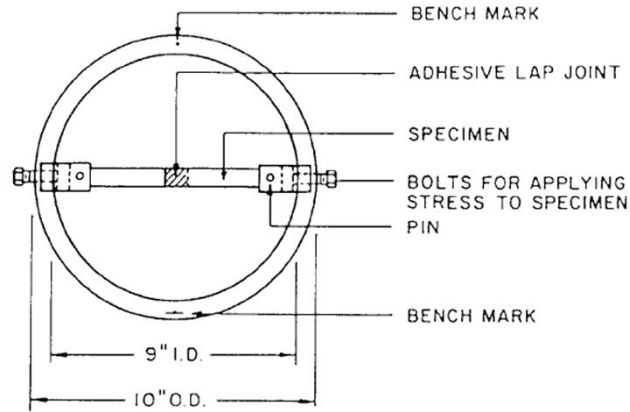


Figure 4.18 Alcoa stressing fixture for measuring simultaneous effect of stress and environmental conditions.<sup>18</sup>

Por a junta sob tensao e dp po la num ambiente corrosivo

## Atmosféricos – Boeing wedge test

ASTM D 3762

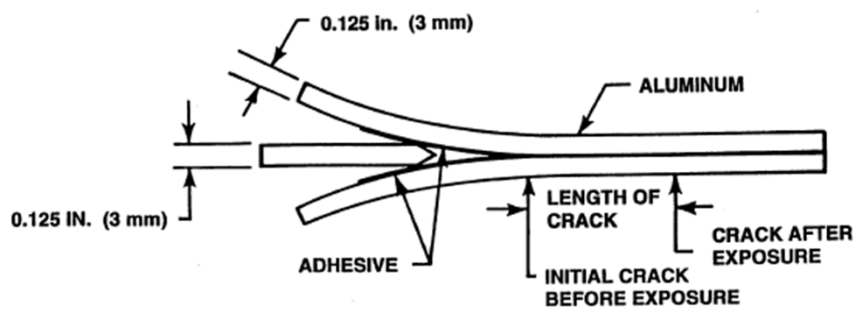


Fig. 1. Boeing wedge-crack durability test for bonded metal structures.

Usado na industria aeronautica. Poe-se uma cunha numa junta colada e ai mede se a propagação da fenda em função do tempo. Isto é mto bom para determinar a qualidade da preparação da superficie.

A cola estando num avião ou automovel montado, e qdo se qiser avaliar (periodicamente nos avioes por exemplo, a qualidade da ligação)

## Controlo do processo — Ensaio não destrutivo

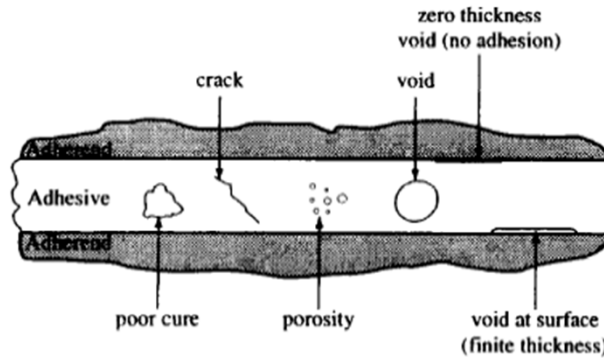


FEUP  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

### Defeitos

- Má adesão
- Má coesão
- Vazios, descolagens, porosidade

Como às vezes são difíceis de detetar, então é por isso qe muitas vezes a segurança a multiplicar por 2 e por 3.



Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

145

Este slide parece tar um bocado fora de contexto... isto são simplesmente defeitos do fabrico.

## Controlo do processo — Ensaio não destrutivo



FEUP  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

### Inspecção visual

- Poros, desalinhamentos, espessuras não uniformes, etc.

### Tap test

1º ensaio a ser descoberto.

