



**Ana Rita Moreira  
Rodrigues da Silva**

**Fundição em Areia de Ligas Ferrosas**



**Ana Rita Moreira  
Rodrigues da Silva**

## **Fundição em Areia de Ligas Ferrosas**

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais, realizada sob a orientação científica da Professora Doutora Ana Maria Bastos da Costa Segadães, Professora Associada com Agregação do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro e supervisão de estágio do Doutor Rogério Lopes, Diretor do Departamento de Engenharia da Duritcast.



## **o júri**

presidente

**Doutor Filipe José Alves de Oliveira**  
Investigador Auxiliar do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica

**Professor Doutor Joaquim Manuel da Graça Sacramento**  
Equiparado a Professor Coordenador S/ Agregação, Universidade de Aveiro

**Doutor(a) Rogério Paulo Alves Lopes**  
Diretor Técnico e de Qualidade, Duritcast

## **agradecimentos**

O trabalho descrito neste relatório de estágio não poderia ter sido concretizado sem a colaboração de diversas pessoas e instituições, às quais devo o meu sincero agradecimento.

Em particular, devo agradecer à Professora Ana Segadães que me orientou neste trabalho, pelos conhecimentos transmitidos e por toda a disponibilidade que sempre encontrei.

À Universidade de Aveiro e ao Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica pela disponibilidade dos seus recursos humanos e materiais. Igualmente gostaria de deixar uma palavra de agradecimento ao meu orientador na DURICAST, o Engenheiro Rogério Lopes por todas as ideias e sugestões, pela disponibilidade e por me conceder ampla liberdade de trabalho para progredir no estudo.

À Manuela por me ter acompanhado desde do meu primeiro dia na Duritcast, pelo apoio e tempo despendido. E aos demais funcionários da empresa que se prestaram a colaborar comigo. Não consigo citar todos os nomes, mas fica a gratidão, uma vez que não poderia completar as minhas tarefas sem a sua colaboração.

Agradeço também aos meus amigos pelos bons momentos passados, pela paciência e apoio.

Finalmente, só posso agradecer aos meus pais, em especial à minha mãe por terem sempre uma palavra de incentivo em diversos momentos. Aos meus irmãos, tia Rosa Maria e Gonçalo por sempre terem facilitado e ajudado no meu percurso académico.

Ao Daniel pela compreensão, pelo companheirismo, pelo carinho e pela ajuda ao longo destes anos.

**A todos, o meu sincero Obrigada!**

## palavras-chave

Refratário, reutilização, EMMA, escoabilidade, EPS, R-limoneno, fundição.

## resumo

O presente trabalho relata o trabalho desenvolvido num estágio na empresa Duritcast, a par da vivência das operações rotineiras do processo de fundição em areia ambicionou-se desenvolver soluções para duas das preocupações do setor. A primeira relacionada com o descarte dos revestimentos refratários dos equipamentos de fusão, e a segunda com a preparação das moldações utilizando modelos em poliestireno expandido (EPS).

Os fornos de fundição, são revestidos com uma camada de refratário que se consome por corrosão pela escória ou por abrasão/reacção aos elementos presentes no processo. Os revestimentos em fim de vida são depositados em aterros após o abatimento dos fornos mas a importância crescente das questões ambientais impõe a procura de possíveis vias de reutilização. O nome comercial do material refratário usado no revestimento dos fornos da Duritcast é "Coral SLX" e é constituído essencialmente por alumina e magnésia (espinela) é um granulado denso e seco e aplica-se por compactação. Neste trabalho pretendeu-se estudar a recuperação da fração não contaminada do refratário na forma de granulados com uma escoabilidade adequada para a conformação de acessórios para fundição de aço. Recorrendo ao EMMA (Elkem Materials Mix Analyzer) um programa de avaliação do empacotamento de partículas através do controlo da distribuição granulométrica, foi possível criar a nova mistura de pós auto-escoante. Manipulando as classes granulométricas para se obter um pó com escoamento ótimo deve-se adicionar 38,3% da classe (2000-106 µm), 29,7% da classe (2000-500 µm), 17,8% da classe (1000-500 µm) e 14,2% da classe (106-63 µm).

No segundo caso, a facilidade de modelagem oferecida pelo EPS é contrabalançada pela libertação de gases (CO<sub>2</sub>) emitidos para a atmosfera durante a combustão do polímero e pelos defeitos provocados pela dificuldade de remoção do EPS não consumido da superfície da peça. O objetivo deste trabalho foi estudar a remoção do EPS através da sua dissolução por um solvente orgânico, amigo do ambiente, R-limoneno. Foi estudado o melhor método de aplicação do solvente, tendo-se concluído que o mais eficaz seria com a pipeta pois a reacção dá-se de uma forma mais extensa. A solubilização do EPS foi testada em moldações de tamanhos diferentes, pelo que conclui-se que este processo só é viável quando se pretende obter peças menores que 1 Ton.

Durante o estágio foram realizados outros trabalhos, nomeadamente na área da qualidade e acompanhamento do processo produtivo de ferro nodular. A realização destas atividades permitiu o enquadramento no processo produtivo e o ganho de autonomia na prática laboratorial.

**keywords**

Refractory, reuse, EMMA, flowability, EPS, R-limonene, casting.

**abstract**

This document describes the work carried out during an internship at the Duritcast company. Along with the experience of daily operations of the sand casting process, the main aim was to develop solutions for two industry concerns. The first related to the disposal of refractory linings of fusion equipment, and the second with the preparation of patterns using models of expanded polystyrene (EPS).

In the first case, after the furnace lining is dismantled, the spent refractories are landfilled, but the growing importance of environmental issues requires looking for possible ways to reuse them. The reuse potential of the uncontaminated fraction of the refractory was investigated, in the form of loose aggregates with the flowability adequate to manufacture steel casting accessories. Using the EMMA program, it was possible to study the particle size distribution and create a new blend with maximum flowability which should 38,3% of the class (2000-106  $\mu\text{m}$ ), 29,7% of the class (2000-500  $\mu\text{m}$ ), 17,8% of the class (1000-500  $\mu\text{m}$ ) and 14,2% of class (106-63  $\mu\text{m}$ ).

In the second case, the ease of modeling offered by EPS is offset by the release of gases ( $\text{CO}_2$ ) emitted into the atmosphere during combustion of the polymer and the defects caused by the difficulty of removing unconsumed EPS left on the part's surface. We intended to study the removal of EPS through dissolution by organic, environmentally friendly R-limonene solvent, was studied the solvent's most effective application method was found to be the utilization of the pipette due to a more extensive reaction of EPS and R-Limone. Solubility of the EPS was tested in molds of different sizes and it was concluded that this process is only possible when applied on parts smaller than 1 ton.

During the internship other activities were conducted particularly in the area of quality and monitoring the process of production of ductile iron. These activities promoted a better knowledge of the productive process and increased autonomy in laboratory practice.





# Índice

<b>Índice .....</b>	<b>I</b>
<b>Lista de Abreviaturas e Símbolos .....</b>	<b>III</b>
<b>Índice de Figuras .....</b>	<b>IV</b>
<b>Índice de Tabelas.....</b>	<b>VI</b>
Capítulo I.....	1
1 Introdução.....	3
1.1 Duritcast .....	4
1.2 Processo Produtivo.....	5
1.2.1 Fusão .....	5
1.2.2 Moldação.....	6
1.2.3 Macharia.....	6
1.2.4 Acabamentos .....	6
Capítulo II.....	9
2 Estado da arte.....	11
2.1 Materiais Refratários .....	12
2.1.1 Evolução dos refratários.....	14
2.1.2 Impacto Ambiental da Indústria de Fundição .....	15
2.2 Processo por Evaporação do Modelo .....	17
Capítulo III .....	21
3 Atividades de Estágio .....	23
3.1 Ferro Fundido.....	23
3.2 Ferro Nodular .....	25
3.2.1 Propriedades e aplicações.....	26
3.2.2 Processo de Produção na Duritcast .....	29
Capítulo IV .....	33
4 Metodologia.....	35
4.1 Ensaio de tração e Análise Metalográfica.....	35
4.2 Solubilização do EPS .....	37
4.3 Reutilização de revestimentos refratários.....	39
Capítulo V .....	41
5 Apresentação e discussão de resultados.....	43
5.1 Solubilização EPS .....	43
5.2 Reutilização dos revestimentos refratários.....	51

Capítulo VI.....	57
6 Conclusão .....	59
Bibliografia.....	61

## Lista de Abreviaturas e Símbolos

EPS	Poliestireno Expandido
EMMA	<i>Elkem Materials Mix Analyzer</i>
PSD	Distribuição granulométrica
EPC	Processo por Evaporação do Modelo
q	Módulo de distribuição (Modelo de Andreasen)
$R_{p0,2}$	Limite de escoamento
$R_m$	Resistência Mecânica
A (%)	Alongamento
HB	Dureza de Brinell
DRX	Difração de Raio- X
IUPAC	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>

