



# PROBLEMAS E TRABALHOS PRÁTICOS DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Lucas Filipe Martins da Silva  
Fernando Jorge Lino Alves  
António Torres Marques  
Teresa Margarida Guerra Pereira Duarte  
Viriato Teixeira de Abreu e Antunes  
Paulo Jorge Roque O. Nóvoa

# ÍNDICE

<b>PREFÁCIO</b>	IX
<b>PARTE A - METAIS</b>	1
1. Aços	1
1.1. Problemas resolvidos	1
1.2. Problemas não resolvidos	13
1.2.1. Soluções	27
1.3. Trabalhos experimentais	36
1.3.1. Metodologia	36
1.3.2. Relatório	37
1.3.3. Recozido de amaciamento ou globulização	39
1.3.4. Recozido de normalização	40
1.3.5. Têmpera martensítica e revenido	42
1.3.6. Têmpera bainítica (austêmpera)	43
1.3.7. Ensaio de temperabilidade de Jomny	44
1.3.8. Estudo da camada cementada de um aço	46
1.3.9. Identificação de componentes em peças reais	47
2. Ferros fundidos	49
2.1. Problemas resolvidos	49
2.2. Problemas não resolvidos	51
2.2.1. Soluções	52
3. Ligas não ferrosas	53
3.1. Problemas resolvidos	53
3.2. Problemas não resolvidos	57
3.2.1. Soluções	60

<b>PARTE B - CERÂMICOS</b>	63
4. Cerâmicos	63
4.1. Problemas resolvidos	63
4.2. Problemas não resolvidos	78
4.2.1. Soluções	82
4.3. Trabalhos experimentais	87
4.3.1. Observação e análise microscópica de diferentes tipos de materiais cerâmicos	87
4.3.2. Produção e caracterização de materiais cerâmicos	93
4.3.3. Produção de componentes cerâmicos	95
4.3.4. Estudo do processamento e evolução microestrutural de um vidro cerâmico	96
4.3.5. Análise e discussão de um artigo científico	105
<b>PARTE C - POLÍMEROS</b>	109
5. Polímeros	109
5.1. Problemas resolvidos	109
5.2. Problemas não resolvidos	115
5.2.1. Soluções	118
5.3. Trabalhos experimentais	118
5.3.1. Um método simples para identificar polímeros termoplásticos (Engel, 1981)	118
5.3.2. Determinação de propriedades mecânicas em tração	121
5.3.3. Influência da “velocidade” de solitação no comportamento do material	123
5.3.4. Determinação da resistência ao impacto Charpy (método não-instrumentado)	124
<b>PARTE D - COMPÓSITOS</b>	125
6. Compósitos	125
6.1. Problemas resolvidos	125
6.2. Problemas não resolvidos	132
6.2.1. Soluções	134
6.3. Trabalhos experimentais	134
6.3.1. Estruturas sanduíche com núcleos de cortiça	134
6.3.2. Compósitos ablativos para veículos de reentrada atmosférica	134
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	137

## **TRABALHOS PRÁTICOS** 139

### **RELATÓRIOS METAIS** 141

Relatório 1. Amaciamento	143
Relatório 2. Normalização	165
Relatório 3. Têmpera martensítica e revenido	189
Relatório 4. Austêmpera	207
Relatório 5. Jominy	229
Relatório 6. Cementação	269
Relatório 7. Identificação de componentes	313

### **RELATÓRIOS CERÂMICOS** 337

Poster 1. Produção de componentes cerâmicos	339
Apresentação 1. Produção de componentes cerâmicos	341
Relatório 8. Análise e discussão de um artigo científico	351

### **RELATÓRIOS POLÍMEROS** 381

Relatório 9. Um método simples para identificar polímeros termoplásticos	383
Relatório 10. Determinação de propriedades mecânicas em tração	403
Relatório 11. Influência de “velocidade” de sollicitação no comportamento do material	415
Relatório 12. Determinação da resistência ao impacto Charpy (método não-instrumentado)	425

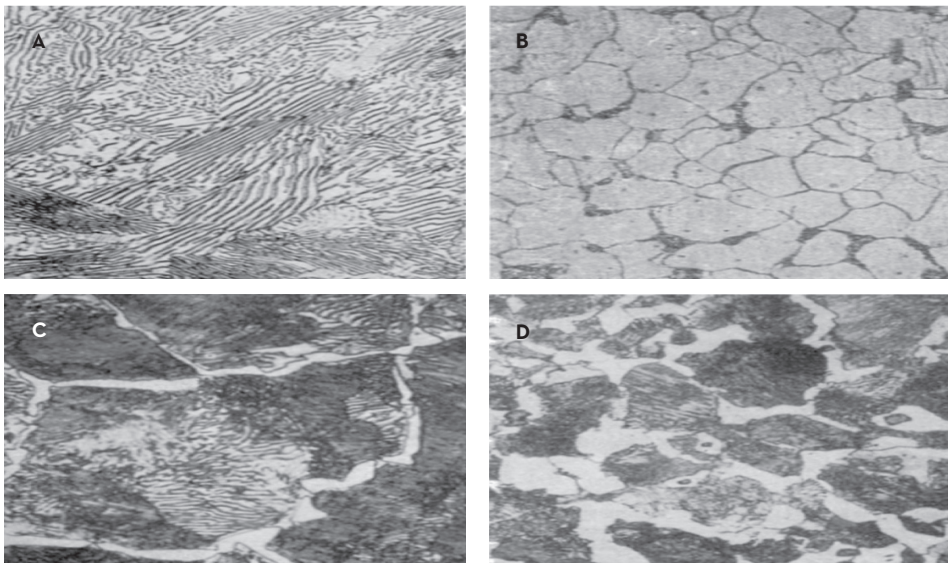
### **RELATÓRIOS COMPÓSITOS** 437

Relatório 13. <i>Cork Cored Sandwich Structures</i>	439
Relatório 14. Compósitos ablativos para veículos de reentrada atmosférica	501

- e.
- i. Endurece por solução sólida a ferrite. Cementite inalterada. Resulta um aço ligeiramente mais duro;
  - ii. Não é alterada. Esta dureza depende apenas da %C;
  - iii. Aumenta;
  - vi. Aumenta;
  - vii. Diminui e eventualmente fá-la desaparecer.

## PROBLEMA 2

- a. **A Figura 1.2.** mostra as fotomicrografias de 4 aços ao carbono. Coloque-os por ordem crescente do teor em carbono. Justifique a resposta.