- Batimentos na junta
- Som agudo → boa adesão
- Som grave → vazio ou descolagem
- Pode ser instrumentado

Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

146

## Ultra-sons

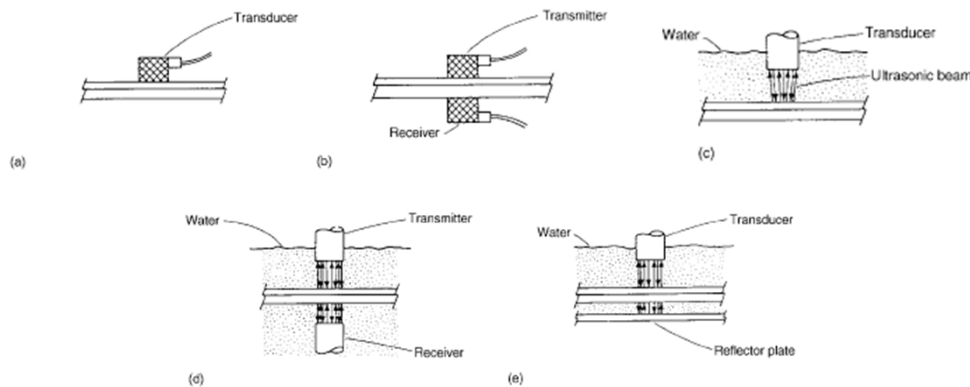


Figure 5.3 Ultrasonic inspection techniques. (a) Contact pulse echo with a search unit combining a transmitter and receiver. (b) Contact through transmission. Transmitter search unit on top and receiving search unit on bottom. (c) Immersion pulse echo with search unit (transmitter/receiver) and part inspected under water. (d) Immersion through transmission with both search units (transmitter and receiver) and part under water. (e) Immersion reflector plate. Same as (c) but each unit requires a reflector plate below the part being inspected.<sup>4</sup>

Este é o melhor dos ensaios não destrutivos. Quando as ondas encontram um defeito, aparece no scan.

## Emissão acústica

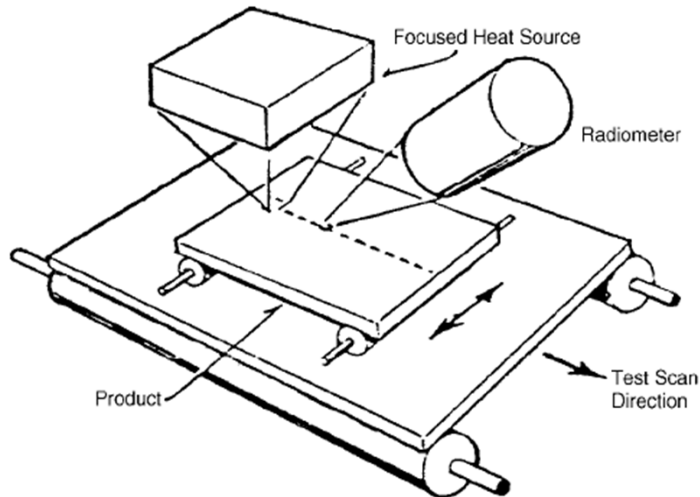
Só este é qe consegue detetar, em parte, a má adesão

- A junta deve ser carregada
- Regista-se as ondas de tensão emitidas por micro-fendas
- Método semi-destrutivo pode correr mal pq ao carregar a junta pode-se destruir a junta...

## Radiografia

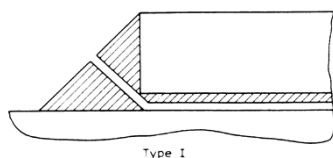
- Vazios ou descontinuidades
- Contraste melhorado com cargas metálicas

## Métodos térmicos

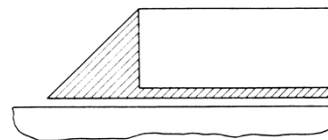


## Microscopia óptica

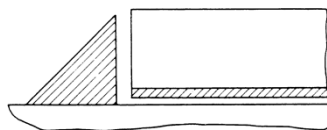
- Mecanismo de rotura
- Análise da superfície