# Índice de Figuras

Figura 1: vista geral da Duritcast na sua localização atual <sup>1</sup> . .....	3
Figura 2: exemplo de um vazamento manual realizado na Duritcast <sup>1</sup> . .....	5
Figura 3: representação esquemática do interior de um forno de indução <sup>6</sup> . .....	12
Figura 4: tendência do consumo específico de refratário na indústria do aço <sup>9</sup> . .....	14
Figura 5: fotografia de um pedaço de revestimento abatido, onde se distinguem a zona contaminada e a zona reciclável. ....	17
Figura 6: fórmula estrutural do poliestireno (n-número de unidades repetitivas) <sup>16</sup> . .....	18
Figura 7: diagrama de fases parcial ( $C < 6,7\%$ ) do sistema Ferro-Carbono <sup>5</sup> . .....	23
Figura 8: microestruturas típicas dos ferros fundidos nodulares em estado bruto de vazamento <sup>27</sup> . .....	25
Figura 9: curva tensão - extensão. ....	27
Figura 10: Curva de análise térmica de um ferro fundido e seus principais pontos críticos <sup>27</sup> . .....	30
Figura 11: A- formato do provete Y utilizado na produção do provete de tração; B- corte da amostra, para produzir o provete de tração, para posteriormente maquinar. ....	32
Figura 12: Provete de tação e amostras para análise metalográfica. ....	32
Figura 13: caixa de moldação e modelo de EPS usado. ....	38
Figura 14: moldação pronta a aplicar o R-limoneno. ....	38
Figura 15: caixa de moldação e modelo de EPS. ....	39
Figura 16: bloco de revestimento refratário tal como é habitualmente descartado. ....	39
Figura 17: superfície de um cubo de EPS antes da aplicação do limoneno. ....	43
Figura 18: fotografias dos resultados obtidos após a aplicação do R-limoneno com uma pipeta para tempos de reação de 30 min e 2, 4 e 24 horas. ....	43
Figura 19: fotografias dos resultados obtidos após a aplicação do R-limoneno com um pincel para tempos de reação de 30 min e 2, 4 e 24 horas. ....	44
Figura 20: fotografias dos resultados obtidos após a aplicação do R-limoneno com um aspersor para tempos de reação de 30 min e 2, 4 e 24 horas. ....	44
Figura 22: evolução da degradação do modelo de EPS após aplicação do limoneno com um pincel numa moldação de uma peça menor que 1 Ton. ....	45
Figura 22: peça obtida através da moldação estudada. ....	46
Figura 23: moldação após a degradação total do EPS. ....	46
Figura 24: peça obtida através da moldação da Figura 23. ....	47
Figura 25: estado de degradação do modelo de EPS ao fim 4 horas de reação. ....	48
Figura 26: moldação após a solubilização de todo o modelo de EPS. ....	48
Figura 27: ampliação da Figura 26. ....	49

Figura 28: repetição do ensaio anterior com a caixa de moldação na vertical. ....	50
Figura 29: estado de degradação do modelo de EPS ao fim 4 horas de reação.....	50
Figura 30: DRX obtido a partir da amostra do refratário usado.....	52
Figura 31: representação gráfica da distribuição granulométrica dos grãos refratários e do modelo de Andreassen obtidos para escoabilidade máxima ( $q=0,21$ ). ....	53
Figura 32: curva de distribuição granulométrica da amostra com distribuição de Andreasen teórica e experimental obtida com a combinação de diferentes classes da matéria-prima. ....	55

## Índice de Tabelas

Tabela 1: exemplo de peças produzidas na Duritcast <sup>1</sup> .....	4
Tabela 2: classificação e composição de alguns materiais cerâmicos refratários <sup>7</sup> .....	12
Tabela 3: classificação dos principais Ferros Fundidos <sup>4,26</sup> .....	24
Tabela 4: propriedades mecânicas determinadas em ensaios de tração e dureza das ligas de ferro nodular produzidas na Duritcast.....	28
Tabela 5: temperatura de cada colher de vazamento.....	32
Tabela 6: etapas do processo para realizar os ensaios de tração. ....	36
Tabela 7: etapas do processo para revelar a microestrutura da liga. ....	37
Tabela 8: elementos químicos da amostra 1 segundo a ficha técnica do fornecedor. ....	51
Tabela 9: distribuição granulométrica do refratário obtido após o abatimento do forno. ....	53
Tabela 10: constituição (% peso) de cada classe granulométrica na distribuição original e numa distribuição de fluidez máxima. ....	55

# Capítulo I





# 1 Introdução

O presente trabalho é um relatório de estágio realizado no âmbito do Mestrado em Engenharia de Materiais, do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro. Este estágio decorreu de Outubro de 2013 até Junho de 2014 na empresa de fundição Duritcast (Figura 1) sob a orientação da Professora Doutora Ana Segadães, docente do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica, e do Doutor Rogério Lopes, responsável pelo Departamento de Engenharia na Duritcast. Durante este período de estágio pretendeu-se procurar e desenvolver soluções para duas preocupações deste setor, sendo a primeira relativa ao descarte dos revestimentos refratários usados nos equipamentos de fusão e a segunda relacionada com a preparação de moldações utilizando modelos em poliestireno expandido (EPS). A par destes dois objetivos pretendeu-se ainda vivenciar e aprender as operações rotineiras do processo de fundição em areia.

No primeiro caso, devido à importância crescente das questões ambientais, pretendeu-se procurar possíveis vias de reutilização dos revestimentos refratários, minimizando a deposição em aterro dos revestimentos abatidos. Como tal estudou-se a recuperação da fração não contaminada do refratário na forma de granulados com uma escoabilidade adequada para a conformação de acessórios para fundição de aço.

No segundo caso, a simplicidade oferecida pela moldação usando modelos em EPS quando se utiliza a técnica tradicional é contrariada pela emissão de gases libertados durante a combustão do EPS e pelos defeitos que os resíduos dos modelos podem provocar caso fiquem aprisionados no interior da moldação. Pretendeu-se estudar a remoção do EPS através de dissolução por um solvente orgânico, amigo do ambiente, evitando assim as contrariedades acima referidas.



**Figura 1:** vista geral da Duritcast na sua localização atual <sup>1</sup>.

## 1.1 Duritcast

A Duritcast, antiga FUSAG S.A., é uma fundição pertencente ao grupo Durit Portugal. O grupo Durit surgiu há mais de 30 anos com o nascimento da Durit, que incide a sua atividade no fabrico de ferramentas e componentes de precisão de metal duro. O grupo Durit é composto pelas empresas Durit (Portugal, Alemanha, Espanha e Brasil), Moldit, (Portugal e Brasil), Vitricer, Duromin, Helitene, TEandM, Duritcast e Duritsteel. O crescimento do grupo Durit é notório possuindo ainda duas unidades produtivas no Brasil e representações técnico-comerciais na Alemanha e em Espanha <sup>1</sup>.

A unidade fabril Duritcast existe desde Junho de 2008, encontra-se sediada na zona industrial de Águeda e possui um capital social de 2.850.000 euros. A sua produção está dirigida não só para o mercado nacional mas também para o internacional, nomeadamente para Espanha, Suíça, França, Alemanha, Itália, Reino Unido, Noruega, Dinamarca e Bélgica, tendo capacidade para fundir até cerca de 11.000 toneladas por ano. Esta empresa possui clientes nos setores de transporte de fluidos (bombas e válvulas), transportes (ferroviários, agrícolas e rodoviários), construção de máquinas, construção naval e energia <sup>2</sup>. Na Tabela 1 encontram-se alguns exemplos de peças produzidas na Duritcast.

**Tabela 1:** exemplo de peças produzidas na Duritcast <sup>1</sup>.

Bombas e Válvulas			Construção de Máquinas		
					
Energia			Transportes		
					
Construção Naval			Outros		
					

## 1.2 Processo Produtivo

Um processo normal de fundição tem como sequência de produção o projeto do componente a ser vazado, a execução dos modelos, placas-molde e caixas de macho, a produção de moldações e de machos, a fusão e o vazamento do metal, a desmoldação da peça e os acabamentos <sup>3</sup>.

A Duritcast possui dois fornos de indução dedicados à fusão de ferro fundido e aço, duas linhas de moldação (uma automática GF e outra manual OMEGA), uma secção de macharia e secções de maquinaria, acabamentos (granalhagem, rebarbagem, tratamento térmico e pintura) e controlo da qualidade das peças produzidas <sup>1</sup>.

### 1.2.1 Fusão

Recorrendo aos dois fornos disponíveis na Duritcast, é efetuada a mistura e a fusão das matérias-primas para obtenção das diferentes ligas com os vários elementos que constituem ferros fundidos e aços. Os aços contém, geralmente, entre 0,03 a 2,06% de teor de carbono e elementos químicos residuais (Si, Mn, P e S). Os ferros fundidos possuem um teor em carbono que varia entre os 2,06 e 4% e teores de silício entre 1 e 3% <sup>4</sup>.

Cada forno tem capacidade até 4 toneladas e o material é vazado através de colheres inclinadas manualmente de maneira a permitir um escoamento mais fácil do metal como se pode observar na Figura 2. No caso do ferro fundido nodular, os vazamentos são sempre controlados através de análises térmicas e espectrometrias <sup>1</sup>.