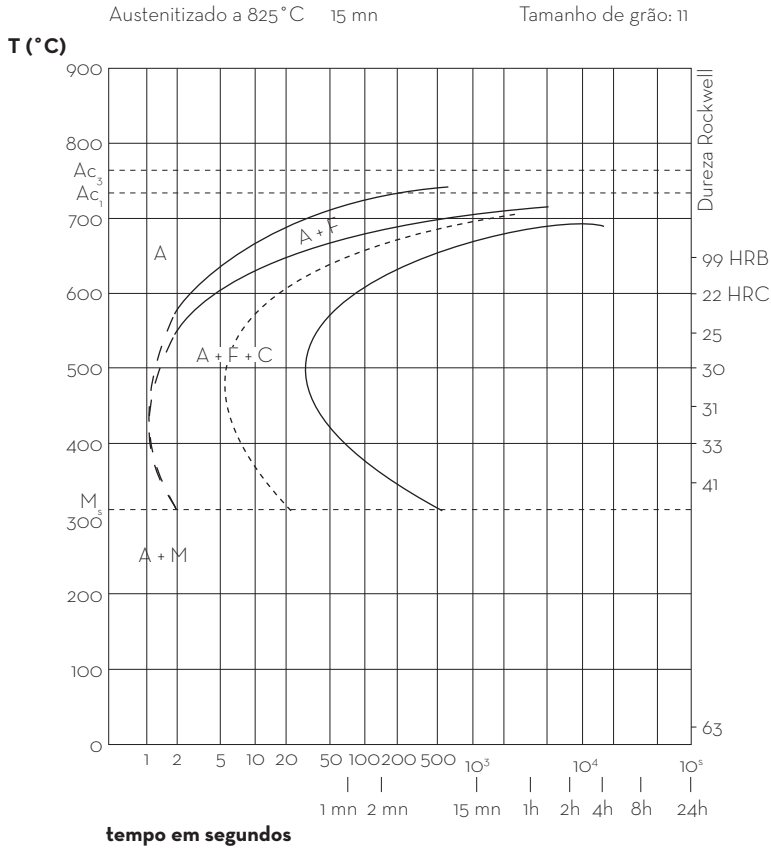
**Figura 1.2.** Fotomicrografias de 4 aços ao carbono.

- b. O aço C tem 10% de cementite secundária. Qual a percentagem total de cementite?
- c. Dos 4 aços indique:
- i. O mais dúctil;
  - ii. O mais resistente à deformação plástica;
  - iii. O que possui menor temperatura de transição dúctil-frágil.
- d. Identifique os objetivos dos seguintes tratamentos térmicos ou termoquímicos:
- i. Recozido de normalização;

## XC 55

C %	Mn %	Si %	S %	P %	Ni %	Cr %	Mo %	Cu %	V %
0,53	0,70	0,35	0,010	0,020	0,24	0,09	< 0,10	0,52	<0,03

XC55 - NF A 35-551



**Figura 1.3.** Diagrama de transformação isotérmica do aço XC 55 segundo o atlas IRSID (Institut de Recherches de la Sidérurgie Française).

- Recozido isotérmico a 600°C durante cerca de 2 minutos. Obtém-se mais de 50% de perlite e o resto de ferrite.
- Estágio isotérmico a 400°C durante 7 segundos de modo a obter 50% de bainite seguido de um arrefecimento rápido em água de modo a transformar a austenite restante em martensite. A dureza é uma média pesada de 50% de bainite com 33 HRC e de 50% de martensite com 63 HRC, o que dá 48 HRC.
- Trata-se de um têmpera martensítica que consiste em arrefecer rapidamente o aço austenitizado de modo a evitar os agregados de ferrite e carbonetos.

### PROBLEMA 13

Considere o diagrama de equilíbrio de constituintes das ligas Fe-Fe<sub>3</sub>C da Figura 1.8.

T (°C)

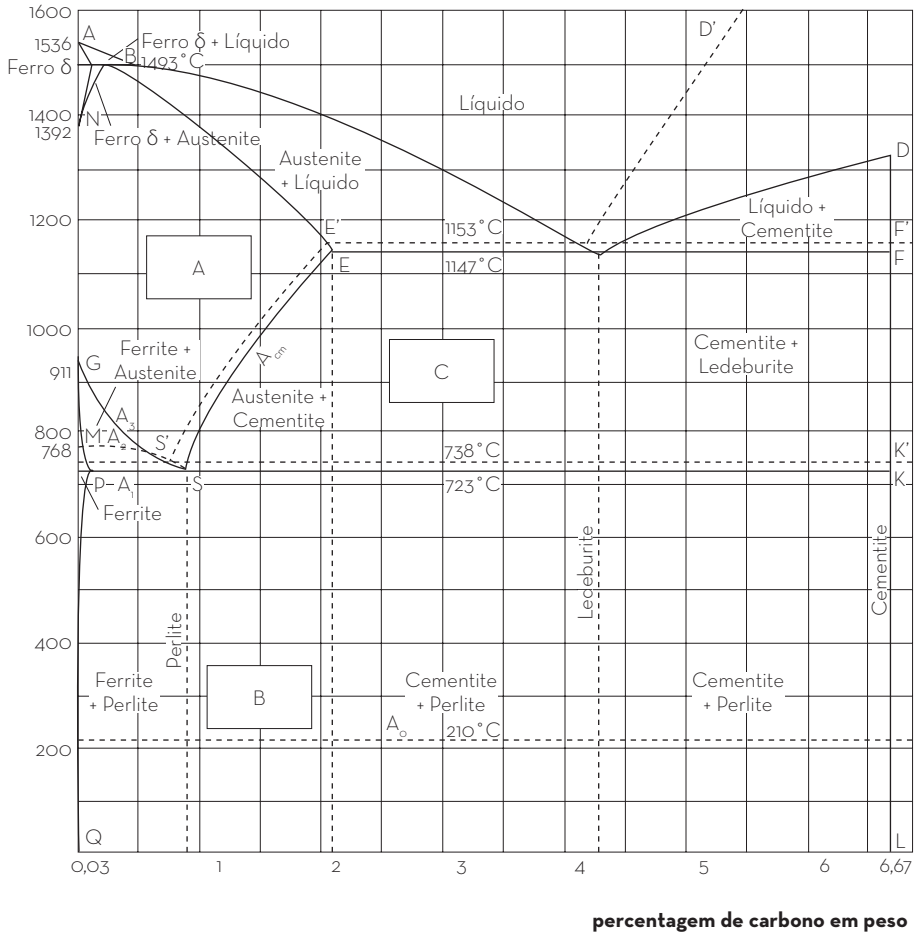


Figura 1.8. Diagrama de equilíbrio de constituintes das ligas Fe-Fe<sub>3</sub>C (Soares, 1992).

- Identifique os campos A, B e C.
- Identifique os aços ao carbono recozidos que não sofrem transformação eutectóide.
- Identifique (%C) o aço ao carbono cuja microestrutura no estado recozido à temperatura ambiente é Ferrite (75%) + Perlite (25%).
- Que aços recozidos com 0,7%C podem conter cementite secundária?
- Compare um aço com 0,1%C, 0,45%C e 0,7%C relativamente a:

- Indique os microconstituintes que espera ver à temperatura ambiente após recozido.
- Projete um tratamento térmico de normalização para o aço referido. Qual o objetivo deste tratamento?
- Projete uma cementação para este aço (920°C, 3hr) com têmpera indireta com afinação do grão para a superfície. Justifique as temperaturas escolhidas.

**PROBLEMA 19**

Considere os diagramas TI e TRC (Figura 1.11) do aço 50 CV4.

