

## RELATÓRIO DE ESTÁGIO

Estudo de ligações em materiais compósitos

Elaborado por: Pedro João da Silva Lopes

Coordenador: Prof. António Torres Marques

Supervisor: Eng<sup>o</sup> José Esteves

Porto, 1998

621(047.3)  
LEM 1997/LOPp

# RELATÓRIO DE ESTÁGIO

Estudo de ligações em materiais compósitos

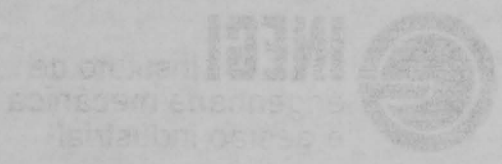
Elaborado por: Pedro João da Silva Lopes

Coordenador: Prof. António Torres Marques

Supervisor: Eng<sup>o</sup> José Esteves

Porto, 1998

CEMACOM



**UNIVERSIDADE DO PORTO**  
Faculdade de Engenharia  
**BIBLIOTECA M**  
N.º 73363  
CDU 621(047.3)  
Data 31.3.2005

Índice	27
<b>Capítulo I, Introdução</b>	<b>1</b>
1. Objectivos	2
2. Introdução	3
3. Apresentação do INEGI	4
3.1. Constituição e Objectivo	4
3.2. Organização	5
4. CEMACOM	6
4.1. Actividades	7
<b>Capítulo II, Os materiais compósitos</b>	<b>8</b>
1. Definição	9
2. O sistema de materiais compósitos	10
3. Tipos de materiais compósitos	11
3.1. As fibras	11
3.1.1. Principais fibras	12
3.2. A matriz orgânica	13
<b>Capítulo III, A pultrusão</b>	<b>14</b>
1. Princípio base	15
2. Vantagens da pultrusão	17
3. Aplicações	18
<b>Capítulo IV, Métodos de ligação de materiais compósitos</b>	<b>19</b>
1. Introdução	20
2. Ligações mecânicas	22
2.1. Ligações mecânicas ao corte	24
2.2. Ligações mecânicas em tracção	25





3. Ligações coladas.....	27
3.1. Algumas definições.....	27
3.2. Aspectos a ter em conta.....	28
3.3. Concepção das juntas coladas.....	29
3.4. Tipos de adesivos.....	33
3.5. Preparação de superfícies.....	35
3.6. Selecção de adesivos.....	36
<b>Capítulo V, Ensaaios práticos .....</b>	<b>38</b>
1. Introdução.....	39
1.1. Geometria dos provetes.....	40
1.2. Preparação das superfícies.....	41
1.3. O adesivo.....	41
1.4. Parâmetros da máquina de teste.....	41
1.5. Resultados.....	42
1.6. Conclusão.....	42

# CAPÍTULO I

Este estágio visa o estudo de ligações entre materiais compósitos em termos da sua resistência a vários tipos de solicitações.

Este estudo terá em atenção as ligações coladas, mas no entanto, outros tipos serão estudadas para uma melhor percepção das diferenças que possam existir entre os vários tipos de ligações, nomeadamente ligações rebitadas, aparafusadas e mistas.

Sendo o primeiro contacto com o mundo empresarial, tem este estágio também o propósito de servir de uma primeira oportunidade de tomar contacto com realidades bem diferentes daquelas que normalmente os alunos têm de lidar.

Com o crescente desenvolvimento dos compósitos a nível mundial, cresce também o interesse por tipos de ligação alternativas, e se até há relativamente pouco tempo, as ligações coladas eram apenas mais um modo de ligar compósitos, devido à sua pouca resistência e fiabilidade, hoje em dia e com o desenvolvimento de novas fórmulas químicas de colas de alta resistência, procura-se uma forte implantação deste método no campo dos processos de ligação para materiais compósitos e não só, começando por isso, a ser uma forte concorrente do tipo de ligações tradicionais.

Apesar do carácter experimental que envolve este trabalho, não deixa de ser uma realidade que em termos práticos, pode servir para o desenvolvimento de ligações entre materiais que cada vez mais têm uma forte expressão em aplicações industriais.

# 1. Objectivos

Este estágio visa o estudo de ligações entre materiais compósitos em termos da sua resistência a vários tipos de solicitações.

Este estudo terá em atenção as ligações coladas, mas no entanto, outros tipos de ligações serão estudadas para uma melhor percepção das diferenças que possam existir entre os vários tipos de ligações, nomeadamente ligações rebitadas, aparafusadas e mistas.

Sendo o primeiro contacto com o mundo empresarial, tem este estágio também o propósito de servir de uma primeira oportunidade de tomar contacto com realidades bem diferentes daquelas que normalmente os alunos têm de lidar.

Com o crescente desenvolvimento dos compósitos a nível mundial, cresce também o interesse por tipos de ligação alternativas, e se até há relativamente pouco tempo, as ligações coladas eram apenas mais um modo de ligar compósitos, devido à sua pouca resistência e fiabilidade, hoje em dia e com o desenvolvimento de novas fórmulas químicas de colas de alta resistência, procura-se uma forte implantação deste método no campo dos processos de ligação para materiais compósitos e não só, começando por isso, a ser uma forte concorrente do tipo de ligações tradicionais.

Apesar do carácter experimental que envolve este trabalho, não deixa de ser uma realidade que em termos práticos, pode servir para o desenvolvimento de ligações entre materiais que cada vez mais têm uma forte expressão em aplicações industriais.

## 2. Introdução

Neste trabalho será dada uma especial atenção ao estudo de ligações entre perfis pultrudidos em material compósito.

Estes perfis são obtidos através de um processo industrial com um grau de automação bastante elevado, permitindo obter perfis em material compósito (no caso fibras de vidro/resina), com uma relação qualidade preço bastante atraente. Este facto leva a que seja interessante ensaiar tipos de ligações com estes perfis, visto que o seu campo de utilização tem vindo a crescer bastante.

A optimização dos processos de ligação entre estes materiais é quase tão importante como os próprios materiais em si, pois delas depende o bom funcionamento e fiabilidade dos objectos compostos por este tipo de materiais.

Será neste trabalho, antes do estudo das ligações em si, referido de um modo sucinto, o processo da pultrusão, para uma melhor percepção do que são e como são obtidos os perfis pultrudidos em material compósito.

- ⇨ Aconselhamento especializado e desenvolvimento de protótipos
- ⇨ Pesquisa e desenvolvimento de projectos
- ⇨ Educação contínua

Para desenvolver estas actividades, o INEGI usa professores e investigadores da Universidade, assim como membros do seu próprio staff e investigadores assistentes sob programas de educação.



### 3. Apresentação do INEGI

#### 3.1. Constituição e Objectivo

O INEGI (Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial), é um instituto de inovação e de transferência de tecnologia, que forma uma interface entre a Faculdade de Engenharia do Porto, através do seu Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (DEMEGI), e o mundo industrial.

Foi criado em 1986 como uma organização sem fins lucrativos, reconhecido pelo governo Português como uma instituição de interesse público.

Os membros do INEGI são Universidade do Porto (UP), Associação das Industrias Metalurgicas e Mecânicas do Norte (AIMMN), Associação Portuguesa de Gestão e Engenharia Industrial (APGEI), Associação dos Departamentos de Engenharia Mecânica (ADEMEC) e Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial (INETI). No entanto, este instituto conta com o apoio de mais de oitenta empresas e outras instituições como membros associados.

O principal objectivo do INEGI é ser a ligação Universidade-Indústria, predominantemente nas áreas da Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, apontando ao desenvolvimento tecnológico da Indústria Portuguesa.

Para alcançar este objectivo são usados três mecanismos diferentes:

- ☛ Aconselhamento especializado e desenvolvimento de protótipos
- ☛ Pesquisa e desenvolvimento de projectos
- ☛ Educação contínua.

Para desenvolver estas actividades, o INEGI usa professores e investigadores da Universidade, assim como membros do seu proprio *staff* e investigadores assistentes sob programas de educação.

### 3.2. Organização

O INEGI é gerido por um conselho de administração, com uma organização descentralizada, constituída por um conjunto de unidades em correspondência directa com a estrutura DEMEGI.