**Figura 2:** exemplo de um vazamento manual realizado na Duritcast <sup>1</sup>.

### **1.2.2 Moldação**

Nos processos convencionais de moldação em areia verde, o modelo (geralmente dividido em duas partes) suportado pela respetiva placa-molde é colocado numa caixa apropriada e envolvido por areia com um ligante argiloso que lhe confere resistência mecânica. Desta forma, cria-se um molde que é o negativo dessa parte da peça, ao qual se dá o nome de moldação. Após a estabilização da moldação o modelo é retirado e as caixas de moldação são fechadas (com ou sem machos no seu interior), procedendo-se então ao vazamento <sup>5</sup>. As moldações são consideradas “perdidas” pois cada moldação produz peça(s) vazada(s) apenas uma vez, sendo necessário “partir” o molde que lhe(s) deu origem para a(s) extrair. Existem outros processos de fundição, que não em areia, em que se pode vaziar uma série de peças sem alteração significativa do molde, isto é após cada vazamento a moldação pode ser aberta para a extração da peça e reutilizada. A moldação é então considerada “permanente” <sup>3</sup>.

A Duritcast possui uma linha de moldação automática com uma máquina de moldar por impacto com capacidade para produzir 50 moldações por hora para peças até 120 kg. Possui ainda uma linha de moldação manual com capacidade para peças até 4 toneladas <sup>1</sup>.

### **1.2.3 Macharia**

Na macharia fabricam-se, de acordo com as especificações pretendidas e a partir de diferentes tipos de areia, os machos responsáveis pela formação de cavidades nas peças vazadas. Os machos são colocados no interior da moldação antes das peças serem vazadas <sup>3</sup>. Esta secção é dividida em macharia manual (Auto-secativa) e em macharia automática (de caixa fria) <sup>1</sup>.

### **1.2.4 Acabamentos**

Após o vazamento, arrefecimento do metal e desmoldação (abate das moldações), em geral as peças são sujeitas a uma limpeza por jato de areia ou de granalha, ao corte dos gomos de vazamento e alimentação e uma posterior rebarbagem. As peças poderão ainda ser sujeitas a um processo de maquinagem e ser pintadas. A precisão final das dimensões das peças vazadas depende deste conjunto de acabamentos que, como tal, devem ser executados de forma cuidada e criteriosa. Por último as peças e o material de que estas são feitas são sujeitos a alguns testes de controlo de qualidade (dimensões, dureza, outros

ensaios não destrutivos como ultra-sons, partículas magnéticas e líquidos penetrantes, e ainda de resistência mecânica) <sup>1,3</sup>.



# Capítulo II





## 2 Estado da arte

Designa-se por fundição o conjunto de métodos, técnicas e processos usados para fabricar peças a partir de metal fundido sendo o seu objetivo principal dar a forma geométrica desejada ao metal. Para além da forma geométrica, as propriedades físicas da peça devem ser apropriadas a cada uma das solicitações a que vai estar sujeita durante o seu funcionamento. Devido à multiplicidade de parâmetros envolvidos, dos mais variados ramos da ciência, associados a um custo de produção comparativamente reduzido, o fabrico de peças metálicas por fundição, sendo dos mais tradicionais, é simultaneamente dos mais versáteis e suscetíveis de inovação e otimização nas diferentes fases de produção para manter ou melhorar a qualidade do produto final.

Na tecnologia da fundição, o processo de fusão tem uma grande importância pois deve permitir obter um metal fundido com a qualidade desejada, à temperatura conveniente e ao mais baixo preço. Um equipamento de fusão (forno e colheres) é muito dispendioso, com consumo de energia e matérias-primas específicos, tendo por norma um ciclo de vida superior a 30 anos. Como tal, a seleção do equipamento é feita com base numa análise criteriosa comparando os diferentes modelos existentes e os correspondentes custos de matérias-primas e energia <sup>3</sup>.

Os fornos existentes na Duritcast têm como princípio de funcionamento o aquecimento por corrente elétrica induzida no metal e podem ser classificados consoante a frequência de operação, que varia entre 50 Hz e 400 kHz dependendo do material a ser fundido, do volume do forno e da velocidade de fusão desejada <sup>6</sup>.

Estes são revestidos interiormente por um material refratário para permitir uma maior eficácia térmica e qualidade metalúrgica. A utilização deste tipo de revestimentos nos fornos de indução, que são substituídos regularmente, resulta em temperaturas de transformação mais baixas e numa menor perda de calor durante o vazamento. Na Figura 3 representa-se esquematicamente o interior de um forno de indução.



**Figura 3:** representação esquemática do interior de um forno de indução <sup>6</sup>.

## 2.1 Materiais Refratários

Um refratário entende-se como um material capaz de suportar temperaturas elevadas. Sendo esta uma definição tão abrangente, os países produtores destes materiais implementaram normas que especificam quando e em que condições de teste é que um dado material pode ser considerado refratário. Estas normas estabelecem que, para que seja considerado refratário, um material deve resistir sem fundir, amolecer ou deformar, a temperaturas  $\geq 1500^{\circ}\text{C}$ .

Na generalidade das aplicações, os refratários necessitam de ser resistentes ao choque térmico, pelo que devem ter condutividade térmica elevada e baixo coeficiente de expansão térmica, e ser quimicamente inertes. São geralmente constituídos por misturas de óxidos de elevado ponto de fusão e o seu desempenho depende da sua composição química e podem ser classificados em inúmeros tipos, como os ilustrados na Tabela 2 <sup>7</sup>.

**Tabela 2:** classificação e composição de alguns materiais cerâmicos refratários <sup>7</sup>.

Tipo de material refratário	Composição Química (%p)						
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>3</sub>
Refratários Argilosos	25-45	70-50	0-1	-	0-1	0-1	1-2
Refratários Ácidos	0,2	96,3	0,6	-	-	2,2	-
Refratários Básicos	1,0	3,0	90,0	0,3	3,0	2,5	-
Refratários Especiais	9,0	5,0	73,0	8,2	2,0	2,2	-

Como se pode observar na Tabela 2 as argilas usadas no fabrico de refratários são de elevada pureza e contêm maioritariamente alumina ( $Al_2O_3$ ) e sílica ( $SiO_2$ ). Nesta faixa de composições, a temperatura para o início da formação de fase líquida é de  $1587^\circ C$  e quanto maior o teor de alumina, menor a quantidade de líquido formado e maior a temperatura máxima de serviço. Os refratários argilosos foram os primeiros a serem utilizados pelo homem e ainda são utilizados na produção de cadinhos para a fusão de metais ou de vidros.

Nos refratários à base de sílica ( $SiO_2$ ), ou refratários ácidos, a presença de alumina deve ser mantida no mínimo (0,2% em peso) pois, como já referido, a formação de fase líquida ocorre a  $1587^\circ C$  mas, nesta faixa de composições, a quantidade de líquido formado aumenta com o teor de alumina. Estes foram desenvolvidos em resposta à necessidade de melhores desempenhos, devido à evolução da indústria siderúrgica e são frequentemente usados no revestimento de fornos para a fundição de ferro.

Os refratários básicos são ricos em óxido de magnésio ( $MgO$ ) ou de cálcio ( $CaO$ ), mas também podem conter crómio ou ferro, e suportam temperaturas de serviço mais altas. Por serem constituídos maioritariamente por óxidos básicos, o teor de sílica deve ser baixo pois esta compromete o desempenho do refratário a altas temperaturas. São usados no revestimento de fornos para a fundição de aço.

Os refratários especiais são obtidos a partir de matérias-primas de elevada pureza, muitas vezes sintéticas, tais como a mulite, ou produzidos com métodos especiais de fabrico, como a eletrofusão <sup>7,8</sup>.

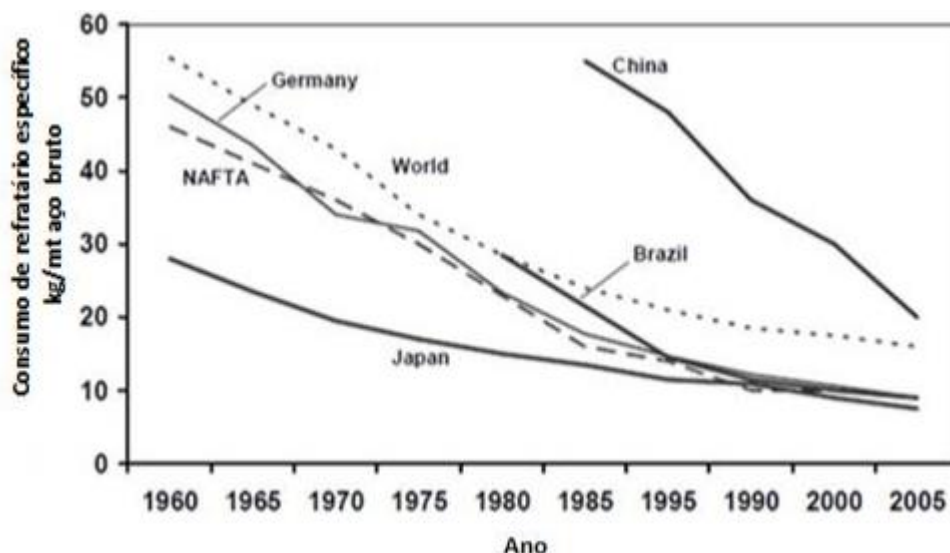
Os refratários podem ainda ser classificados quanto à sua forma em moldados e não moldados (monolíticos). Os refratários moldados são obtidos por meio de extrusão ou prensagem e as suas propriedades finais desenvolvem-se por cozedura a temperaturas suficientemente altas para que se crie uma ligação cerâmica entre os grãos da matriz refratária. Por sua vez, os refratários monolíticos são obtidos quase exclusivamente por vazamento “in situ” de betões refratários e a sua aplicação é realizada através de bombeamento, com ou sem vibração, permitindo a remoção do ar e o recobrimento de toda a área a revestir. Hoje em dia ainda se podem encontrar refratários conformados/moldados (tijolos) mas a maior parte da produção é de não conformados para revestimentos monolíticos <sup>8,9</sup>.