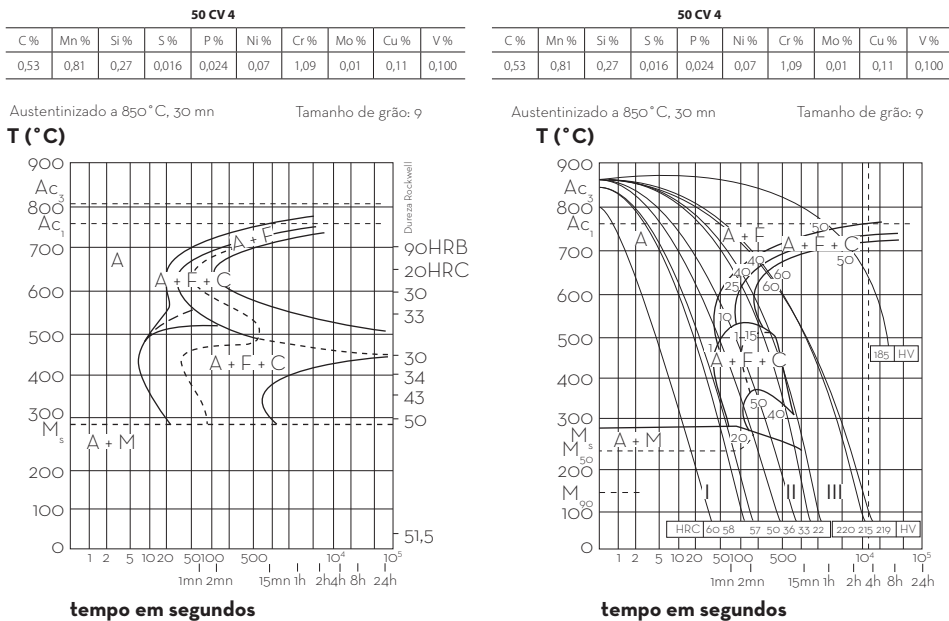


Figura 1.11. Diagramas TI (esquerda) e TRC (direita) do aço 50 CV4 segundo a IRSID.

- Identifique os constituintes e indique as suas percentagens à temperatura ambiente após os arrefecimentos identificados por I, II e III.
- Qual a dureza deste aço no estado recozido?
- Represente o arrefecimento cuja velocidade é a mínima possível compatível com a máxima dureza. Qual é esta dureza? Calcular o parâmetro de arrefecimento correspondente.
- Indique dois modos de obter uma dureza de 33-34 HRC.
- Se possível, projete tratamentos térmicos para a obtenção de:
  - 100% de bainite com 43 HRC;
  - 100% de perlite com 20 HRC;



(temperado e revenido) <sup>[2]</sup>. Tipicamente destaca-se a sua aplicação em veios e parafusos diversos, componentes mecânicos para automóveis (bielas, tirantes, estabilizadores, peças de direção e embraiagem, semieixos) e cambotas para motores de explosão <sup>[2]</sup>. Na **Tabela 1** apresentam-se as várias normas e designações pelas quais este aço é conhecido.

**Tabela 1.** Qualidade e normas equivalentes do FR3 <sup>[2]</sup>.

N° do material	EURONORM	AISI	DIN	AFNOR
1,6582	34 CrNiMo 6	4337	34 CrNiMo 6	35NCD6

Na **Tabela 2** apresenta-se a composição química do aço em causa com as percentagens de carbono, bem como dos elementos de liga nele presente.

**Tabela 2.** Composição química do FR3 <sup>[2]</sup>.

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
0,34%	≤ 0,40%	0,65%	1,50%	0,22%	1,50%

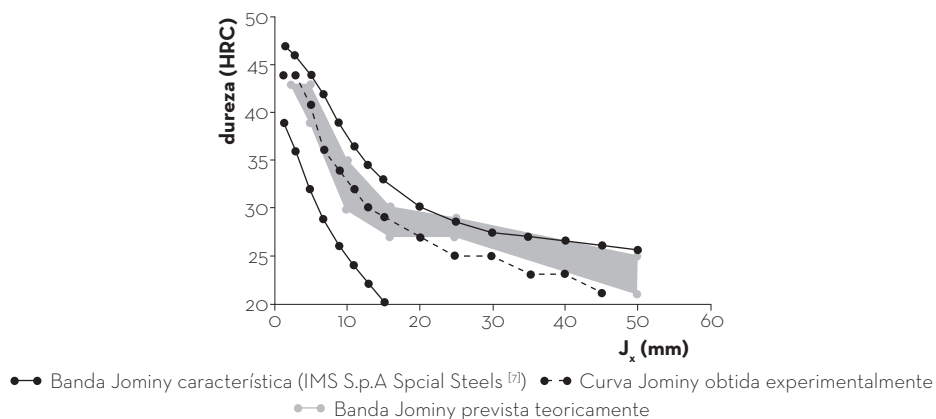
Com base na percentagem de Carbono, este aço classifica-se como aço hipoeutectóide (%C < 0,86%). No que diz respeito aos elementos de liga presentes – Si, Mn, Cr, Mo e Ni – com % entre 3,87% e 4,27%, este aço considera-se de baixa liga. Como já foi referido, a presença destes elementos de liga irá melhorar certas propriedades do aço.

Na **Tabela 3** apresenta-se com mais pormenor cada elemento de liga e a alteração que a sua presença provoca nas propriedades dos aços.

**Tabela 3.** Elementos de liga do FR3 e propriedades alteradas devido à sua presença <sup>[1]</sup>.

Elemento de liga	Aumento	Diminuição
Si	Limite de elasticidade	Condutibilidade elétrica
	Resistência à tração e ao desgaste	
	Resistência à corrosão	
Mn	Resistência à tração e ao desgaste por choque	Possibilidade de formação de fissuras a quente

característica (IMS S.p.A Special Steels <sup>[7]</sup>) para este aço. Posteriormente observou-se também uma boa aproximação entre os resultados obtidos experimentalmente e a previsão efetuada. No entanto, apesar de até à distância de 20 mm a curva Jominy obtida experimentalmente se encontrar no interior da banda Jominy prevista, é possível observar que após essa distância os valores de dureza medidos são ligeiramente inferiores aos valores previstos. Um dos fatores que contribui para esse desvio é o facto de apenas se ter efetuado a medição de dureza numa das superfícies retificadas. A realização de várias medições de dureza permitiria, através de uma interpolação, obter valores mais próximos da previsão no sentido em que os erros associados ao procedimento prático seriam minimizados. Outro fator consiste em ter-se utilizado um único provete com uma dada composição química, sendo que a previsão teórica foi realizada com base no diagrama TRC, traçado para uma composição química diferente.



**Figura 39.** Comparação da curva Jominy obtida experimentalmente com a banda Jominy prevista teoricamente e com a banda Jominy característica (IMS S.p.A Special Steels <sup>[7]</sup>).

**Tabela 13.** Comparação da previsão da microestrutura com as imagens obtidas experimentalmente.

Distância (mm)	1,5	11	25	45
Previsão da microestrutura	100% Martensite	20 - 30% Martensite	13 - 30% Martensite	13 - 20% Martensite
	-	60 - 65% Bainite	15 - 20% Bainite	10 - 15% Bainite
	-	-	0 - 2% Perlite	2 - 3% Perlite
	-	10 - 15% Ferrite ( $\alpha$ )	55 - 65% Ferrite ( $\alpha$ )	68 - 69% Ferrite ( $\alpha$ )
Microestrutura obtida				

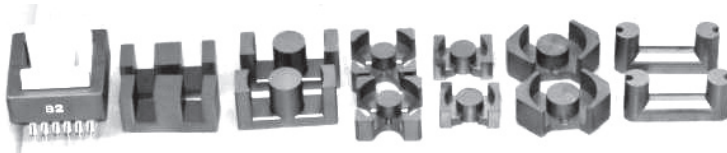
# 1. INTRODUÇÃO

- Material cerâmico de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;
- São adicionados outros óxidos que contêm  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{3+}$ ,  $\text{Co}^{3+}$  - variar propriedades eletromagnéticas;
- Podem apresentar estruturas hexagonais ou cúbicas;



**Figura 1.** Hematite.

**Figura 2.** Magnetite.



**Figura 3.** Vários núcleos de ferrite.

- 
- Primeira bússola no mundo - 2 mil anos atrás - China - Magnetite.