Este conjunto de unidades (secções) é constituído por:

- ⇒ CEFAD
- ⇒ CEMAC
- ⇒ CEMACOM
- ⇒ CETECOFF
- ⇒ CETECOP
- ⇒ CETERM
- ⇒ CETRIB
- ⇒ LOME



## 4. CEMACOM

O CEMACOM é a unidade de estudo de materiais compósitos do INEGI, tem como parceiros algumas empresas de top no sector dos materiais compósitos.

As empresas industriais que trabalham para a defesa nacional são um exemplo.

Dentro de breves anos o CEMACOM, em conjunto com outros centros de investigação e desenvolvimento europeus, propõe-se em desenvolver um largo painel tecnológico, particularmente no campo das tecnologias de ponta de interesse industrial.

⇒ Testes de resistência ao fogo e emissões de fumos de materiais com matriz polimérica, determinação de energias caloríficas, níveis de toxicidade, tempos de ignição e tempos de extinção.

⇒ Ensaio mecânico-dinâmico-térmicos.

⇒ Testes não destrutivos, ultrasons, emissão acústica, interferometria laser.

⇒ Formação contínua (em colaboração com outros centros portugueses e europeus) nos domínios de análise de estruturas, concepção de processos e moldes, controlo de qualidade em materiais compósitos.

⇒ Participação em projectos portugueses e europeus como por exemplo o BRITE/EURAM, COMETT, EUCLID.



## 4.1. Actividades

- ⇒ Concepção de estruturas em materiais compósitos para estudos de simulação numérica.
- ⇒ Desenvolvimento de protótipos ou de pré-series, em associação com empresas.
- ⇒ Ensaio mecânicos (tracção, flexão, corte, fadiga,...), em todo o tipo de materiais.
- ⇒ Testes de resistência ao fogo e emissões de fumos de materias com matriz polimérica, determinação de energias caloríficas, níveis de toxicidade, tempos de ignição e tempos de extinção...
- ⇒ Ensaio mecânico-dinâmico-térmicos.
- ⇒ Testes não destrutivos, ultrasons, emissão acústica, interferometria laser.
- ⇒ Formação contínua (em colaboração com outros centros portugueses e europeus) nos dominios da análise de estruturas, concepção de processos e moldes, controlo de qualidade em materiais compósitos.
- ⇒ Participação em projectos portugueses e europeus como por exemplo o BRITE/EURAM, COMETT, EUCLID...



## CAPÍTULO II

O princípio de base na constituição dos materiais compósitos é simples: Por mistura de vários produtos elementares não miscíveis, forma-se um novo material com propriedades dos seus

### OS MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais compósitos são constituídos na sua generalidade por uma matriz orgânica e um por um reforço.

⇒ O reforço, que constitui a armadura ou esqueleto do material, assegura a resistência à tracção e rigidez. É por definição de natureza filamentar (fibras minerais ou orgânicas).

⇒ A matriz, liga as fibras que constituem o reforço, reparte por estas os esforços (resistência à flexão ou à compressão), assegura a protecção química e dá a forma ao produto. Ela é por definição um polímero ou uma resina orgânica.

No entanto podemos ainda encontrar outro tipo de produtos:

⇒ A interface, que assegura a compatibilidade entre o reforço e a matriz, transmite os esforços de um para o outro sem deslocamento relativo.

⇒ As cargas, trazem propriedades particulares ou complementares, que se podem traduzir num abaixamento do preço do material, dar cor ao produto, etc. Estas cargas aparecem sob a forma de partículas.

⇒ Aditivos específicos, catalisadores, aceleradores de polimerização, etc.

# 1. Definição de materiais compósitos

O princípio de base na constituição dos materiais compósitos é simples: Por mistura de vários produtos elementares não miscíveis, forma-se um novo produto cujas propriedades resultam da fusão das propriedades dos seus constituintes ou até numa superiorização das mesmas.

Os materiais compósitos são constituídos na sua generalidade por uma matriz orgânica e um por um reforço.

⇒ O reforço, que constitui a armadura ou esqueleto do material, assegura a resistência à tracção e rigidez. É por definição de natureza filamentar (fibras minerais ou orgânicas).

⇒ A matriz, liga as fibras que constituem o reforço, reparte por estas os esforços (resistência à flexão ou à compressão), assegura a protecção química e dá a forma ao produto. Ela é por definição um polímero ou uma resina orgânica.

No entanto podemos ainda encontrar outro tipo de produtos:

⇒ A interface, que assegura a compatibilidade entre o reforço e a matriz, transmite os esforços de um para o outro sem deslocamento relativo.

⇒ As cargas, trazem propriedades particulares ou complementares, que se podem traduzir num abaixamento do preço do material, dar cor ao produto, etc. Estas cargas aparecem sob a forma de partículas.

⇒ Aditivos específicos, catalisadores, aceleradores de polimerização, etc.

## 2. O sistema de materiais compósitos

A filosofia de concepção de materiais compósitos é diferente daquela dos materiais tradicionais; o compósito deve, ao nível das suas propriedades, adaptar-se às exigências de concepção, pois em geral a concepção do produto está desligada da constituição do mesmo.

Por exemplo, no caso dos plásticos que possuem características isotrópicas, a abordagem de concepção é próxima daquela usada no caso dos metais, no caso dos compósitos não é bem assim, pois é imperativo que a estrutura se identifique com a forma do produto de modo a garantir as melhores propriedades nas direcções críticas de trabalho.

O resultado é um sistema que inclui:

- ⇒ A natureza, a textura e a forma do reforço.
- ⇒ A quantidade de reforço.
- ⇒ A natureza da resina, das cargas e aditivos.
- ⇒ A qualidade da interface reforço-matriz.
- ⇒ A geometria da peça a realizar.
- ⇒ O processo de fabrico adequado.

### 3.1. As fibras

As fibras de reforço são caracterizadas pelo seu tex, que corresponde ao peso em gramas de um quilómetro de fio.

Elas podem aparecer sob várias formas:

- Em fios cortados, geralmente com 15 a 50 mm de comprimento, ou em fibras curtas com cerca de 2 mm de comprimento para serem dispersas na matriz.
- Em mania, que é formada por um aglomerado de fibras curtas ou em tecidos feitos a partir de fibras contínuas.
- Em roving, que é um novelo de fibras contínuas.

### 3. Tipos de materiais compósitos

Os materiais compósitos dividem-se em dois grandes grupos:

- **Os compósitos de grande difusão (GD)**
- **Os compósitos de elevada *performance* (HP)**

**Os compósitos de grande difusão (GD)**, são os mais correntes, são na maioria constituídos por compósitos de fibras de vidro/resinas de poliéster, com taxas de reforço em massa na ordem dos 30%. Eles representam o maior volume de emprego dos compósitos, devido à sua óptima relação qualidade/preço.

**Os compósitos de elevada *performance* (HP)**, embora ainda pouco desenvolvidos, são compósitos que têm um excelente comportamento mecânico aliado a uma baixa densidade, são na sua maioria constituídos por fibras de carbono ou aramidas com resinas de epoxy, e com taxas de reforço acima dos 50%, no entanto o seu preço tende a ser elevado.

#### 3.1. As fibras

As fibras de reforço são caracterizadas pelo seu *tex*, que corresponde ao peso em gramas de um quilómetro de fio.

Elas podem aparecer sob várias formas:

- Em fios cortados, geralmente com 15 a 50 mm de comprimento, ou em fibras curtas com cerca de 2 mm de comprimento para serem dispersas na matriz.
- Em manta, que é formada por um aglomerado de fibras curtas ou em tecidos feitos a partir de fibras contínuas.
- Em *roving*, que é um novelo de fibras contínuas.



### 3.1.1. Principais fibras

**VIDRO:** Obtida a partir de silício, a fibra mais usada nomeadamente nos compósitos GD.

Existem duas grandes famílias de polímeros:

**CARBONO:** Obtida a partir de poliácridonitrilo (PAN), de módulo de elasticidade elevado, é bastante usada nos compósitos HP.