### 2.1.1 Evolução dos refratários

Apesar de se encontrarem referências à utilização de argilas refratárias anteriormente à idade do ferro, apenas se começou a dar mais importância ao desenvolvimento de materiais refratários após a Revolução Industrial, séculos XVII e XIX, como resposta ao desenvolvimento de novos tipos de fornos impulsionados por um aumento acentuado do consumo/produção de aço.

As duas guerras mundiais e posteriormente, a crise do petróleo devido ao embargo dos países exportadores influenciaram a evolução tecnológica dos refratários. A preservação de recursos naturais e a sustentabilidade energética passaram a ser preocupações fundamentais na evolução dos refratários, tendo a indústria dos refratários respondido rapidamente a tais questões. Uma das soluções encontradas foi a introdução da reparação dos revestimentos refratários, a instalação nos fornos sistemas de refrigeração, de monitorização e controlo de escórias.

Através da análise do gráfico da Figura 4 pode-se concluir que o consumo específico de refratários tem diminuído ao longo dos anos devido ao desenvolvimento da tecnologia de processamento do aço e da melhoria dos revestimentos refratários.



**Figura 4:** tendência do consumo específico de refratário na indústria do aço <sup>9</sup>.

Apesar de haver um decréscimo acentuado do consumo de refratários, a qualidade dos mesmos tem aumentado significativamente, o que também inclui o uso matérias-

primas sintéticas. Pode-se concluir, assim que a evolução tecnológica dos refratários deuse sempre a par com a evolução da indústria metalúrgica <sup>8,9</sup>.

Em 1997, 80 mil toneladas de resíduos refratários foram desmantelados e enviados diretamente para aterro sem qualquer tipo de tratamento intermédio. Desde o início do século XX que a legislação de muitos países defende que os materiais granulados devem ser tratados como elementos prejudiciais ao meio ambiente e saúde. No caso do desmantelamento dos fornos, o manuseamento de refratários leva a uma propagação de partículas de SiO<sub>2</sub> que promovem uma desordem pulmonar muito prejudicial para a saúde. Os revestimentos dos fornos usados no processamento de ligas de cobre (blocos de magnésia-crómio) na presença de óxidos alcalinos formam crómiohexavalente. Este tipo de crómio, em elevadas concentrações, torna os solos inférteis e pode causar cancro do pulmão, problemas respiratórios, hemorragias internas e lesões no fígado ou rins. O envio destes resíduos para aterro, para além de prejudicial ao meio ambiente, acarreta elevados custos (transporte do resíduo, taxas de aluguer dos aterros, etc).

Atualmente são produzidos milhões de toneladas de ferro, aço, alumínio, cobre, vidro, cimento, gasolina, entre outros, que não seria possível produzir sem a existência de refratários. A escassez de matérias-primas leva à aplicação de taxas de exportação elevadas resultando num aumento significativo do custo final do material refratário. Esta escassez de matérias-primas aliada a uma preocupação crescente do meio ambiente leva a procura de novas soluções, como a reciclagem e reutilização.

No entanto a aposta na reciclagem de resíduos tem sido pouco praticada pois retorno económico deste investimento é um pouco demorado. O facto das matérias-primas virgens terem maior confiabilidade que os reciclados, é a outra das desvantagens da reciclagem de resíduos <sup>9</sup>.

### **2.1.2 Impacto Ambiental da Indústria de Fundição**

A indústria de fundição sempre foi considerada culpada de afetar negativamente o meio ambiente, não só pelo consumo de elevadas quantidades de recursos naturais mas também devido à produção de resíduos nocivos para o ambiente. Com a crescente preocupação ambiental, as fundições viram-se obrigadas a começar a estudar e desenvolver projetos para minimizar os problemas gerados durante o processo de produção,

nomeadamente para reduzir a quantidade de resíduos depositados em aterro, procurando aplicações alternativas que permitam pelo menos a sua reutilização parcial.

Durante a operação do forno de indução, o revestimento refratário vai sendo progressivamente consumido, seja por corrosão pela escória, seja por abrasão e choque térmico, até que a insuficiência de espessura (insuficiente isolamento térmico) impõe a substituição do revestimento. O tempo de vida dos revestimentos é determinado pelas condições hostis que se verificam dentro do forno. Quando a espessura do revestimento é considerada insuficiente para a operação segura do equipamento, o revestimento é abatido e substituído por um novo. Após o abate do revestimento, os refratários usados são depositados em aterro e podem ser associados a uma vasta gama de problemas ambientais nos rios e solos das regiões em que são depositados <sup>8,10,11</sup>.

Contudo, apenas a face quente do revestimento fica realmente inutilizada devido à contaminação por infiltração/reacção de elementos presentes no processo de fundição, sendo que uma parte importante da espessura do revestimento abatido não chega a ser contaminada e, por se tratar de um revestimento monolítico, apresenta-se num estado de sinterização incipiente (Figura 5). Nos dias que correm, aliada à preocupação com a preservação do meio ambiente, a legislação sobre resíduos perigosos também abrange o descarte dos refratários, o que leva a uma crescente procura de formas de os reciclar <sup>8,10,11</sup>.

Por se tratar de um material refratário granulado, as alternativas de reutilização passam pela otimização da distribuição granulométrica (PSD, *Particle Size Distribution*) tendo em vista a obtenção de um material auto-escoante para a posterior utilização no fabrico de acessórios de fundição. Recorrendo ao programa “EMMA” (*Elkem Materials Mix Analyzer*), um programa baseado no modelo de *Andreasen* de empacotamento de partículas, é possível avaliar o empacotamento e controlar a PSD, para se atingir o módulo de distribuição (q) pretendido <sup>12</sup>.

Futuramente, espera-se criar uma barbotina a partir da nova mistura de pós obtida no “EMMA” e criar alternativas para a produção de acessórios de fundição. machos, cadinhos, cones de vazamento e filtros de fundição são alguns exemplos de acessórios que possivelmente poderão ser produzidos através da reutilização dos revestimentos refratários do forno.



**Figura 5:** fotografia de um pedaço de revestimento abatido, onde se distinguem a zona contaminada e a zona reciclável.

## 2.2 Processo por Evaporação do Modelo

A segunda grande etapa do fabrico de peças metálicas por fundição em areia reúne os processos de preparação das moldações para o vazamento do metal fundido. A produção dos modelos e caixas de machos, a construção da moldação e a seleção dos materiais das moldações são fases destes processos com uma grande influência na obtenção de uma peça fundida sã <sup>3</sup>. Os processos de fundição de moldação perdida podem ser classificados em processos de moldação perdida/modelo permanente, que é o mais tradicional, ou processos de moldação perdida/modelo perdido.

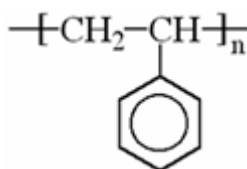
Um dos processos mais representativos da fundição de moldação perdida/modelo perdido é o processo por evaporação do modelo (EPC, *evaporative pattern casting*), que explora a facilidade da modelagem oferecida pelo poliestireno expandido (EPS, *expanded polystyrene*). Este processo, introduzido em 1964 por Flemmings, é adotado quando se pretende obter peças metálicas de alta precisão ou de geometria complexa e consiste em usar um modelo de EPS com a conformação exata da peça, coberto por areia, que não é removido da moldação antes do vazamento do metal. Durante o vazamento, o metal queima o modelo de EPS, adquirindo exatamente a sua forma <sup>3, 13</sup>.

O processo de fundição EPC foi desenvolvido para proporcionar melhorias significativas na fundição devido à sua simplicidade e baixo custo de matéria-prima. Este processo permite obter espessuras mínimas (secções de 3,5 mm) e furos com 3 mm de diâmetro. É comumente usado para o fabrico de peças para a indústria automóvel <sup>3</sup>. Apesar disso, o processo de fundição EPC possui limitações, nomeadamente a libertação

abundante de gases resultantes da combustão do polímero (CO<sub>2</sub>) e os resíduos de poliestireno ou areia de moldação que podem ficar sobre a peça podendo danificá-la e levar à sua completa inutilização<sup>3</sup>.

O EPS é um homopolímero celular na forma de espuma rígida, tecnologicamente avançado, económico e respeitador do ambiente, que se pode encontrar numa grande variedade de aplicações<sup>14</sup>. Este é constituído por 98% de ar e 2% de polímero e é obtido através da polimerização por radicais livres de estireno atáctico (monómeros de configuração aleatória) em suspensão<sup>15</sup>.

Na Figura 6 encontra-se a fórmula estrutural do poliestireno. O monómero de estireno, C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>, é um subproduto do petróleo e da nafta produzida durante a refinação do petróleo ou pode ser encontrado naturalmente em plantas e frutos<sup>16</sup>.