**Figura 4.** Bússola Chinesa em magnetite, século I a.C.

Em suma, por razões históricas, a porcelana pode ser dividida em três tipos (**Figura 2**): massa dura, massa macia e porcelana de ossos. Estes três tipos de porcelana são distinguíveis pela composição e pela temperatura de sinterização. As propriedades mecânicas da massa macia e da porcelana de ossos fazem com que as suas utilizações sejam limitadas a usos não técnicos, enquanto a massa dura, como se verá posteriormente, tem inúmeras aplicações técnicas. Este trabalho estuda a porcelana designada por massa dura, pelo que, a partir deste momento, e porque em termos técnicos é mais correto, sempre que a palavra porcelana for usada está-se a falar da massa dura <sup>[8]</sup>.



**Figura 2.** Diferentes tipos de porcelana.

**Figura 2.A.** Isolador elétrico de massa dura.

**Figura 2.B.** Escultura de um cisne em massa macia.

**Figura 2.C.** Conjunto de jantar em porcelana de ossos.

## 2.2. DEFINIÇÃO DE PORCELANA E LOUÇAS BRANCAS

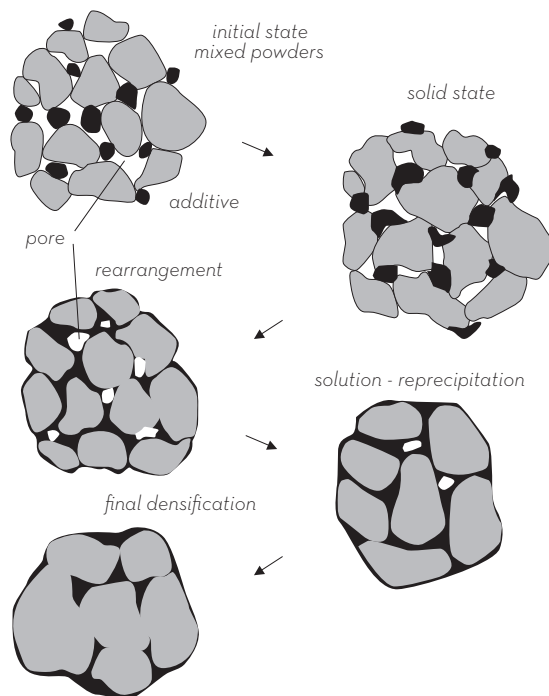
No Capítulo anterior procurou-se compreender a evolução da porcelana ao longo da história, introduzindo-se três tipos diferentes de porcelana (massa dura, massa macia e porcelana de ossos). Contudo, e de modo intencional, o conceito de porcelana nunca foi definido. Tal deveu-se a um facto muito simples: a definição de porcelana da ASTM (American Society for Tests and Materials) permite concluir que o conceito de porcelana se refere unicamente à massa dura (ver parágrafo seguinte), isto é, por questões históricas inclui-se quer a massa macia quer a porcelana de ossos no grupo das porcelanas, mas tal é feito apenas porque esses materiais tiveram a sua origem na porcelana oriunda da China <sup>[8]</sup>.

A ASTM define porcelana como “uma louça branca vítrea, vidrada ou não vidrada, usada para propósitos técnicos, designadamente produtos elétricos, químicos, mecânicos, estruturais e louças térmicas”. Ou seja, como quer a massa macia quer a porcelana de ossos são apenas usadas, devido a piores propriedades mecânicas que a massa dura, com propósitos não técnicos (essencialmente louça), não são abrangidas por esta definição <sup>[8]</sup>.

Interessa também definir louça branca (ou cerâmicos baseados em argila), já que a porcelana é definida como “uma louça branca”. A louça branca é definida como “uma louça obtida por aquecimento que consiste num corpo cerâmico vidrado ou não vidrado que é normalmente branco e de textura fina, designadamente classificações de produtos como china, porcelana, grés e barro”. Ou seja, a ASTM distingue china de porcelana, tratando as duas como louças brancas, mas não as

A segunda cozedura é feita a uma temperatura entre os 1350 °C e os 1400 °C. Este é um processo de sinterização com fase líquida, uma vez que o corpo é aquecido sem que se atinja a temperatura de fusão da maioria dos constituintes, já que, tal como mencionado anteriormente, apenas o feldspato se funde. A fusão do feldspato acelera, desde logo, a densificação devido à diminuição dos poros. A alternativa à sinterização com fase líquida é a sinterização com fase sólida, contudo essa sinterização requer temperaturas muito elevadas, pelo que, sem o uso de feldspato (ou outro mineral que tivesse baixo ponto de fusão) como constituinte, os custos do processo de fabrico da porcelana seriam muito superiores <sup>[2]</sup> <sup>[17]</sup>.

Durante o processo de sinterização existe uma contração de volume da peça que se deve, essencialmente, à formação de líquido. Os fenómenos que ocorrem durante a sinterização com fase líquida estão muito bem descritos na **Figura 5** <sup>[17]</sup>.

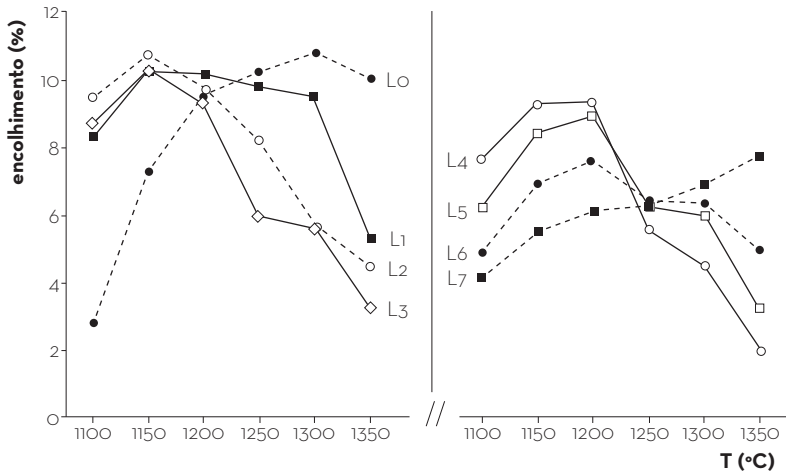


**Figura 5.** Desenvolvimento da microestrutura durante a sinterização com fase líquida <sup>[17]</sup>.

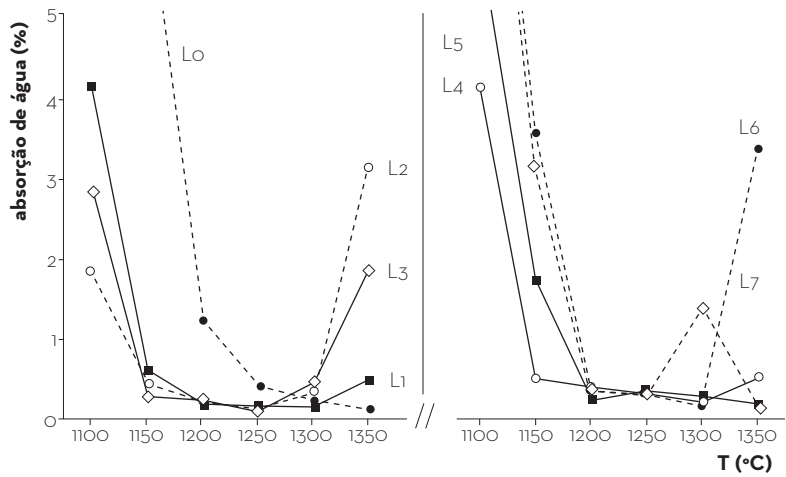
## 2.5. APLICAÇÕES

Desde a sua criação e até aos dias de hoje, a porcelana é usada principalmente em serviços de jantar e em decoração. O seu uso estende-se desde pequenos objetos e candeeiros até objetos bem mais complexos, sendo um material facilmente encontrado em habitações, apesar de, neste século, decorações de outros materiais começarem a surgir em substituição destas.

comportamento anormal de L7 é justificado pelos autores como um sobreaquecimento seguido de uma rápida vitrificação <sup>[13]</sup>.