Os Termoendurecíveis:

**ARAMIDAS:** Conhecida também como Kevlar, é obtida a partir de poliamidas aromáticas, é caracterizada pela sua leveza e alto módulo de elasticidade, pese embora seja bastante hidrofóbica.

**BORO e CARBONETOS de CÁLCIO:** De elevado preço e bastante difíceis de trabalhar, não são de uso corrente.

**SILÍCIO e QUARTZO:** Obtida por fusão de quartzo ou de silício é utilizada em compósitos de alta resistência térmica.

Neste quadro podemos ver algumas diferenças entre estes dois tipos de polímeros.

No entanto, quando se fala em materiais compósitos, na sua maioria, refere-se a materiais com matriz termoendurecível.

### 3.2. A matriz orgânica

A matriz é um polímero, ou seja, um composto macromolecular, uma molécula gigante obtida por repetição em cadeia de um monómero.

Existem duas grandes famílias de polímeros:

- Os Termoplásticos.
- Os Termoendurecíveis.

	<b>THERMOPLASTIQUES</b>	<b>THERMODURCISSABLES</b>
<b>Etat de base</b>	solide (prêt à l'emploi : polymérisée)	liquide visqueux (à polymériser)
<b>Stockage matière de base</b>	illimité	temps réduits
<b>Mouillabilité des renforts</b>	difficile	aisée
<b>Mouillage</b>	chauffage + refroidissement de fixation	chauffage continu
<b>Cycle</b>	court	plus long (polymérisation)
<b>CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES .</b>		
<b>Tenue au choc</b>	assez bonne	limitée
<b>Tenue thermique</b>	réduite (sauf nouveaux TP thermostables)	meilleure
<b>Conditions de mise en oeuvre</b>	bonnes + propreté	émanations pour méthode humide (allergie possible)
<b>Chutes et déchets</b>	recyclables	perdus

Neste quadro podemos ver algumas diferenças entre estes dois tipos de polímeros.

No entanto, quando se fala em materiais compósitos, na sua maioria, refere-se a materiais com matriz termoendurecível.

# CAPÍTULO III

A pultrusão é um processo automático que permite fabricar perfis de secção constante em material composto. O termo pultrusão vem da forma como os materiais compósitos são produzidos: uma combinação de materiais é puxada através de uma matriz.

## A PULTRUSÃO

Nestes casos, a matriz usada é tipicamente uma resina termoendurecível que reage quimicamente, criando uma reacção exotérmica, quando se fornece calor. O perfil resultante é formado ao ponto de não mais poder ser alterado dentro da sua gama de temperaturas de funcionamento, ao contrário dos termoplásticos.

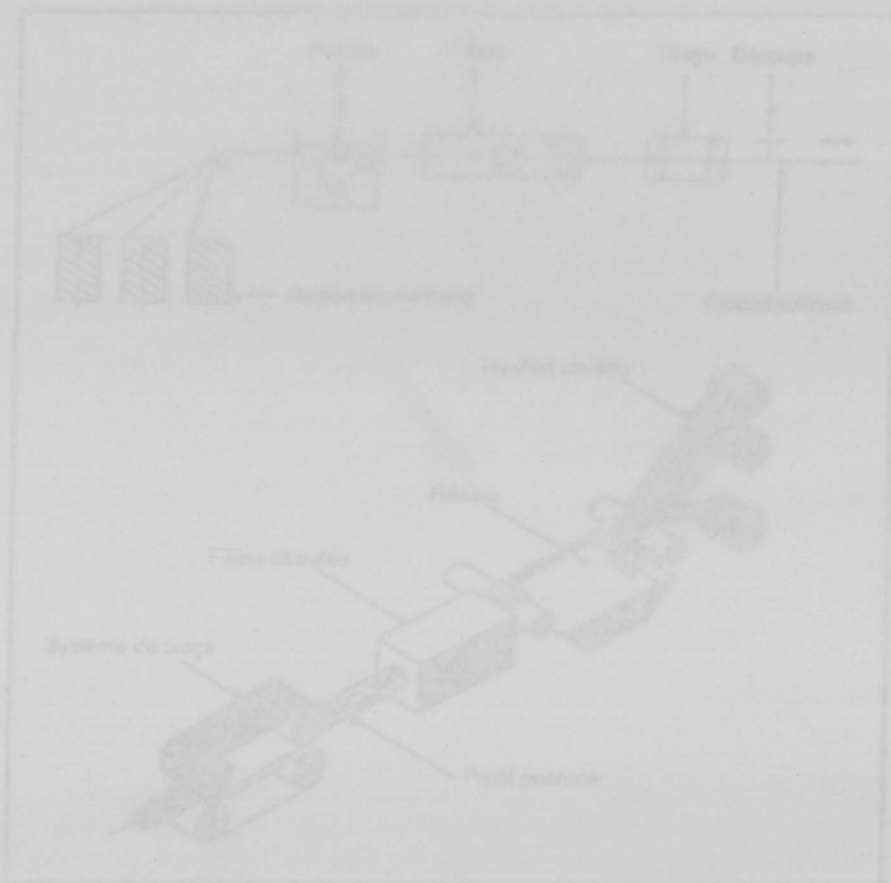


Fig1 - Esquema do processo de pultrusão



## 1. Princípio base

A pultrusão é um processo automático que permite fabricar perfis de secção constante em material composto. O termo pultrusão vem da forma como os perfis são obtidos, ou seja, uma compilação de materiais é puxada através de uma fieira.

Nestes casos, a matriz usada é tipicamente uma resina termoendurecível que reage quimicamente, criando uma reacção exotérmica, quando se fornece calor. O perfil resultante é formado ao ponto de não mais poder ser alterado dentro da sua gama de temperaturas de funcionamento, ao contrário dos termoplásticos.

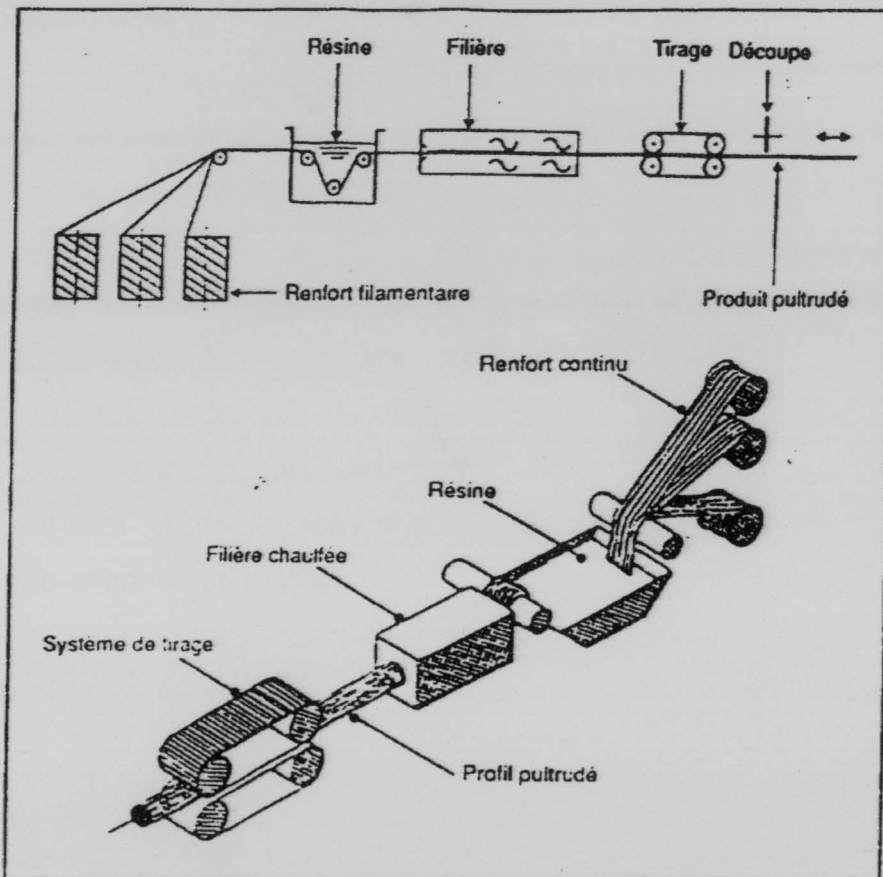


Fig1 – Esquema do processo de pultrusão

Perfis de formas e dimensões muito variáveis podem ser obtidos por este processo. As suas características podem ser adaptadas às condições de utilização através da escolha de diferentes tipos de reforços, sua quantidade, sua disposição e ainda pela qualidade da resina utilizada.