**Figura 6:** fórmula estrutural do poliestireno (n-número de unidades repetitivas)<sup>16</sup>.

Quando exposta a temperaturas crescentes, a espuma polimérica entra em colapso e amolece entre 110-120°C e, quando se atinge 160°C, o polímero funde. Até 275°C o fundido permanece estável mas a 460-500°C ocorre a degradação térmica do polímero originando fragmentos de menor peso molecular, de fácil volatilização<sup>16, 17, 18</sup>.

O poliestireno possui como principal vantagem o baixo custo de fabrico, sendo a facilidade de fabrico e de processamento (por extrusão, moldagem, injeção ou moldagem) outras duas grandes vantagens<sup>16</sup>. Este polímero tem aplicações nas indústrias de fundição, construção, fabricação de embalagens e em áreas desportivas, lazer, *design* e decoração<sup>14</sup>.

As vantagens observadas no processo de fundição EPC levaram à sua adaptação ao processo tradicional de fundição em areia, ou seja, à utilização de modelos em EPS. Porém, na fundição tradicional as limitações do processo EPC são especialmente gravosas quando se fala em peças de grande dimensão, sendo necessário recorrer à remoção manual do modelo em EPS antes do vazamento do metal. Esta operação, além de muito demorada, fica particularmente dependente da destreza e minúcia do operador sendo frequente



ocorrerem danos na moldação que, após o vazamento, se traduzem em defeitos das peças vazadas. Para melhorar a qualidade das peças e a eficiência da operação evitando, simultaneamente, a etapa de queima resolveu estudar-se como alternativa a dissolução do EPS através de solventes orgânicos não perigosos e transformar este processo num processo “amigo do ambiente”<sup>19,20</sup>.

O solvente escolhido foi o R-limoneno um solvente orgânico natural já conhecido da reciclagem do poliestireno usado em embalagens de alimentos e de aparelhos eletrônicos, garantido assim a benignidade do processo<sup>19, 20,21</sup>.

O R-limoneno (nome IUPAC: 1-metil-4-isopropenil-1-ciclohexeno) é um monoterpeno extraído de cascas de frutas cítricas. Os terpenos são compostos orgânicos (hidrocarbonetos) produzidos por muitas plantas, particularmente as coníferas, como constituintes dos óleos essenciais. Os terpenos mais comuns são os monoterpenos (C<sub>10</sub>H<sub>16</sub>) de que existem inúmeros isómeros (cânfora, mentol, pineno, limoneno). O limoneno tem dois isómeros óticos (imagens em espelho não sobreponíveis um do outro) pois o carbono número quatro do anel de ciclohexeno é quiral. Segundo a nomenclatura IUPAC os centros quirais são designados R ou S e, portanto, os dois isómeros do limoneno são chamados 4(R)-limoneno e 4(S)-limoneno. Prefixos alternativos para designar os isómeros óticos são d e l, mas também se usam frequentemente os símbolos + e -. O R-limoneno é o monoterpeno cíclico mais abundante na natureza e é o principal constituinte (~98 % peso) de vários óleos cítricos (laranja, limão, tangerina, lima, toranja), estando presente em vários outros óleos essenciais<sup>22,23</sup>.

Este composto é um líquido que evapora facilmente em condições ambientes (ponto de ebulição de 176 °C e pressão de vapor <3 mmHg a 14 °C), é biodegradável e pode ter ação bactericida. Industrialmente é obtido pela destilação do óleo da casca da laranja e citrinos em geral, após a produção do sumo da fruta, sendo necessárias cerca de 10 000 laranjas para a extração de 1 litro de óleo. É usado como solvente para desengordurar superfícies metálicas, para limpeza na indústria eletrônica e na indústria de impressão, como diluente de tinta e como aditivo ou fragrância em alimentos, produtos de limpeza e perfumes<sup>21,23,24,25</sup>.



# Capítulo III



### 3 Atividades de Estágio

Ao longo do estágio foram realizados diversos trabalhos que permitiram o enquadramento no funcionamento da empresa, bem como a aquisição e desenvolvimentos de novos conhecimentos. Acompanhou-se todo o processo produtivo de peças em ferro nodular, realizaram-se ensaios metalográficos, de tração e análises das areias usadas nas moldações. Neste capítulo começa-se com uma breve explicação sobre ferros fundidos aprofundando os ferros nodulares para enquadrar mais facilmente o processo produtivo estudado. E de forma sucinta é explicado todo o processo produtivo de peças em ferro nodular e os ensaios realizados para controlo de qualidade.

#### 3.1 Ferro Fundido

Os ferros fundidos são ligas de ferro-carbono-silício com teores de carbono entre 2 e 4% e teores de silício entre 1 e 3%. Na Figura 7 encontra-se representada a parte relevante do diagrama de equilíbrio de fases do sistema Ferro-Carbono ( $C < 6,7\%$ ) onde se pode visualizar que as ligas desta composição ficam totalmente líquidas aproximadamente aos  $1400^{\circ}\text{C}$  <sup>4,7,26</sup>.

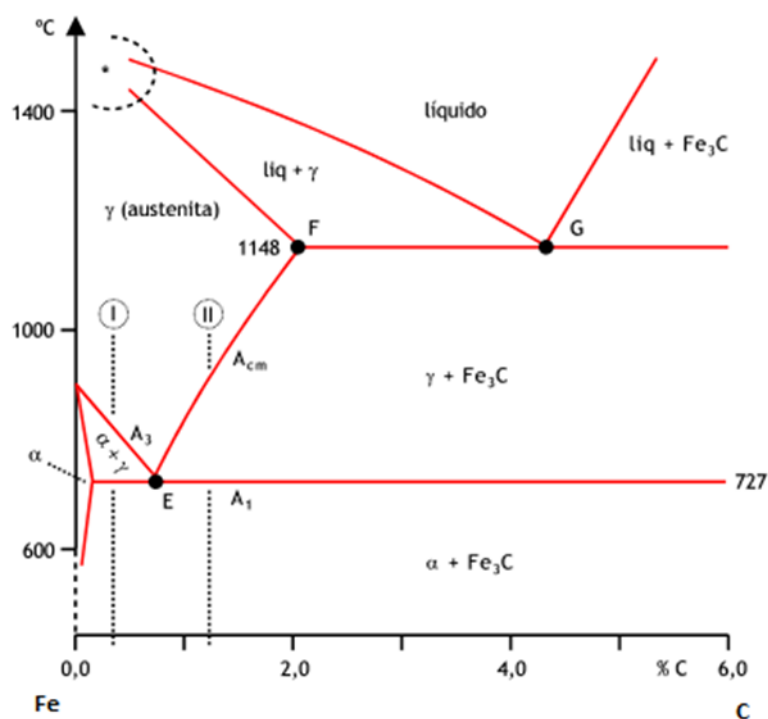
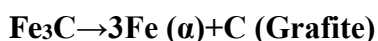


Figura 7: diagrama de fases parcial ( $C < 6,7\%$ ) do sistema Ferro-Carbono<sup>5</sup>.

Para estas ligas podem ocorrer dois tipos de solidificação, uma estável e outra metaestável. Na primeira o carbono ocorre precipitado na forma de grafite e na segunda surge combinado, na forma de cementite ( $Fe_3C$ ). A cementite é um composto metaestável e dependendo das situações pode decompor-se em ferrite ( $\alpha$ ) e grafite de acordo com Equação 1<sup>7</sup>.



Equação 1<sup>7</sup>

Altos teores de carbono e silício, a presença de elementos grafitizantes no banho fundido e velocidades de arrefecimento lentas promovem a formação da fase estável. A combinação de velocidades de arrefecimento rápidas e baixos teores de carbono e silício favorecem a formação da fase metaestável<sup>4,7,26</sup>.

Na Tabela 3 encontra-se a classificação dos principais ferros fundidos segundo a sua composição química.

**Tabela 3:** classificação dos principais Ferros Fundidos<sup>4,26</sup>.

Elemento	Ferro Cinzento Lamelar (%)	Ferro Cinzento Nodular (%)	Ferro Branco (%)	Ferro Maleável (%)
C	2,20-4,00	1,80-3,60	2,00-2,60	3,00-4,00
Si	1,00-3,00	0,50-1,90	1,10-1,60	1,80-2,80
Mn	0,25-1,00	0,25-0,80	0,20-1,00	0,10-1,00
S	0,02-0,25	0,06-0,20	0,04-0,18	0,03 máx.
P	0,05-1,00	0,06-0,18	0,18 máx	0,10 máx.

Entre os ferros fundidos referidos na Tabela 3 o mais comum é o Ferro Cinzento Lamelar devido a sua fácil fusão e moldagem. Este ferro é constituído por lamelas ou flocos de grafite circundados por uma matriz ferrítica ou perlítica. O nome Ferro Cinzento deve-se ao facto da sua superfície de fratura apresentar uma coloração cinza escuro. Este tipo de ferro possui uma boa resistência mecânica e uma boa resistência ao desgaste.

O Ferro Fundido Branco é constituído por dendrites de perlite numa matriz de cementite e apresenta uma elevada dureza e resistência ao desgaste. Como no caso dos Ferros Cinzentos, o seu nome deve-se ao facto da superfície de fratura apresentar uma coloração esbranquiçada.