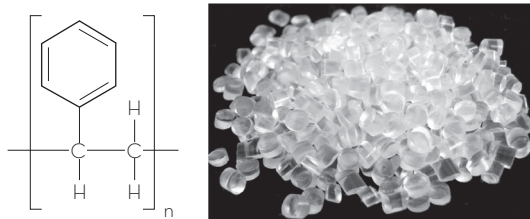


**Figura 10.** Influência da temperatura de aquecimento no encolhimento linear de amostras com diferentes percentagens de óxido de lítio <sup>[13]</sup>.



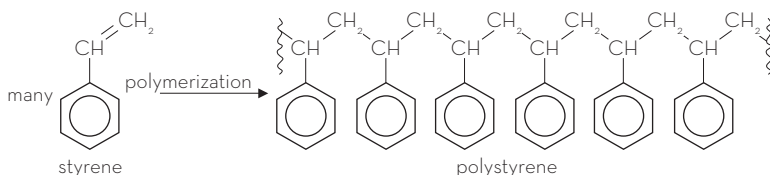
**Figura 11.** Influência da temperatura de aquecimento na absorção de água de amostras com diferentes percentagens de óxido de lítio <sup>[13]</sup>.

A **Figura 12** permite concluir que a adição de óxido de lítio altera significativamente a microestrutura. Enquanto que L1 e L2 apresentam quartzo e mulite, L7 apresenta  $\text{LiAlSi}_3\text{O}_8$ , alumina e pequenas



**Figura 6.** Fórmula química do monómero e grãos de poliestireno <sup>[5] [6]</sup>.

O poliestireno de uso geral é um polímero duro, frágil e vítreo. Trata-se de um polímero muito comum, pelo que também é muito barato. Apresenta-se na forma natural, como um polímero translúcido/transparente mas pode ser colorido através de aditivos/corantes. É muito aplicado em talheres descartáveis, copos, garrafas, embalagens de ovos, brinquedos, caixas de CD's, recipientes diversos, prateleiras frigoríficas (da porta), etc. <sup>[3] [5] [6]</sup>.



**Figura 7.** Polimerização de Poliestireno <sup>[5] [6]</sup>.

Possui uma temperatura de fusão 240 °C, mas uma temperatura de transição vítrea de 100 °C pelo que as temperaturas de serviço que aguenta são baixas, e não possui resistência ao fogo pelo que é de uma flamabilidade muito elevada, facilmente arde. Apresenta uma biodegradabilidade muito reduzida.

Contudo apresenta algumas propriedades interessantes como a rigidez e a resistência, sobretudo à compressão <sup>[3] [5] [6]</sup>.

**Tabela 3.** Propriedades gerais de poliestireno.

Propriedades Gerais		
Tenacidade	0,7 - 1,1	MPa √m
Resistência à tração	35,9 - 51,7	MPa
Resistência à compressão	82,7 - 89,6	MPa

rial – **Figure 4.F.** The resistance of the core to compression should be sufficiently high to resist the local effort on the surface of the beam – **Figure 4.G.**

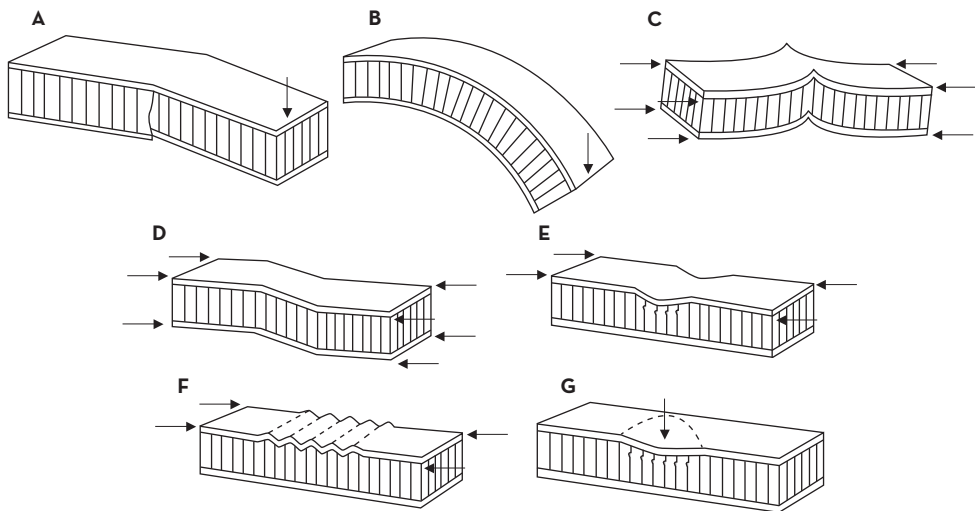
## 2.6. MANUFACTURING DEFECTS AND IMPERFECTIONS

Sandwich structures may contain a number of various defects induced during the manufacturing process [debonds, butt-joints, etc.] or inherent imperfections in a core material [flaws and voids] <sup>[1]</sup>.

**Figure 5** shows a draft of some of these defects.

The most common cause of manufacturing defects is poor or missing bonding due to careless manufacturing or a mismatch in the geometry of sandwich components. Similar defects may also arise during lifetime of the structure due to fatigue, thermo-mechanical loads or impact events. However, in-service impact damage is usually more complex than the defects originated during manufacture of sandwich components <sup>[1]</sup>.

Defects, in some cases, drastically reduce the load-bearing capacity of the structure under static loads. A crack usually initiates at a stress concentration point and propagates in the core material. Thus, the ability of a sandwich with defects to sustain loads and resist the crack propagation essentially depends upon the properties of the core material, particularly its fracture toughness <sup>[1]</sup>.



**Figure 4.** Sandwich failure modes <sup>[1]</sup>.

**Figure 4.A.** Resistance failure of a sandwich beam.

**Figure 4.B.** Sandwich beam in bending.

**Figure 4.C.** Buckling failure of the sandwich beam.

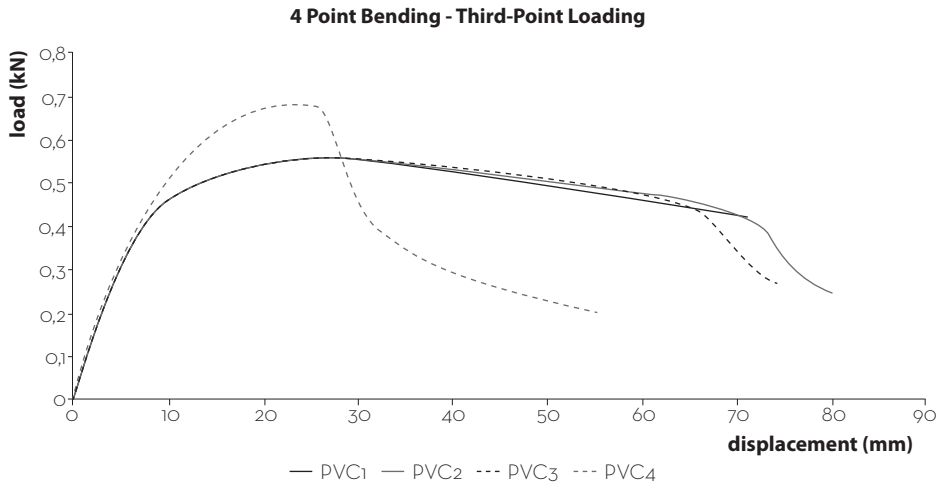
**Figure 4.D.** Buckling failure of the skin of a sandwich beam.