As velocidades de produção são bastante variáveis, de acordo com o perfil a fabricar. Elas estão compreendidas entre 0.2 e 2.5 m/min.

→ Formas complexas de reduzida espessura são possíveis de fabricar devido aos recentes avanços da tecnologia do processo. Seções ocas podem ser produzidas usando para o efeito mandrils.

→ Arame, madeira ou espumas, podem ser introduzidas no interior dos perfis de um modo contínuo.

→ Possibilidade de usar uma larga gama de reforços e formas com vários tipos de resinas termoendurecíveis.

→ Os perfis pultruídos podem ser tão grandes quanto o necessário, pois pode produzir-se equipamento para o efeito.

→ A fiara pode ser reversível, visto que é na zona da entrada que ela sofre o maior desgaste. Quando essa zona se desgasta, a fiara pode ser virada, duplicando assim a sua vida útil.

## 2. Vantagens da pultrusão

⇒ Qualquer comprimento transportável pode ser produzido devido à natureza axial do processo. É o caso de cabo de fibras ópticas de pequeno diâmetro com cerca de 2.2 km de comprimento, que pode ser enrolado após a pultrusão.

⇒ Formas complexas de reduzida espessura são possíveis de fabricar devido aos recentes avanços da tecnologia do processo. Secções ocas podem ser produzidas usando para o efeito mandris.

⇒ Arame, madeira ou espumas, podem ser introduzidas no interior dos perfis de um modo contínuo.

⇒ Possibilidade de usar uma larga gama de reforços e formas com vários tipos de resinas termoendurecíveis.

⇒ Os perfis pultrudidos podem ser tão grandes quanto o necessário, pois pode produzir-se equipamento para o efeito.

⇒ A fieira pode ser reversível, visto que é na zona de entrada que ela sofre o maior desgaste. Quando essa zona se desgasta, a fieira pode ser virada, duplicando assim a sua vida útil.



### 3. Aplicações

A versatilidade do processo permitiu à pultrusão penetrar em mercados tais como o de transportes terrestres, construção, aplicações marítimas, equipamento resistente à corrosão, aeronáutica, etc.

Hoje em dia pode-se produzir por pultrusão, todo o tipo de perfis de secção constante.

Os produtos pultrudidos além de poderem ter um preço competitivo em relação aos materiais tradicionais, têm também melhor desempenho num vasta gama de propriedades, assumindo-se assim cada vez mais como uma alternativa a considerar, quando se pretende usar perfis para uma qualquer aplicação.

## CAPÍTULO IV

O bom desempenho de uma estrutura, ou de um determinado componente, está fortemente dependente do comportamento de cada junta que contém.

### MÉTODOS DE LIGAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

pelos processos de fabrico, as exigências de controle, de acessibilidade, de reparação e transporte, fazem com que as juntas sejam inevitáveis em qualquer tipo de estrutura.

Dois técnicas de base estão à disposição dos projectistas para efectuar uniões entre dois compósitos:

- Ligações mecânicas
- Ligações coladas
- Ligações mistas (combinação das duas anteriores)

Algumas das propriedades de cada uma destas técnicas estão descritas no quadro abaixo:

	Mechanical	Bonded	Combined
Stress concentration at joint	High	Medium	Medium
Strength/weight ratio	Low	Medium	Medium
Seal (water tightness)	No	Yes	Yes
Thermal insulation	No	Yes	No
Electrical insulation	No	Yes	No
Aesthetics (smooth joints)	Bad	Good	Bad
Fatigue endurance	Bad	Good	Good
Sensitive to post loading	No	Yes	No
Disassembly	Possible	Impossible	Impossible
Inspection	Easy	Difficult	Difficult
Heat or pressure required	No	Yes/No	Yes/No
Tooling costs	Low	High	Low
Time to develop full strength	Immediate	Long	Long

# 1. Introdução

O bom desempenho de uma estrutura, ou de um determinado componente, está fortemente dependente do comportamento de cada junta que contém.

Idealmente, uma estrutura deveria ser concebida sem juntas, visto que estas últimas são uma fonte de fragilidade. Na prática, as limitações das dimensões dos compósitos, impostas pelos processos de fabrico, as exigências de controle, de acessibilidade, de reparação e transporte, fazem com que as juntas sejam inevitáveis em qualquer tipo de estrutura.

Duas técnicas de base estão à disposição dos projectistas para efectuar uniões entre dois compósitos:

- Ligações mecânicas
- Ligações coladas
- Ligações mistas (combinação das duas anteriores).

Algumas das propriedades de cada uma destas técnicas estão descritas no quadro abaixo:

	<i>Mechanical</i>	<i>Bonded</i>	<i>Combined</i>
Stress concentration at joint	High	Medium	Medium
Strength/weight ratio	Low	Medium	Medium
Seal (water tightness)	No	Yes	Yes
Thermal insulation	No	Yes	No
Electrical insulation	No	Yes	No
Aesthetics (smooth joints)	Bad	Good	Bad
Fatigue endurance	Bad	Good	Good
Sensitive to peel loading	No	Yes	No
Disassembly	Possible	Impossible	Impossible
Inspection	Easy	Difficult	Difficult
Heat or pressure required	No	Yes/no *	Yes/no *
Tooling costs	Low	High	Low
Time to develop full strength	Immediate	Long	Long

Neste quadro podemos ver algumas das vantagens e desvantagens de cada um dos processos:

<i>Mechanical connections</i>	
<i>Advantages</i>	<i>Disadvantages</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requires no special surface preparation</li> <li>• Can be disassembled</li> <li>• Ease of inspection.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Low strength to stress concentrations</li> <li>• Special practices required in assembly, results in time consuming assembly</li> <li>• Fluid and weather tightness normally requires special gaskets or sealants</li> <li>• Corrosion of metallic fasteners.</li> </ul>
<i>Bonded connections</i>	
<i>Advantages</i>	<i>Disadvantages</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• High joint strength can be achieved</li> <li>• Low part count</li> <li>• Fluid and weather tightness</li> <li>• Potential corrosion problems are minimized</li> <li>• Smooth external surfaces.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cannot be disassembled</li> <li>• Requires special surface preparation</li> <li>• Difficulty of inspection</li> <li>• Temperature and high humidity can affect joint strength.</li> </ul>
<i>Combined connections</i>	
<i>Advantages</i>	<i>Disadvantages</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bolts provide support and pressure during assembly and curing</li> <li>• Growth of bondline defects is hindered by bolts.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Structurally bolts act as backup elements. In an intact joint, bolts carry no load.</li> </ul>

## 2. Ligações mecânicas

As ligações mecânicas são normalmente do tipo aparafusado ou rebitado. São classificadas de acordo como a força na junta está a actuar, ou seja, em corte, tracção, ou uma combinação das duas.

No projecto de juntas mecânicas, há que ter em atenção os seguintes parâmetros:

### Parâmetros geométricos

⇒ **Geometria** (largura, espaçamentos, distância ao bordo, distância aos lados, tipo de furo, etc)

⇒ **Diâmetro do furo e tamanho do parafuso**

⇒ **Tipo de junta** (simples, dupla, etc)

⇒ **Espessura do compósito**

⇒ **Condições de carregamento** (tracção, compressão, corte, etc)

### Parâmetros do material

⇒ **Tipo e forma da fibra** (unidireccional, manta, tecido, etc)

⇒ **Tipo de resina**

⇒ **Orientação da fibra**

⇒ **Tipo de construção** (laminado, sandwich, etc)

⇒ **Sequência de empilhamento**

⇒ **Percentagem volúmica de fibra**

⇒ **Material do ligador** (tipo de material do parafuso ou rebite)

### **Parâmetros do ligador**

⇒ **Tipo de ligador** (parafuso, rebite, etc)

⇒ **Força de aperto**

⇒ **Presença de anilhas**

⇒ **Tolerâncias do ligador/furo**

No entanto diferenças profundas podem ser estabelecidas no que respeita a ligações mecânicas a actuar em corte e em tracção.