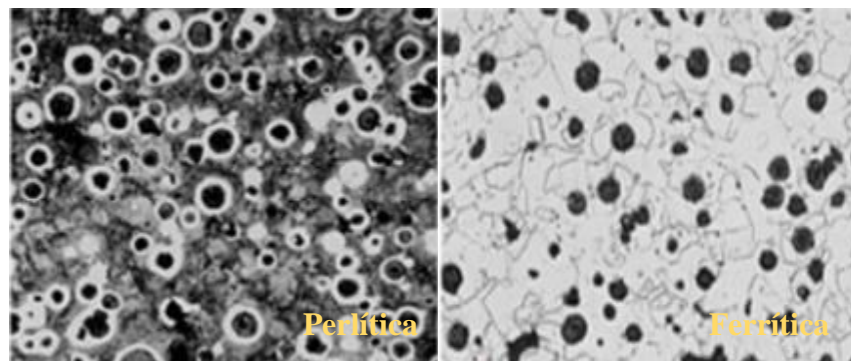
Os Ferros Fundidos Maleáveis são obtidos através do aquecimento do Ferro Branco até temperaturas entre os 800 e 900°C por um período de tempo prolongado e numa

atmosfera neutra. Durante este tratamento térmico a matriz de cementite irá decompor-se lentamente e formará manchas irregulares de grafite numa matriz austenítica. Quando o seu arrefecimento é lento estas ligas são denominadas de Ferros Fundidos Maleáveis Ferríticos e quando o seu arrefecimento é rápido são denominados de Ferros Fundidos Maleáveis Perlíticos. Este Ferros Fundidos possuem uma maior ductilidade e tenacidade quando comparados com os Ferros Brancos ou Cinzentos Lamelares.

De entre os Ferros Fundidos acima referidos, foi acompanhado de perto todo o processo de produção de peças em Ferro Cinzento Nodular.

### 3.2 Ferro Nodular

O ferro fundido nodular ou ferro fundido dúctil é constituído por grafite de forma esferoidal (nódulos), em bruto de fundição, dispersa em matrizes muito distintas, desde totalmente ferríticas a totalmente perlíticas ou ambas (Figura 8) <sup>4,27</sup>. A microestrutura ferrítica é composta por ferrite, fase muito mais dúctil que a perlite. E a microestrutura perlítica é constituída por lamelas alternadas de ferrite e cementite <sup>4,27</sup>. Comparando a microestrutura de um ferro fundido nodular ferrítico com a de um perlítico, Figura 8, podem observar-se diferenças nítidas.



**Figura 8:** microestruturas típicas dos ferros fundidos nodulares em estado bruto de vazamento <sup>27</sup>.

Na Figura 8 – mostram-se duas microestruturas características dos ferros fundidos nodulares, a da esquerda de matriz perlítica, tipicamente apelidada de “olho-de-boi”, caracteriza-se por ter uma matriz predominantemente perlítica e um anel ferrítico em torno do nódulo de grafite e a da direita de matriz ferrítica, onde se pode observar a negro os nódulos de grafite e a mais claro a matriz ferrítica.

O tipo de matriz depende da velocidade de arrefecimento e da composição química. Quando a velocidade de arrefecimento é muito rápida ou quando se adiciona cobre, níquel ou estanho dá-se a formação de uma matriz perlítica. Quando a velocidade de arrefecimento é lenta, na região eutectóide, a matriz formada é preferencialmente ferrítica. A forma e a distribuição da grafite têm grande influência na resistência mecânica e na ductilidade do material pois estas diminuem quanto menor for a nodularidade dos ferros nodulares. Como tal a nodularidade, ou seja a quantidade de nódulos, da grafite neste tipo de ferro não deve ser inferior a 80% <sup>27</sup>.

A forma mais eficaz de controlar a nodularidade é controlando a composição química com a adição de elementos que promovam a formação de nódulos de grafite. Normalmente são adicionadas ligas de magnésio (Fe-Si-Mg) que ao neutralizarem o enxofre formam grafite esferoidal. Normalmente a composição final do fundido deve possuir 0,03 a 0,05% de magnésio <sup>27,28</sup>.

A adição de ligas de Ferro-Sílicio promove a formação de grafite, sendo esta reação chamada de inoculação. A adição de agentes inoculantes favorece a precipitação de grafite e evita a precipitação de carbonetos. A quantidade de inoculante adicionada depende da sua composição química e do estado do metal base mas, regra geral, adiciona-se 0,3% de inoculante à colher de vazamento <sup>27</sup>.

### 3.2.1 Propriedades e aplicações

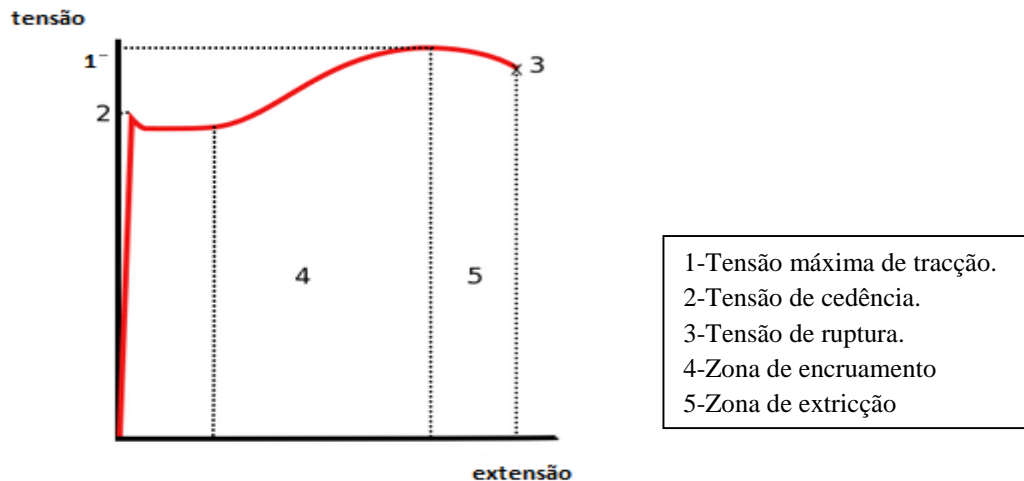
As propriedades mecânicas dos ferros fundidos nodulares, como já referido, dependem da combinação do tipo de matriz, do tamanho dos nódulos de grafite e da sua distribuição <sup>27,28</sup>.

As propriedades mecânicas de um material metálico são determinadas através de ensaios mecânicos geralmente de tração. Estes ensaios por norma inutilizam a peça testada, e são chamados ensaios destrutivos. Também existem ensaios não destrutivos que permitem avaliar algumas propriedades físicas ou procurar falhas no interior do metal, tais como como ultra-sons, partículas magnéticas e líquidos penetrantes.

Na Tabela 4 encontram-se as propriedades mecânicas obtidas, através dos ensaios de tração, para algumas ligas de ferro nodular. Num ensaio de tração, o corpo é fixado numa máquina de ensaios que aplica lentamente um esforço crescente numa direção uniaxial o



que permite medir a resistência do material. O ensaio termina quando o material atinge a carga máxima que consegue suportar, ou seja, quando se dá a estrição do material – redução da secção transversal do corpo na zona onde ocorrerá rotura. Este ensaio permite medir a deformação do corpo em função da tensão aplicada, obtida através da curva tensão extensão. Na figura 9 podemos analisar um gráfico representativo de todas as etapas em que o material passa durante o ensaio de tração.



**Figura 9:** curva tensão - extensão.

A zona elástica do material (ponto 2) tem um comportamento linear. Quando o material se encontra na zona elástica e é retirada a carga aplicada sobre o corpo, este retoma às dimensões iniciais. Mas, quando a tensão aplicada ultrapassa o regime elástico, este adquire uma forma permanente.

A partir do ponto 1 da figura 9, que corresponde á tensão máxima de tracção, verifica-se uma diminuição da tensão, pois é nesta altura que há formação de um colo, onde a área de secção é inferior e portanto não é necessário aplicar uma tensão tão elevada para deformar continuamente o material. No ponto 3 dá-se rutura do material.

Na Tabela 4,  $R_{p0,2}$  corresponde à tensão para a qual há uma deformação permanente de 0,2%, chamado limite de escoamento, e  $R_m$ , resistência mecânica, corresponde à tensão máxima a que o corpo resiste.  $A$  é o alongamento percentual que ocorre desde o início do ensaio até a rutura do corpo.

**Tabela 4:** propriedades mecânicas determinadas em ensaios de tração e dureza das ligas de ferro nodular produzidas na Duritcast.

Liga	Rp <sub>0,2</sub> (MPa)	Rm (MPa)	A (%)	Gama de Durezas (HB)
EN GJS 400 15	250	400	15	130-180
EN GJS 400 18	250	400	18	130-180
EN GJS 450 10	310	450	10	160-210
A536 Gr 60.40.18	276	414	18	130-180
EN GJS 500 7	320	500	7	170-230
EN GJS 550 6	320	550	6	170-230
EN GJS 600 3	370	600	3	190-270
EN GJS 700 2	420	700	2	225-305

A dureza de Brinell (HB) é uma escala de medição de durezas de metais. Na Tabela 4 a gama de durezas na escala de Brinell das ligas fabricadas na Duritcast.