**Figure 4.E.** Wrinkling of the skin of a sandwich beam.

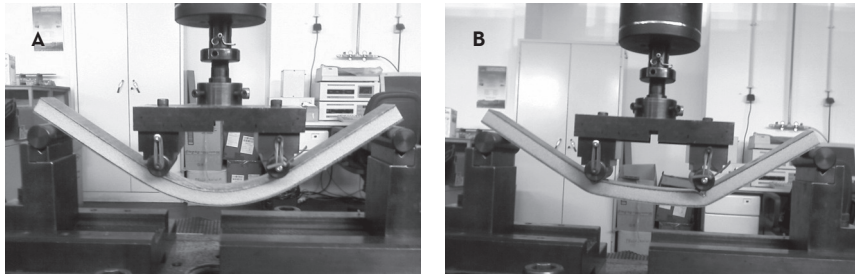
**Figure 4.F.** Intercellular breakage of the core of a sandwich beam by buckling.

**Figure 4.G.** Local compression failure of a sandwich beam.





**Figure 16.** Load-deflection curves obtained with the four-point bending of the sandwich structures with AIREX® C 70.75.12 P PVC foam core material.



**Figure 17.** Sandwich specimens with PVC foam core.

**Figure 17.A.** PVC1.

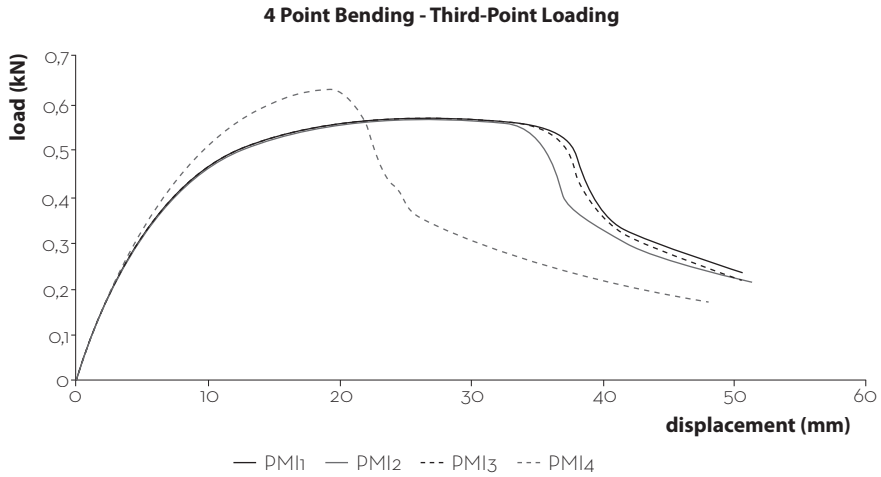
**Figure 17.B.** PVC4 at the end of the four-point bending test.

### 6.2.3. SANDWICH STRUCTURES WITH PU FOAM

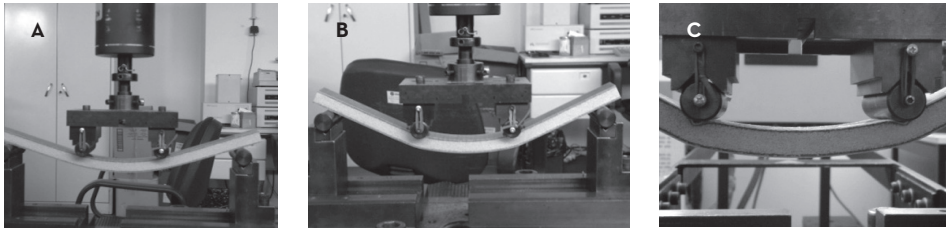
**Table 5.** Four-point bending test results at yield points of sandwich structures with PU foam as core material.

Specimen Design	Displacement at Yield (mm)	Load at Yield (kN)	Core Shear Stress at Yield (MPa)	Facing Bending Stress at Yield (MPa)
PU1	13,34	0,2987	0,3698	24,6501

exhibited by the PVC cored specimen PVC4. Initially specimen has a simple bending behaviour, but after some time the core suffers considerable local compression, resulting in substantial indentation.



**Figure 20.** Load-deflection curves obtained with the four-point bending of the sandwich structures with PMI foam as core material.



**Figure 21.** Sandwich specimens with PMI foam core.

**Figure 21.A.** During the four-point bending test.

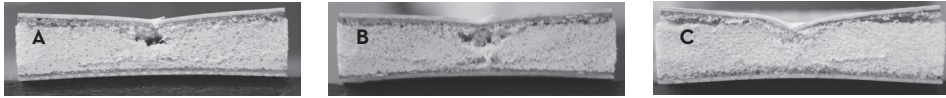
**Figure 21.B.** In the end of the four-point bending test.

**Figure 21.C.** When substantial indentation becomes clear.

### 6.2.5. SANDWICH STRUCTURES WITH NL25 CORK AGGLOMERATE

**Table 7** shows the results obtained for displacement, load, core shear stress and facing bending stress at yield of the sandwich structures with NL25 cork agglomerate as core material. Both individual [for each specimen] and average values are presented. **Figure 22** shows the load-deflection curves of each specimen.

by sandwich specimens with NL25 cork agglomerate core material and exhibit a permanent indentation between 2.9 and 3.9 mm. Sandwich specimens with PMI foam core material also exhibit considerable matrix cracking, which extends itself to the borders of the specimen, considerable face-to-core debonding and considerable core damage, including core cracking, as can be seen in **Figure 46** and in **Figure 48**. No considerable damage is found in the back face of these specimens.

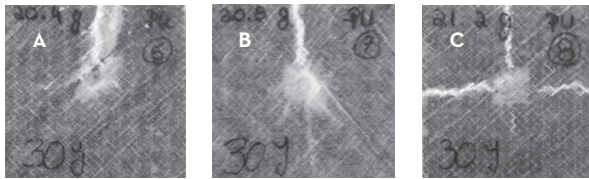


**Figure 46.** Core damage and face-to-core debonding observed in sandwich specimens with PMI foam core material, impacted at 30 J.

**Figure 46.A.** PMI1.

**Figure 46.B.** PMI2.

**Figure 46.C.** PMI4.



**Figure 47.** Sandwich specimens with PU foam core material, impacted at 30 J.

**Figure 47.A.** PU6.

**Figure 47.B.** PU7.

**Figure 47.C.** PU8.

**Figure 47** shows the front faces of the sandwich specimens with PU foam core material, impacted at 30 J. These specimens show externally visible delamination areas similar to that observed in sandwich specimens with PMI foam core material, but also permanent indentation up to approximately 0.45 mm, considerable matrix cracking, which extends itself to the borders of the specimen, fibre failure, considerable core damage, including substantial core cracking, as can be seen in **Figure 48**, and its thickness decreased considerably after impact [between 21.75% and 24.92%], due to lack of through the thickness compressive strength. This decrease of thickness during the low velocity impact event is reflected in the plateau portion observed in the force-time curve of this specimen; in other words, the decrease of thickness observed in these specimens limits the reaction force employed by the sandwich specimen, until complete crush of foam's cellular structure occur, the reaction force employed by the sandwich structure increases again, until maximum penetration of the impactor. These specimens also exhibit some damage in their back face, due to the back supporting ring, as shown in **Figure 49**.