Estas diferenças podem ser estudadas nas secções 2.1 e 2.2 respectivamente.

⇒ Rotura da secção total (fig. a)

⇒ Rotura por esmagamento do furo (fig. b)

⇒ Rotura da secção do furo (fig. c)

⇒ Rotura do ligador (fig. d)





## 2.1. Ligações mecânicas ao corte

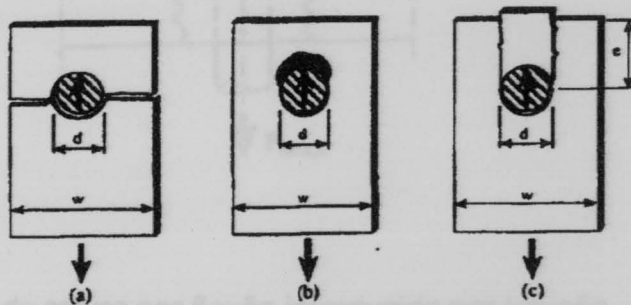
No caso das juntas a actuar em corte, as ligações mecânicas podem ser divididas em ligações carregadas concentricamente e ligações carregadas excentricamente.

Uma ligação carregada concentricamente é aquela em que a linha de acção da carga aplicada, passa pelo centróide do grupo ligador. Neste caso, no grupo ligador apenas actua a força aplicada ao conjunto.

Uma ligação carregada excentricamente é aquela em que a linha de acção da carga aplicada não passa pelo centróide do grupo ligador. Neste caso, além da força aplicada ao conjunto, o grupo ligador irá sofrer também a acção de um momento torsor.

Tipos de rotura em ligações ao corte:

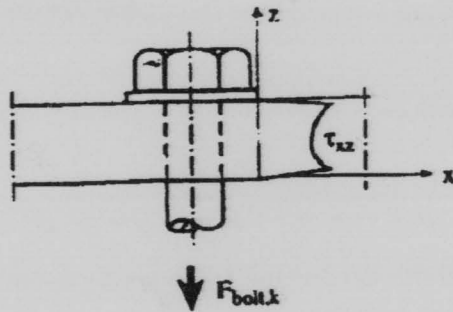
- ⇒ Rotura da secção total (fig. a)
- ⇒ Rotura por esmagamento do furo (fig. b)
- ⇒ Rotura da secção do furo (fig. c)
- ⇒ Rotura do ligador (fig. d)



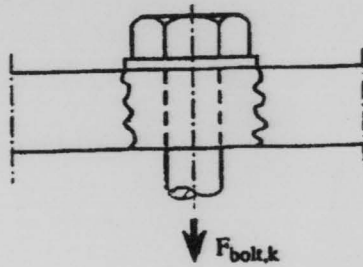
## 2.2. Ligações mecânicas em tracção

Podemos seguidamente ver alguns tipos de rotura quando temos ligações deste tipo:

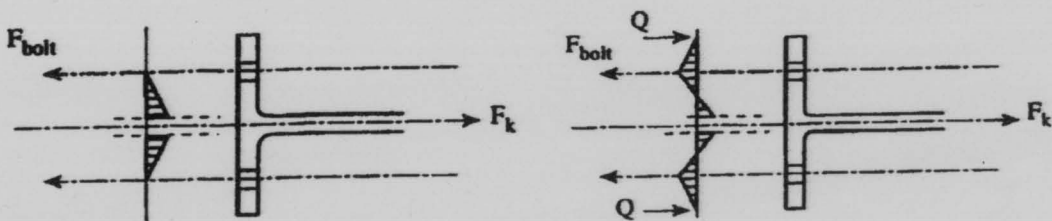
Neste caso, devido ao esforço de tracção aplicado ao conjunto, a rotura deu-se numa zona limitrofe ao ligador.



Neste caso a rotura dá-se no material directamente afectado pela anilha do ligador.



Dois casos típicos de rotura por flexão introduzida por tracção

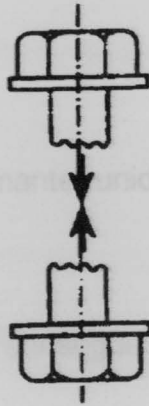


## Caso de rotura do ligador

### 3.1. Algumas definições

**Adesivo** ⇒ substância capaz de manter unidos dois materiais por aderência (sinónimo do termo "cola")

**Aderência** ⇒ estado pelo qual se mantêm unidos dois materiais através de forças interfaciais.



**Adesão** ⇒ fenómeno químico, físico ou físico-químico que produz aderência

**Coesão** ⇒ conjunto de forças resultantes das ligações múltiplas susceptíveis de associar entre elas as diferentes partes de um líquido ou de um sólido.

**Molhabilidade** ⇒ aptidão de um adesivo se espalhar numa superfície.

**Estado superficial** ⇒ características micro e macro-geométricas das superfícies a colar.

**Substrato** ⇒ material a colar com o adesivo.

### 3. Ligações coladas

#### 3.1. Algumas definições

**Adesivo** ⇒ substância capaz de manter unidos dois materiais por aderência (sinónimo do termo "cola").

**Aderência** ⇒ estado pelo qual se consegue manter unidos dois materiais através de forças interfaciais.

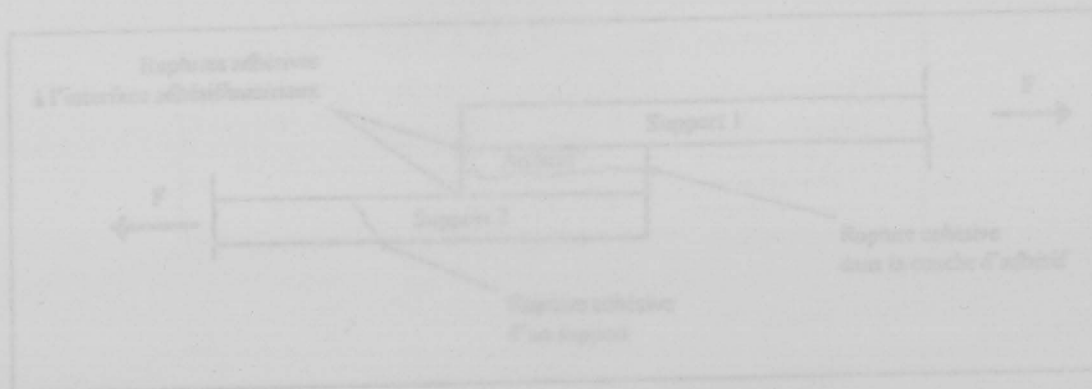
**Adesão** ⇒ fenómeno químico, físico ou físico-químico que produz aderência

**Coesão** ⇒ conjunto de forças resultantes das ligações múltiplas susceptíveis de associar entre elas as diferentes partes de um líquido ou de um sólido.

**Molhabilidade** ⇒ aptidão de um adesivo se espalhar numa superfície.

**Estado superficial** ⇒ características micro e macro-geométricas das superfícies a colar.

**Substrato** ⇒ material a colar pelo adesivo.



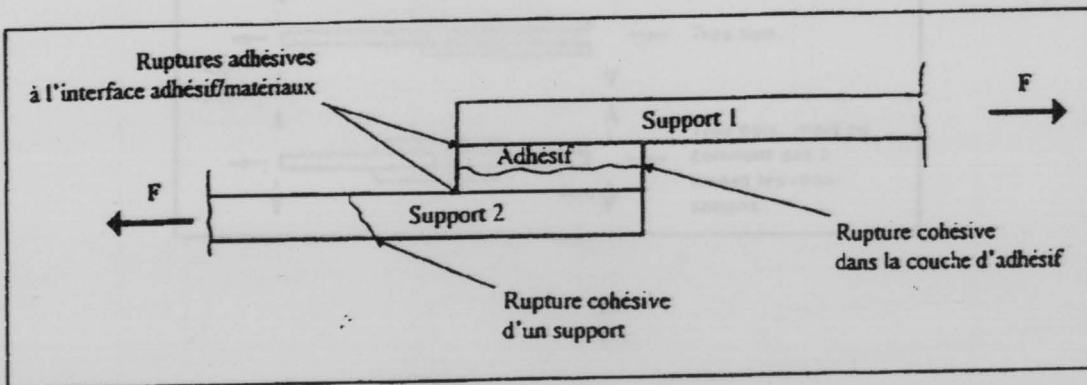
### 3.2. Aspectos a ter em conta

- ⇒ Molhabilidade das superfícies a colar.
- ⇒ Compatibilidade físico-química entre o adesivo e as superfícies a colar.
- ⇒ Coesão do adesivo deve ser superior aos esforços aplicados à junta.