Type I



Type II



Type III

O defeito não deixa passar o calor, deteta-se essa zona mais quente

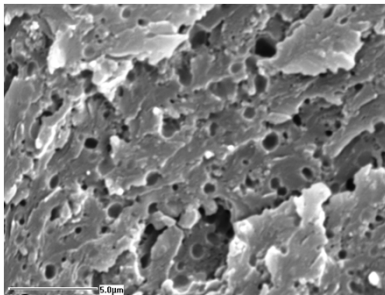


## Microscopia electrónica

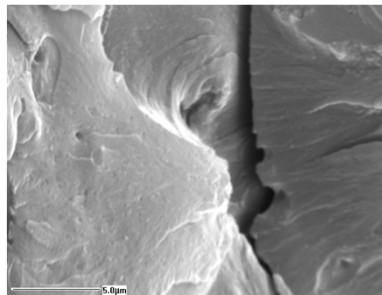
- Análise da superfície

da Silva & Adams (2005)

Superfície de fractura de um *toughened epoxy*



Superfície de fractura de um *untoughened epoxy*



Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

151

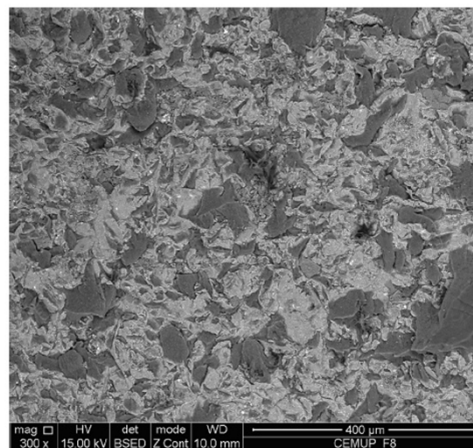
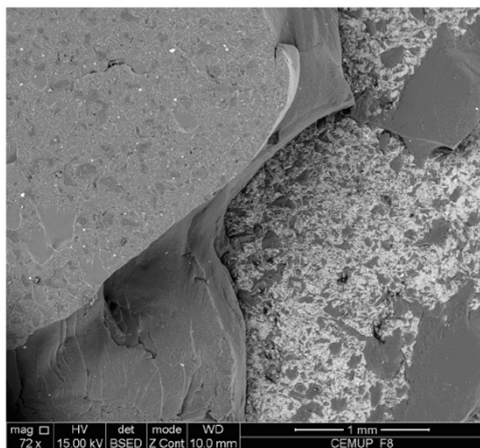
Muitas vezes a microscopia electrónica revela que ainda há vestígios de adesivo à superfície coisa que não se consegue ver com os olhos. Parece que foi na interface mas não é. Então não é rotura adesiva mas sim coesiva (ou mista).



## Microscopia electrónica

- Análise da superfície

Banea & da Silva (2010)



Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

152

Se tiver muito carbono é  
sinal q ainda tem polimero

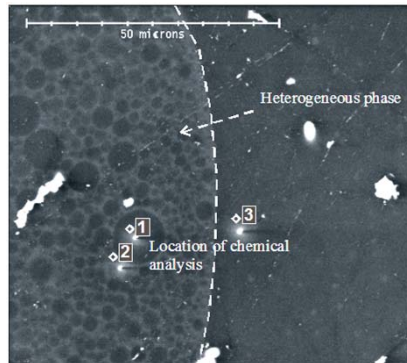
*Controlo do processo – Ensaios após rotura*



**FEUP**  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

## Espectroscopia fotoelectrónica por raio X (XPS ou ESCA) e espectrometria Auger (AES)

- Composição química da superfície



da Silva & Adams (2005)

Superfície de uma  
bismaleimida

Lucas da Silva

DEMEGI – SMPT – MIEM – PFII – Juntas adesivas estruturais

153