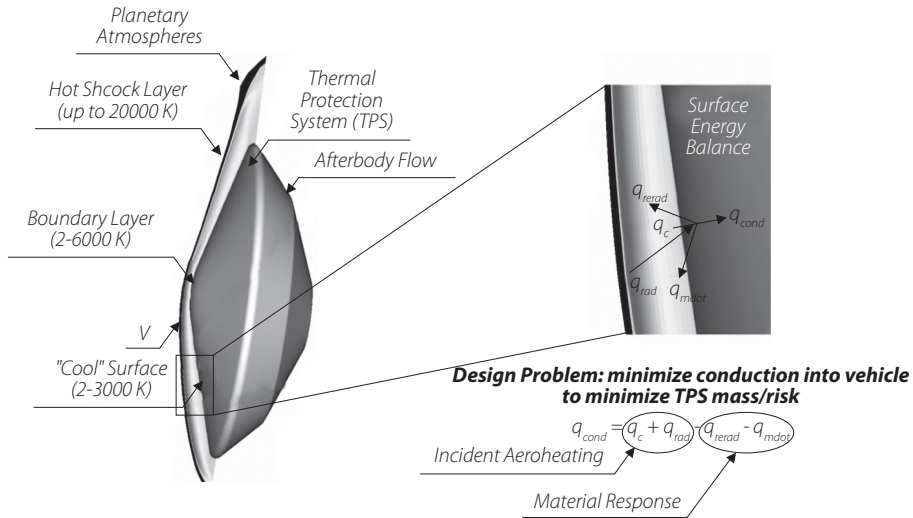


Figura 4. Balanço de energia na superfície do material ablativo [1].

Em que o balanço de calor na superfície pode ser particularizado como apresentado na Figura 5.

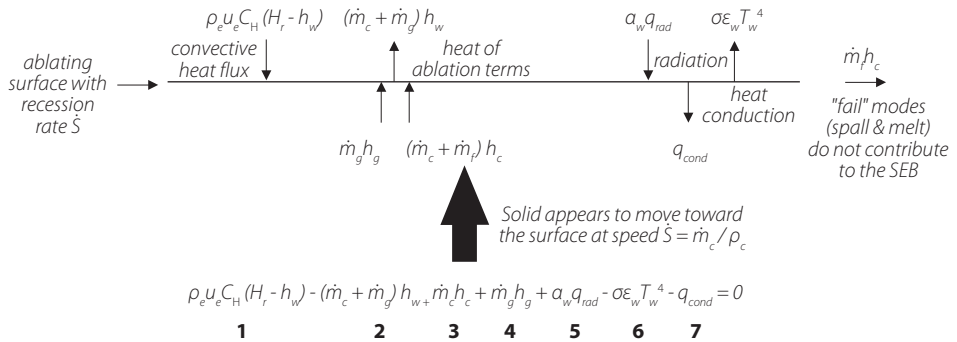
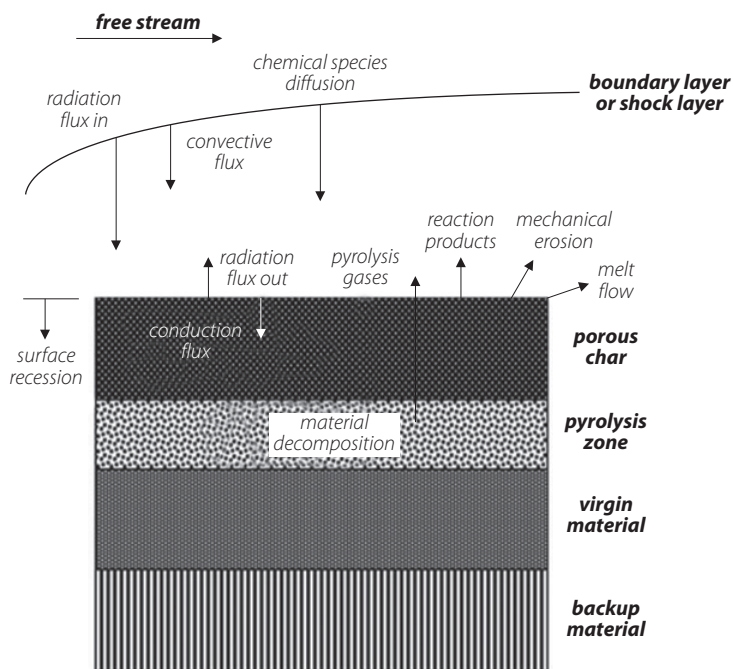


Figura 5. Fluxos de calor na superfície do ablativo. 1 Fluxo de calor de convecção; 2 Energia dos gases a sair da superfície; 3 Energia das partículas sólidas que entram na superfície por baixo; 4 Energia dos gases da pirólise oriundos abaixo da superfície; 5 Fluxo de calor de radiação; 6 Fluxo de calor de rerradiação; 7 Fluxo de calor conduzido ao material através da superfície.

A resposta do material é um alvo de estudos ao longo dos anos e torna-se essencial conhecê-la para melhor ajustar o tipo de material ablativo a cada missão espacial. Essa resposta do material faz-se em termos do calor de rerradiação (cuja fração é tanto maior quanto maior o fluxo de calor que atinge a

carboneto de silício). Dependendo das condições de reentrada, tal se pode dever a reações químicas (como a oxidação), mudança de fase (sublimação) e/ou erosão mecânica (espalçamento). São estas últimas reações – endo ou exotérmicas - que causam a recessão do material [5].

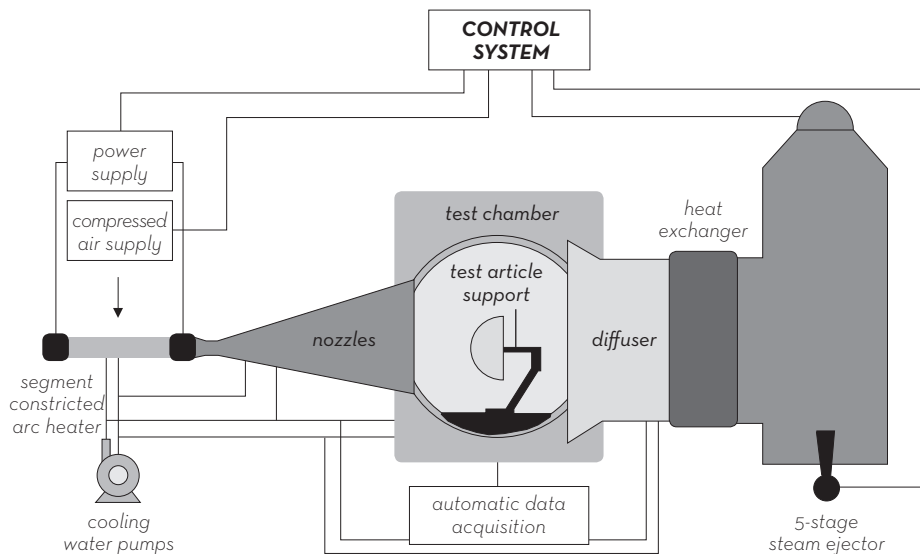


**Figura 7.** Estrutura base de um compósito ablativo durante a reentrada. Balanço de calor à superfície e esquema das reações termoquímicas cíclicas [5].