A eficiência de uma junta colada depende essencialmente de três parâmetros:

- ⇒ A adesão entre o adesivo e os substratos.
- ⇒ A coesão do adesivo após o seu endurecimento.
- ⇒ A geometria da junta.

As diferentes possibilidades de rotura de juntas coladas estão descritas pela seguinte figura:

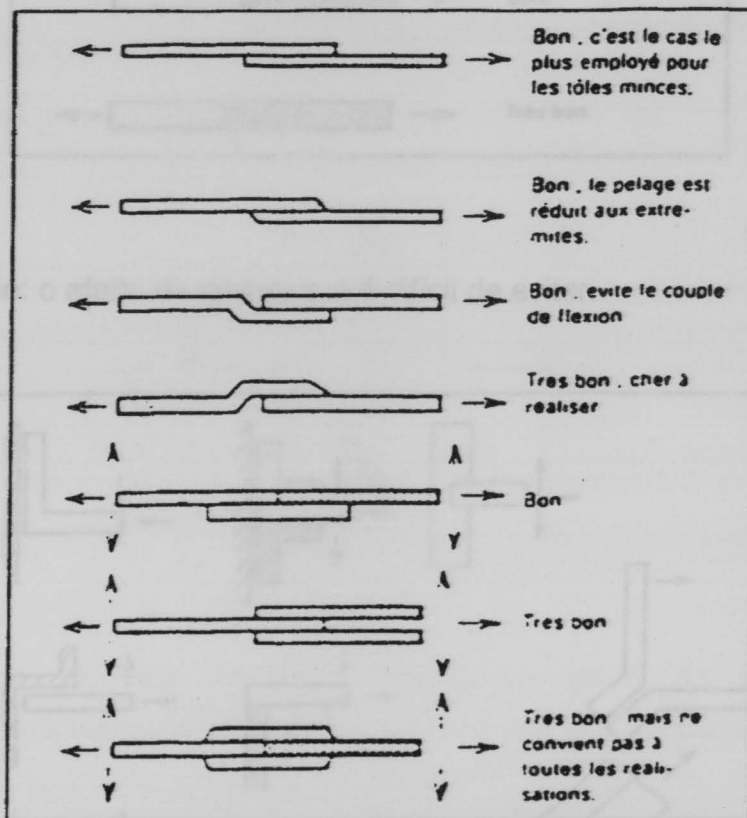


### 3.3. Concepção das juntas coladas

Como a resistência mecânica dos adesivos é geralmente menor à resistência dos materiais que constituem as partes a ligar, então a superfície de contacto entre as duas peças tem um caracter extremamente importante, pois dela vai depender muito a resistência da referida junta.

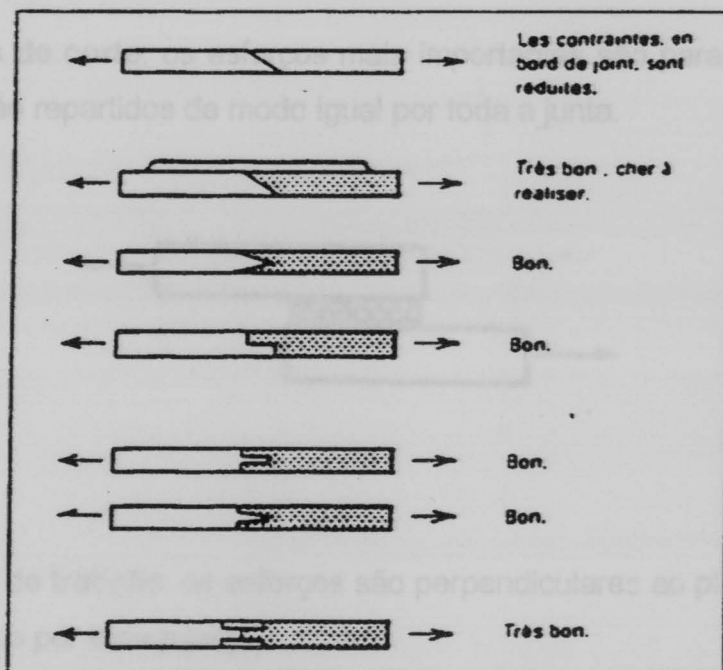
No caso das juntas coladas há vários tipos de configurações que se podem utilizar, no entanto podem-se reduzir a três categorias:

⇒ **Por sobreposição:** simples e sólidas, utilizadas para superfícies planas.

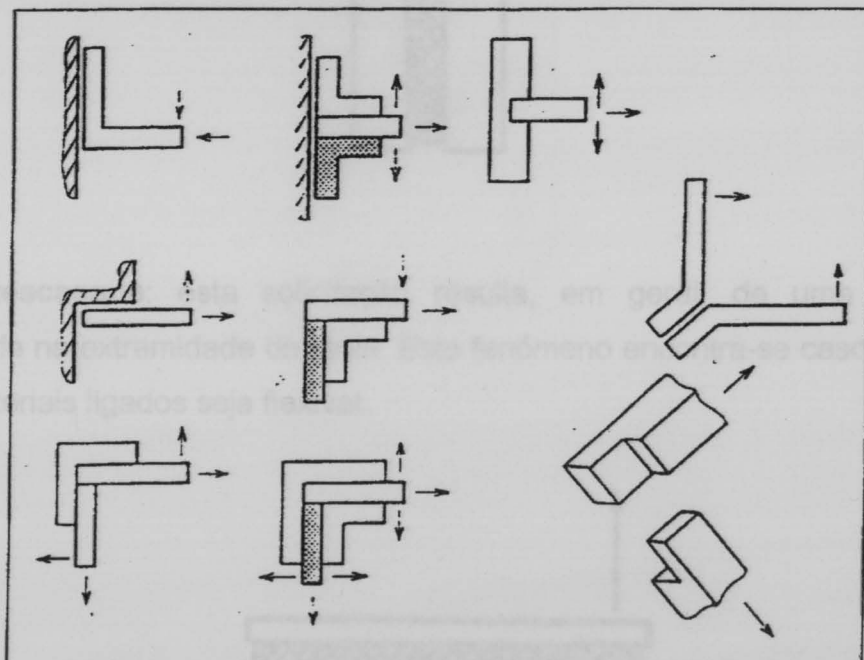




⇒ **De topo-a-topo:** necessitam de maquinagem, caras em pequenas séries.

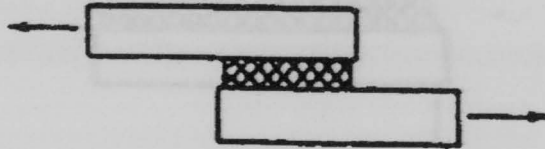


⇒ **Em ângulo:** o efeito de descasque é difícil de evitar.

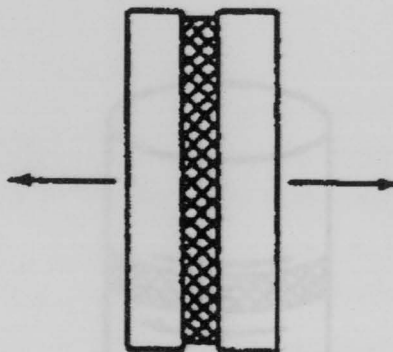


Nas juntas coladas actuam essencialmente cinco tipos de solicitações mecânicas:

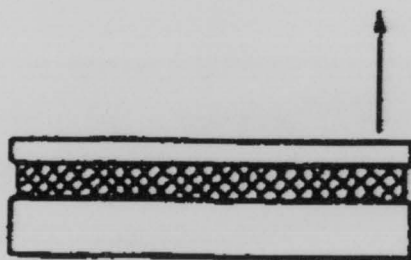
⇒ **Esforços de corte:** os esforços mais importantes são paralelos ao plano da junta e são repartidos de modo igual por toda a junta.