Nos testes de medição da dureza de Brinell é aplicada uma carga a um penetrador esférico (de aço ou de carboneto de tungsténio) endurecido aquando este contacta a superfície do metal. Essa carga aplicada é constante e durante um certo período de tempo. A dureza de Brinell é medida em função da intensidade de carga aplicada e do diâmetro de penetração resultante, equação 2.

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

P – é o valor da carga aplicada (em kgf);

D – é diâmetro do penetrador esférico (em mm);

d – é o diâmetro da impressão resultante (em mm).

O desempenho destas ligas pode ser melhorado através de tratamentos térmicos ou através da adição de elementos de liga, promovendo-se a formação de martensite<sup>27,28</sup>

O ferro nodular tem aplicações na indústria automóvel, na construção ferroviária, em condutas de fluidos e na agricultura. Tem ainda substituído o aço na construção de mandris e moldes usados na fabricação de polímeros<sup>27,28</sup>.

### 3.2.2 Processo de Produção na Duritcast

O processo de fabrico deste tipo de ferro, como em todos os outros ferros, têm início com a escolha da matéria-prima pois, se a composição química dos seus constituintes não for conhecida, pode ocorrer a contaminação do banho. Geralmente, as matérias-primas usadas na fundição de ferro fundido são lingotes, retornos, sucata de fundição de aço e de ferro fundido, sendo a sucata de aço a mais utilizada devido ao seu baixo custo. Após escolhida a matéria-prima, carrega-se o forno com aproximadamente 4 toneladas de matéria-prima.

Na indústria, a fundição de ferros nodulares dá-se em duas etapas: na primeira faz-se a elaboração do fundido base e na segunda realizam-se os tratamentos de nodularização e de inoculação.

Ou seja, primeiramente a carga é fundida e espera-se até o banho atingir uma temperatura superior a 1400<sup>0</sup>C e procede-se a uma pré-limpeza da escória. Durante esta etapa do processo deve-se ter em atenção o sobreaquecimento do banho pois pode diminuir a densidade dos nódulos ou favorecer a formação de carbonetos.

Todo o processo produtivo de ferro fundido nodular decorre com um grande controlo devido às inúmeras variáveis associadas que condicionam a qualidade do banho e consequentemente da peça final. Por isso, foi implementado um controlo metalúrgico durante a produção que permita uma atuação sistemática e minimize a possibilidade da existência de peças não conformes. Primeiramente faz-se uma análise química, utilizando um espectrómetro, para determinar quantitativamente o teor de cada elemento existente no banho. Para complementar os resultados e obter um banho metálico com as especificações requeridas também se realizam análises térmicas diferenciais. Durante o aquecimento/arrefecimento da maioria dos materiais ocorrem fenómenos de libertação de calor (fenómenos exotérmicos) ou com absorção de calor (fenómenos endotérmicos). As análises térmicas diferenciais registam a variação de temperatura da amostra devido a estes fenómenos, ou seja, estas análises permitem estimar a microestrutura formada durante a solidificação até à temperatura ambiente antes do metal ser vazado. A técnica de análise térmica mais usual na indústria consiste na análise e interpretação das curvas de arrefecimento Figura 10 obtidas de uma amostra do banho metálico vazada num cadinho contendo um termopar no seu centro geométrico <sup>29</sup>.

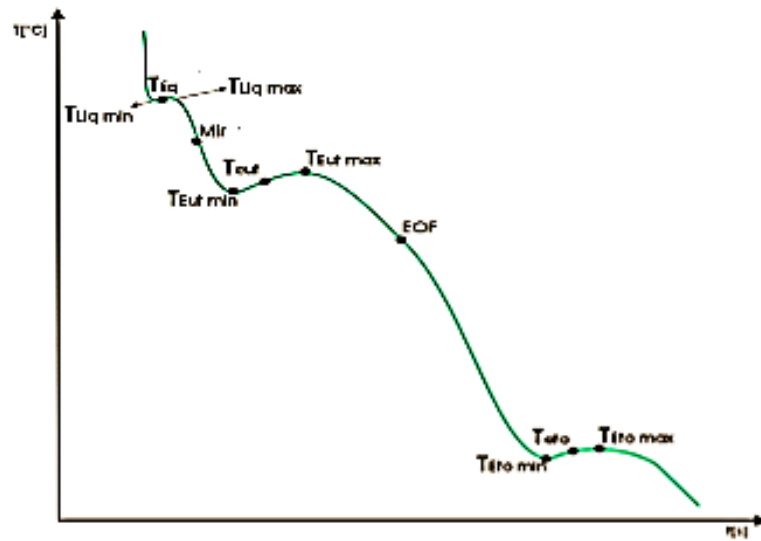


Figura 10: Curva de análise térmica de um ferro fundido e seus principais pontos críticos <sup>27</sup>.

Onde:

- **Temperatura de liquidus mínima, TLIq min:** corresponde ao maior sobreaquecimento antes da formação da primeira fase sólida;
- **Temperatura de Liquidus, TLIq:** corresponde à temperatura à qual se forma a primeira fase sólida;
- **Temperatura de liquidus máxima, TLIq max:** corresponde à temperatura de recalescência após a formação da primeira fase sólida;
- **Temperatura eutética mínima, TEut min:** corresponde ao maior sobreaquecimento antes da reacção eutética;
- **Temperatura eutética, TEut:** temperatura de transformação do líquido na célula eutética;
- **Temperatura eutética máxima, TEut max:** temperatura de recalescência após a reacção eutética;
- **Final de solidificação (EOF);**
- **Temperatura eutectoide mínima, TEto min:** corresponde ao maior sobreaquecimento antes da reacção eutectoide;
- **Temperatura eutectoide, TEto:** temperatura de transformação do líquido na célula eutectoide;
- **Temperatura eutectoide máxima, TEto max:** temperatura de recalescência após a reacção eutectoide;

- **Velocidade de arrefecimento entre liquidus e a reacção eutética (Mir).**

Estes dois tipos de análises permitem que o processo produtivo tenha um sistema de previsão pois as irregularidades do banho são corrigidas antes de se efetuar o vazamento do metal. Caso seja necessário realizar alguma correção, espera-se entre 5 a 10 minutos para o banho homogeneizar e realizam-se novamente análises para confirmar os resultados.

Quando se obtém a composição química desejada, adiciona-se escorificante ao banho e retira-se a escória. Seguidamente eleva-se a temperatura do metal, normalmente para temperaturas superiores a 1430<sup>0</sup>C, tendo em conta que durante a transferência do metal para a colher a temperatura do banho baixa cerca de 50<sup>0</sup>C e que a temperatura do metal após os tratamentos deve ser superior à temperatura de vazamento. Quando se atinge a temperatura desejada, o metal é transferido para a colher e são realizados os tratamentos necessários.

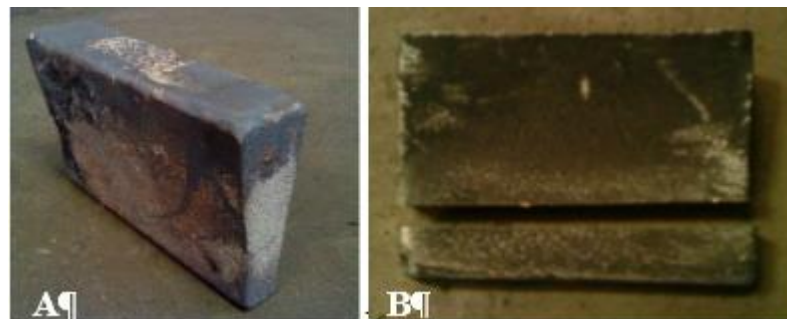
Na segunda etapa adiciona-se ao banho um elemento nodularizante como o magnésio com o intuito de modificar a forma final da grafite, passando de lamelar a esferoidal. Posteriormente realiza-se o tratamento de inoculação que pode ser prematuro ou tardio: o prematuro ocorre quando se introduz o inoculante na colher de vazamento e o tardio quando se introduz no jato de vazamento ou mais raramente na própria moldação<sup>27,29</sup>. Na Duritcast o tratamento de inoculação normalmente é tardio, ou seja, é introduzido no jato de vazamento.

Por fim, a colher (capacidade 1 Ton) é levada até um posto de controlo, onde se retira alguma escória que ainda permanece na superfície do metal. Antes do vazamento controla-se a temperatura (Tabela 5), retira-se uma amostra de metal líquido para fazer uma nova análise química e vaza-se o metal para um cadinho para realizar uma nova análise térmica. Simultaneamente vaza-se um provete em forma de Y para posteriores análises. Por último, é retirado de cada colher uma porção de metal líquido do gito da última peça vazada, para avaliar a microestrutura da liga nas piores condições de vazamento (temperatura e teor de Mg menores).

**Tabela 5:** temperatura de cada colher de vazamento.

Temperatura de Colher de Vazamento	
1ª Colher	1370°C
2ª Colher	1380°C
3ª Colher	1380°C
4ª Colher	1376°C

O provete em forma de Y (Figura 11– A) é cortado para se produzir um provete de tração que é maquinado com a geometria cilíndrica e dimensões definidas pela norma NF A32-201 (Figura 11– B) e realizam-se os ensaios de tração.