Do ponto de vista de projeto, trata-se então de aumentar o calor de rerradiação, o calor oriundo dos processos de degradação termoquímica e minimizar o consumo de material, melhorando as propriedades que retardam a ablação, de modo a que o calor conduzido à estrutura do veículo seja nulo e o peso da estrutura seja o menor possível.

Em suma, os mecanismos principais de dissipação de energia de um compósito ablativo são os seguintes [3]:

- Conversão de energia através de reações endotérmicas (decomposição térmica da matriz polimérica);
- Redução da transferência de calor por convecção (emissão de gases da pirólise para a camada limite);
- Redução da transferência de calor por radiação (emissão de partículas de carbono no fenómeno de rerradiação);
- Conversão de energia através da mudança de fase (fusão/sublimação da camada carbonizada – char).

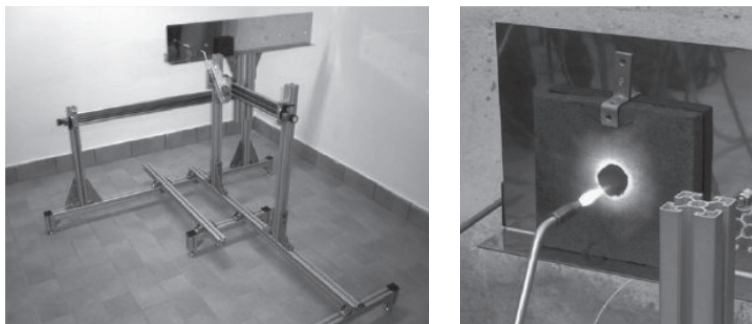


**Figura 20.** Esquema do túnel de vento com plasma, SCIROCCO <sup>[22]</sup>.

### 3.4.2. ENSAIO DE ABLAÇÃO COM CHAMA DE OXIACETILENO

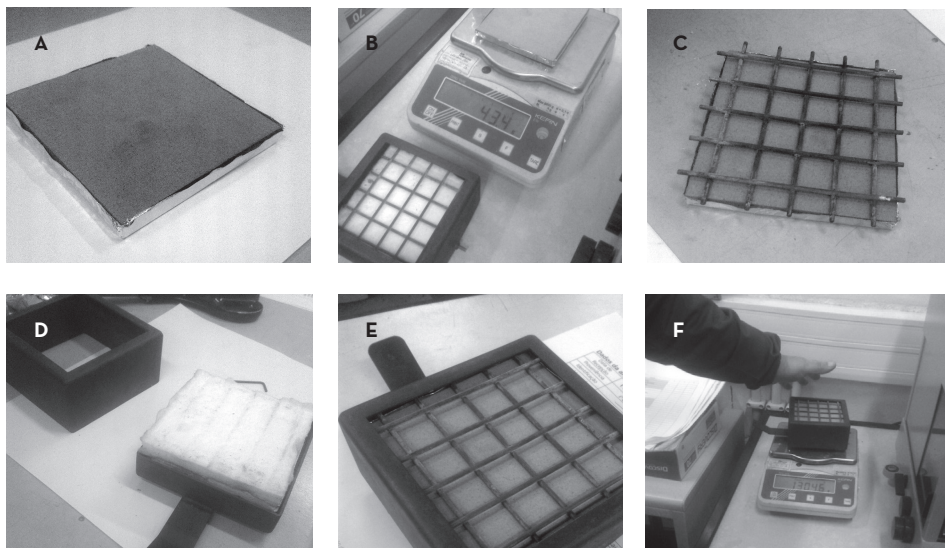
Um dos ensaios ao fogo mais utilizados em investigação académica como alternativa ao *Arc Jet Test*, são setups que utilizam a chama de oxiacetileno para simular a ablação de sistemas de proteção térmicos segundo a norma ASTM E 285-80.

A norma descreve um teste em amostras paralelepípedicas de materiais ablativos através de um fluxo de calor constante conseguido pela queima de oxiacetileno oriundo de um simples maçarico de soldadura previamente calibrado. Este teste é destinado a fornecer uma avaliação preliminar de materiais ablativos, com o objetivo de avaliar o isolamento térmico do material por comparação com outros sistemas ablativos <sup>[11]</sup>.



**Figura 21.** Setup de ablação em pequena escala desenvolvido por G. Pulci et al <sup>[11]</sup>.

riormente (**Figura 33.C e 33.F**), a amostra é colocada numa caixa metálica com uma grelha superior, sendo que o fluxo de calor do calorímetro de cone é transmitido à amostra através dessa grelha.



**Figura 33.** Procedimentos para a preparação das amostras do ensaio de calorimetria de cone.

#### 4.4.2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Três amostras como a da **Figura 33.E** foram colocadas no calorímetro de cone indicado na **Figura 34**. O aspeto final da amostra pode ser observado na **Figura 35**.



**Figura 34.** Ensaio no calorímetro de cone do INEGI.

Os principais resultados dos três ensaios estão descritos na **Tabela 7**, de onde se exclui a análise de fumos, dado que tal não se constitui como um dos tópicos de principal interesse neste trabalho.

O principal parâmetro indicado na **Tabela 6** é o tempo de ignição, uma vez que ele fornece uma informação explícita sobre o tempo em que se inicia a degradação. No caso do P50, verifica-se





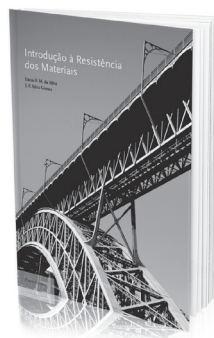
### **Materiais de Construção**

ISBN: 9789897230493  
Autores: Lucas da Silva,  
Fernando Alves,  
António Marques  
Páginas: 442  
Ano de Edição: 2013



### **Comportamento Mecânico dos Materiais**

ISBN: 9789897230240  
Autor: Lucas da Silva  
Páginas: 408  
Ano de Edição: 2012



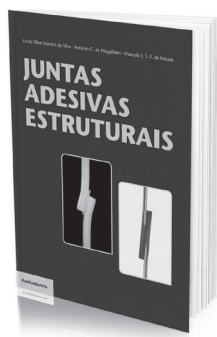
### **Introdução à Resistência dos Materiais**

ISBN: 9789728953553  
Autores: Lucas da Silva,  
Joaquim Gomes  
Páginas: 312  
Ano de Edição: 2010



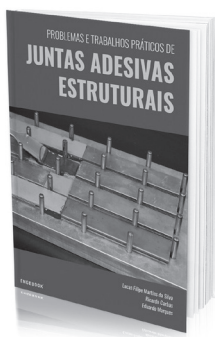
### **Problemas e Trabalhos Práticos de Metalurgia**

ISBN: 9789897231940  
Autores: Lucas da Silva,  
Teresa Duarte,  
Viriato Antunes  
Páginas: 234  
Ano de Edição: 2016



### **Juntas Adesivas Estruturais**

ISBN: 9789728953218  
Autores: Lucas da Silva,  
António Magalhães,  
Marcelo Moura  
Páginas: 358  
Ano de Edição: 2007



### **Problemas e Trabalhos Práticos de Juntas Adesivas Estruturais**

ISBN: 9789897232237  
Autores: Lucas da Silva,  
Ricardo Carbas,  
Eduardo Marques  
Páginas: 182  
Ano de Edição: 2017



### **Introdução ao Projeto Mecânico**

ISBN: 9789897232251  
Autores: António Completo,  
Francisco Melo  
Páginas: 350  
Ano de Edição: 2017



### **Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico**

ISBN: 9789728953003  
Autores: Marcelo Moura,  
Alfredo Morais,  
António Magalhães  
Páginas: 382  
Ano de Edição: 2009