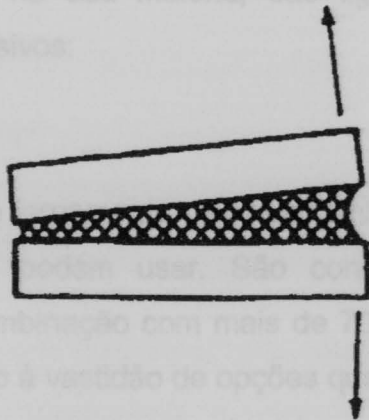
⇒ **Esforços de tracção:** os esforços são perpendiculares ao plano da junta e são repartidos por toda a junta.



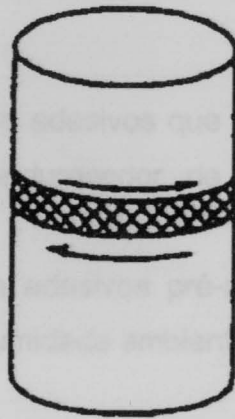
⇒ **O descasque:** esta solicitação resulta, em geral, de uma tracção localizada na extremidade da junta. Este fenómeno encontra-se caso um dos dois materiais ligados seja flexível.



⇒ **A clivagem:** é uma situação intermédia entre a tracção e o descasque, geralmente observada na extremidade da junta de materiais rígidos.



⇒ **A torção:** esforço causado pela rotação relativa entre os dois materiais ligados.



### 3.4. Tipos de adesivos

As ligações coladas, na sua maioria, são ligadas usando um de cinco principais tipos de adesivos:

#### ⇒ **Epoxy**

Este tipo de adesivo é largamente usado e também possui uma larga gama de variantes que se podem usar. São conhecidos cerca de 25 tipos diferentes, que em combinação com mais de 70 tipos diferentes de agentes de cura, dão expressão à vastidão de opções que podemos usar.

Este tipo de adesivo, normalmente é obtido através da mistura de dois compostos, a resina e o endurecedor, em quantidades pré-determinadas.

No entanto, adesivos epoxídicos já misturados podem também ser encontrados, a reacção química que leva à polimerização e endurecimento do mesmo não ocorre à temperatura ambiente, mas sim acima de 100°C.

#### ⇒ **Poliuretano**

Este grupo é outro exemplo de adesivos que endurecem após a mistura de dois componentes, resina e endurecedor, de um modo semelhante ao que acontecia com os epoxídicos.

Neste grupo existem também adesivos pré-misturados que curam de um modo lento por absorção de humidade ambiente.

#### ⇒ **Epoxy e acrílico (*Toughened adhesives*)**

Um dos grandes problemas dos adesivos em geral é a sua fragilidade.

Este problema limita a resistência ao choque e também a resistência ao descasque dos adesivos.

No entanto os adesivos de epoxy e acrílico têm dispersas no seu interior, pequenas partículas semelhantes a borracha. O efeito destas partículas é o alargamento de uma frente de fractura, reduzindo assim a concentração de esforços que levam à sua propagação.

Neste tipo de adesivos usa-se também dois compostos de modo a iniciar a polimerização, mas não necessitam de ser misturados, bastando que para tal se espalhe um pouco de cada em cada uma das superfícies e se coloquem então em contacto.

#### ⇒ Adesivos tipo “VOX”

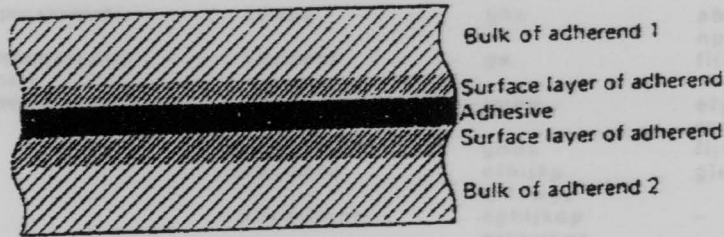
Este tipo de adesivos têm as seguintes características:

- as proporções das quantidades a misturar não são tão importantes como nos epoxídicos
- uma vez misturados e aplicados, a velocidade da reacção baixa até a junta ser fechada, nesse ponto a velocidade aumenta novamente. Isto significa que grandes estruturas podem ser montadas sem o risco de certas juntas preparadas primeiro não estejam já curadas
- grandes falhas podem ser enchidas sem o perigo de uma reacção exotérmica ocorrer
- a reacção de polimerização ocorre mesmo em ambientes frios
- existem formulações que oferecem melhor resistência a altas temperaturas que uma epoxy típica.

O mecanismo de cura destes adesivos é controlado pelo seu acesso ao oxigénio atmosférico, podemos assim inibir a reacção de polimerização retardando o processo de cura. É por esse facto que, quando fechamos a junta, o adesivo deixa de ter um contacto com o ambiente e a velocidade de reacção aumenta.

### 3.5. Preparação de superfícies

Uma secção de uma junta colada tem, na maioria dos casos o aspecto da figura, revelando e distinguindo as superfícies do material, o adesivo e o material em si.



Por isso é de fácil percepção a importância do estado superficial dos materiais a colar.

No entanto, no caso dos materiais compósitos constituídos por resinas termoendurecíveis, e ressalvando a presença de agentes desmoldantes na superfície, a maioria pode ser colada sem qualquer tipo de preparação específica, especialmente quando se usam adesivos do tipo epoxy e acrílico.

Normalmente uma ligeira abrasão feita na superfície, seguida de uma limpeza com solvente é o bastante na maior parte dos casos.

Há que ter no entanto atenção, à compatibilidade entre o solvente e o adesivo, visto que reacções estranhas podem ocorrer danificando assim a junta.



### 3.6. Selecção de adesivos

Nesta secção apresenta-se um excerto de um quadro de consulta rápida para a escolha dos adesivos mais apropriados a cada caso.

Material (Adherend)	Reject	Secondary	Primary
Cellulose – board, paper, wood etc	cdosu	ghx	abefijkim npqrtvwyz fijkpqwyz
Cementitious – concrete, mortar etc. including asbestos sheet	abcdehl mnorstuv	gx	
Ceramic – ferrite, masonry, pottery	abcdsu	lmno	efghijkpq rtvwxyz fijkmnpqrwyz glnx
Fabric – cloth, felt Friction materials	abcdelstuv abcdosu	ghox efhijkp qrtvwyz eghijkop qrtvwxyz	–
Glass	abcdflmnsu	eilmntvwz f	fikpqy allbutabfl
Leather	abcdghorsux		
Metals	abl		
Plastics			
ABS	abcdghj mnosuxz	fklqtv	eiprwy
<i>Poly</i>			
Acetal	abchlmnosu	dfgkx	eijpqrtvwyz
Acrylate	abchgijlmn osuxz	dfkqp	eirtvwy
Alkyd	abchlmnosu	dfgkptvwx	eijqryz
Allyl phthalate	abchimosu	dfgkptvwx	eijqryz
Amide	abchosu	dfgijptvwyz	eklmnqrx
Amino	abchlmnosu	dfgkptvwx	eijqryz
Carbonate	abcdhlmo qstuvw	efgj	ikprxyz
Epoxy (including fibre re-inforced laminates)	abclmnosu	dfktv	eghijpqrwxyz
Ester (thermoset and re-inforced laminates)	abclmnosu	dfijktv	eghpqrwxyz
Ethylene imide	abchlmnosu abclmnosu	defgkptvwx dftvw	ijqryz eghijkpqrxyz
Methyl methacrylate	abchgijlmno suxz	dfkpa	eirtvwy
Phenolic (including laminates)	csu	abcdimntv	eghijkopqrwxyz
Phenylene Oxide	abclmnosu	dfghktvx	eijpcrwyz
Propylene	abchlmnosu	defgkptvwx	ijqryz
Styrene (including foam)	abchlmnosux	djkpqtvwz	efiry
Sulphone	abcdghklmno sux	efijpwyz	qrtv
Tetra-fluoroethylene	abchlmnosu	defgkptvwx	ijqryz
Vinyl Chloride	abcdghlmno sux	fijkplvyz	earw
Urethane (Elastomers including foam)	abcdghijlmno suxz	efikctvwy	pr
<i>Rubbers</i>			
Zutyl			ear
Chloro-sulphonated polyethylene			earw
EPM			ear
EPDM			ek!par
Fluorinated and other speciality types			ear
Chloroprene			eijnqryz
Cyclized			eijnqryz
'Hard' Structural	Reject all but primaries indicated	Not applicable	eijnqryz
Natural			epqr
NBR			eijnqryz
Neoprene			eijnqryz
Nitrile			ekqr
SBR			eijnqryz
'Soft' non-structural			eijnqryz
Silicone			–

**Tabela de códigos:**

<b>Adhesive type</b>	<b>Code</b>
Amino	a
	b
Anaerobic	c
	d
Cynanoacrylate	e
Emulsion/Latex	f
Epoxide	g
	h
	i
	j
Hot melt	k
Phenolic/resorcinolic	l
	m
Phenolic (modified)	n
Plastisol	o
Polyurethane	p
Solvent-borne rubbers	q
Tape	r
Toughened adhesives	s
	t
	u
	v
	w
	x
	y
	z

## CAPÍTULO V

Neste capítulo estão descritos dois ensaios práticos de tracção, realizados com provetes de material colapsado.

Estes ensaios foram realizados de acordo em conta as normas para ensaios de

### ENSAIOS PRÁTICOS

Para a preparação das superfícies foram usadas as normas D 2093 e D 2094.

Estas normas foram retiradas do livro da ASTM, volume 15.06.

A dimensão da área a colar (L), foi obtida usando uma equação descrita na referida norma D 1002.

Neste caso o interesse destes ensaios foi em determinar até que ponto o estado superficial dos provetes (preparado e não preparado), altera significativamente o comportamento de uma junta colada.

Para tal, em cada ensaio foram usados cinco provetes.

## 1. Introdução dos provetes

Neste capítulo estão descritos dois ensaios práticos de tracção, realizados com provetes de material compósito.

Estes ensaios foram realizados tendo em conta as normas para ensaios de tracção D 1002 (geral) e D 3165.

Para a preparação das superfícies foram usadas as normas D 2093 e D 2094.

Estas normas foram retiradas do livro da ASTM, volume 15.06.

A dimensão da área a colar (L), foi obtida usando uma equação descrita na referida norma D 1002 .

Neste caso o interesse destes ensaios foi em determinar até que ponto o estado superficial dos provetes (preparado e não preparado), altera significativamente o comportamento de uma junta colada.

Para tal, em cada ensaio foram usados cinco provetes.

## 1.1. Geometria dos provetes

Na figura abaixo pode-se avaliar as dimensões dos provetes, bem como o comprimento da área colada calculada pela seguinte equação:

$$F_{ty} := 19614.9 \quad (\text{PSI})$$

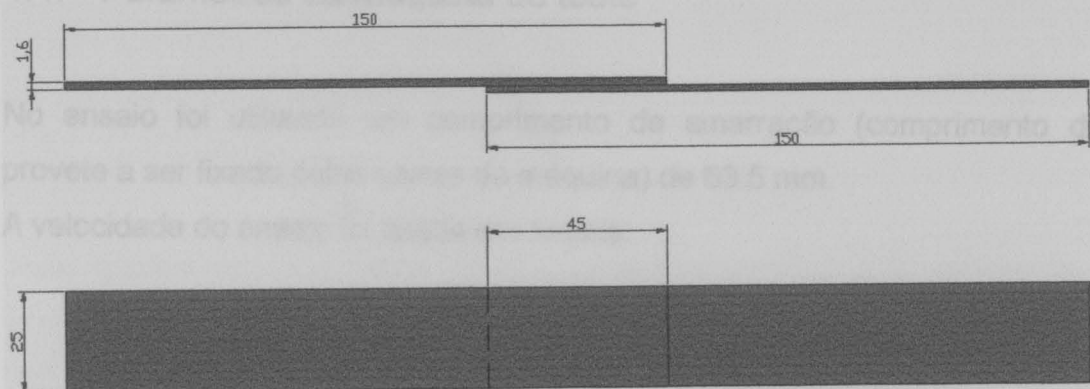
$$\tau := 1595.4 \quad (\text{PSI})$$

$$T := 0.197 \quad (\text{in})$$

$$L := \frac{F_{ty} \cdot T}{\tau} \quad L = 2.422 \quad (\text{in})$$

$$L = 45 \text{ mm} \quad (\text{aprox})$$

## 1.4. Parâmetros da máquina de teste



## 1.2. Preparação das superfícies

De um total de dez provetes, metade foram apenas limpos com acetona. A outra metade, além de limpos inicialmente com acetona, foram lixados ligeiramente com uma lixa *Rhinowood P80* e de seguida novamente limpos com acetona.

## 1.3. O adesivo

O adesivo usado neste ensaio foi um adesivo epoxídico da reputada marca *Araldite*, variante *Standard*.

Foram seguidos os concelhos do fabricante no que respeita a proporções de resina e endurecedor (neste caso 50-50), dose de adesivo a aplicar e período de secagem a respeitar antes de submeter a junta a trabalho.

## 1.4. Parâmetros da máquina de teste

No ensaio foi utilizado um comprimento de amarração (comprimento do provete a ser fixado pelas garras da máquina) de 63.5 mm.

A velocidade do ensaio foi fixada em 1mm/s.

Pela análise dos resultados obtidos podemos verificar que mesmo sem qualquer preparação prévia de uma superfície limpa, a junta colada aguenta um esforço de tracção significativo, 6555.4 N, ou seja cerca de 670 Kg.

No entanto, se se proceder a uma pequena abrasão da superfície por intermédio de uma lixa, os valores sobem para quase o dobro, 10259.2 N, ou seja cerca de 1025 Kg.





## 1.5. Resultados

No quadro seguinte apresentam-se os resultados obtidos para cada um dos provetes, sendo utilizada a seguinte designação para a sua distinção:

- Número seguido da letra P significa um provete que foi lixado
- Apenas um número significa um provete apenas limpo.

Provete	Carga(N)	Extensão(mm)
1	5995	0.78
2	5654	0.78
3	6480	0.93
4	7195	1.03
5	7458	0.96
1P	9611	1.20
2P	9146	1.27
3P	10790	1.33
4P	11500	1.47
5P	9144	1.14

Carga média = 6556,4 N  
n/ lixados

Carga média = 10038,2 N  
lixados

## 1.6. Conclusão

Pela análise dos resultados obtidos podemos verificar que mesmo sem qualquer preparação (a menos de uma sumária limpeza), a junta colada aguenta um esforço de tracção significativo, 6556.4 N, ou seja cerca de 670 Kg.

No entanto, se se preceder a uma pequena abrasão da superfície por intermédio de uma lixa, os valores sobem para quase o dobro, 10038.2 N, ou seja cerca de 1025 Kg.





FACULDADE DE ENGENHARIA

UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA

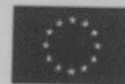


0000073363

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO DEPGF

**prodepII**

PROGRAMA DE DESENVOLVIMENTO EDUCATIVO PARA PORTUGAL



UNIÃO EUROPEIA  
Fundo Social Europeu

**Nome: Pedro João da Silva Lopes**

**Curso: Eng<sup>a</sup> Mecânica**

**Datas: 1998/01/02 a 1998/07/02**

**Tema: Estudo de ligações em materiais compósitos**

**Empresa: INEGI Inst. Nac. Eng<sup>a</sup> e Gestão Indust**

**Concurso: 306/010-98 – PRODEPII – Medida 5/Ação 5.2 -  
Estágios**