**Figura 11:** A- formato do provete Y utilizado na produção do provete de tração; B- corte da amostra, para produzir o provete de tração, para posteriormente maquinar.

Na Figura 12 podemos ver o provete usado nos ensaios de tração e amostras usada para realizar a análises metalográficas.



**Figura 12:** Provete de tação e amostras para análise metalográfica.

Após o arrefecimento do metal e desmoldação (abate das moldações) as peças são sujeitas a ensaios de qualidade não destrutivos tais como ultra-sons, partículas magnéticas para verificar se existem defeitos até uma certa espessura da peça.

# Capítulo IV





## 4 Metodologia

A par da vivência das operações rotineiras do processo de fundição em areia, este trabalho visa procurar e desenvolver soluções para duas preocupações deste sector. Sendo a primeira relacionada com a preparação de moldações utilizando modelos em EPS e a segunda relativa à possível reutilização dos refratários dos revestimentos usados nos equipamentos de fusão.

### 4.1 Ensaios de tração e Análise Metalográfica

Durante os meses de estágio foi-me proporcionado conhecer a rotina de alguns ensaios para averiguar se as peças se encontravam dentro dos padrões de qualidade definidos pela Duritcast ou pelo cliente.

Dentro dos ensaios de qualidade já referidos em outros capítulos, os ensaios de tração destacam-se pela sua importância. Resumidamente no ensaio de tração, um corpo de prova com formas e dimensões padronizadas é submetido a uma força de tração uniaxial que alonga o provete até à rutura.

Primeiramente deve-se medir o diâmetro do provete e o seu comprimento, de seguida prende-se o provete na máquina de ensaios de tração. Após o provete estar pronto a ser tracionado, introduz-se no *software* a identificação do provete, o tipo de liga, o diâmetro e o comprimento inicial do provete. O *software* foi desenvolvido para a Duritcast e serve para controlo e monitorização do equipamento de tração. A máquina de tração usada é uma *Shimadzu* com alcance de 450 kN e com uma resolução de 0,01 kN. Esta máquina de ensaios é um equipamento de acionamento hidráulico.

Após todos os dados estarem introduzidos dá-se início ao ensaio. Após o rebentamento do provete, mede-se o comprimento final do mesmo e volta-se a introduzir a medida obtida no programa que calcula os valores de resistência mecânica, limite de escoamento e alongamento. Na Tabela 6 encontra-se descrita a metodologia a seguir para realizar os ensaios de tração.

**Tabela 6:** etapas do processo para realizar os ensaios de tração.

Descrição da Etapa	
1º	Medição do Provete
2º	Introdução do Provete na Máquina de Tração
3º	Introdução dos Dados no Programa
4º	Realização do Ensaio até o Provete Partir
5º	Medição do Provete
6º	Introdução do Comprimento final do Provete
7º	Recolha dos Dados

Outro ensaio de qualidade bastante importante nesta indústria são as análises metalográficas pois, como acima referido, a estrutura do material influencia diretamente as suas propriedades mecânicas. Este ensaio tem como objetivo determinar a forma e o tipo de grafite, a percentagem de cada fase e ainda a existência de inclusões metálicas. Com este tipo de ensaio é possível identificar a liga, prever o seu comportamento mecânico e o método de processamento do material. Este tipo de análise pode ser efetuado através da observação direta ao microscópio ou de forma automatizada através de um sistema computadorizado de análise de imagens. Na Duritcast as análises são realizadas de forma automatizada através de um microscópio ótico associado a uma câmara fotográfica para aquisição de imagens, acoplado a um programa de análise de imagem PAQUI.

Para revelar os constituintes microestruturais é necessário desbastar e polir a superfície a analisar com lixas de granulometria sucessivamente mais fina. Estas análises são efetuadas sem ataque químico para quantificar e classificar os nódulos de grafite e com ataque químico para analisar e quantificar os outros constituintes presentes na microestrutura. Na Tabela 7 encontram-se descritas todas as etapas do processo utilizadas para revelar a microestrutura da liga.

**Tabela 7:** etapas do processo para revelar a microestrutura da liga.

Etapa de Preparação		Descrição da Etapa
1°	Desbaste	Lixa abrasiva Struers com granulometria de 180 mesh
		Lixa abrasiva Struers com granulometria de 320 mesh
		Lixa abrasiva Struers com granulometria de 400 mesh
		Lixa abrasiva Struers com granulometria de 600 mesh
2°	Lavagem das Amostras	Lavagem das Amostras com água corrente
3°	Polimento	Suspensão aquosa de partículas de diamante com 6 µm
4°	Lavagem das Amostras	Lavagem das Amostras com água corrente
5ª	<b>Observação ao Microscópio</b>	
6°	Polimento	Suspensão aquosa de partículas de diamante com 6 µm
7°	Ataque Químico	Solução de Nital 4% durante 5 segundos
8°	<b>Observação ao Microscópio</b>	

## 4.2 Solubilização do EPS

Como se desconhecia o comportamento do R-limoneno sobre o EPS foi necessário começar por avaliar como seria a sua conduta. Como tal utilizaram-se cubos de EPS com 1000 cm<sup>3</sup> de volume sobre os quais se verteu com uma pipeta cerca de 10 ml de limoneno. Este teste foi realizado para diferentes tempos de reação (30 minutos e 2 horas, 4 e 24 horas).

Com o intuito de testar diferentes métodos de aplicação repetiu-se o processo acima referido com um pincel e com um aspersor, também para diferentes tempos de reação.

Após se conhecer o comportamento o limoneno e a melhor forma de o aplicar decidiu-se testá-lo numa moldação pequena (peso <1 tonelada). Este ensaio permitiu estudar a reação do reagente com a areia de moldação. Como tal, após a moldação estar devidamente preparada e estabilizada pincelou-se o modelo de EPS com R-limoneno.

Na Figura 13 pode ver-se no lado direito (A) as caixas de moldação estabilizadas e do lado esquerdo (B) a forma do modelo de EPS usado na preparação das caixas.



**Figura 13:** caixa de moldação e modelo de EPS usado.

Prosseguiu-se depois para moldações de tamanho bastante superior para analisar a quantidade de limoneno e posição da caixa de moldação.

Começou-se por uma moldação (Figura 14) que iria permitir obter uma peça de ferro com o peso de 1 tonelada.

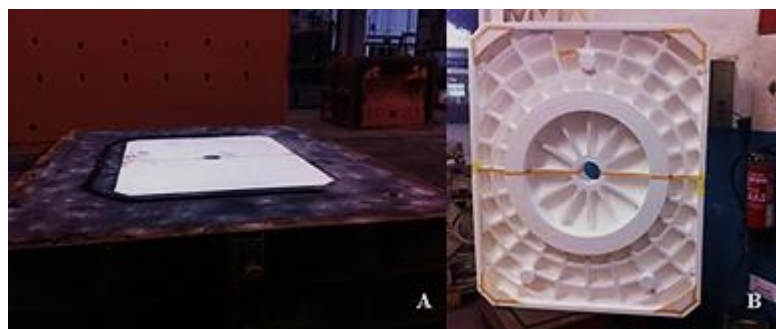


**Figura 14:** moldação pronta a aplicar o R-limoneno.

Como se pode ver na Figura 14 o modelo de EPS estava coberto por areia o que tornava algumas zonas de acesso mais difícil. Para que a reação fosse menos lenta nessas zonas verteu-se o limoneno diretamente sobre o EPS e nas zonas mais acessíveis pincelou-se. Foi-se aplicando 5 litros de reagente a cada hora tendo-se dissolvido o EPS em 4 horas. Após a total remoção do EPS fechou-se a moldação e seguiu-se o procedimento normal de fabrico.

Posteriormente realizou-se um novo ensaio com uma moldação para uma peça superior a uma tonelada. Na Figura 15 pode verificar-se que tanto a caixa de moldação como o modelo tinham grandes dimensões e para alcançar uma maior área de EPS optou-se por aplicar o reagente com um aspersor.

Na Figura 15- A pode ver-se a caixa de moldação com o modelo de EPS e na Figura 15- B uma fotografia apenas do modelo.



**Figura 15:** caixa de moldação e modelo de EPS.

Nesta moldação aplicaram-se 10 litros de R-Limoneno por hora com exceção da segunda hora onde foram aplicados 20 litros de reagente. Tendo em conta que a experiência durou aproximadamente 5 horas, gastaram-se cerca de 60 litros de R-Limoneno. Após 12 horas, voltou-se a adicionar 5 litros de reagente.

Este ensaio foi repetido alterando apenas a posição da moldação de horizontal para vertical.

### 4.3 Reutilização de revestimentos refratários

Com vista a obter o revestimento refratário alvo de estudo foi necessário aguardar até ao abatimento do forno. Nessa altura, procedeu-se à recolha do revestimento, que foi separado em frações (contaminado, não-contaminado-sinterizado e não-contaminado-não-sinterizado). Como o revestimento vinha todo agregado em forma de blocos (Figura 16) foi necessário fragmentá-lo com o auxílio de um martelo.



**Figura 16:** bloco de revestimento refratário tal como é habitualmente descartado.

Após a desagregação, as classes de tamanhos foram dadas por peneiração, com o auxílio de peneiros com aberturas de malha de 2000, 1000, 500, 355, 212, 150, 125, 106 e 63  $\mu\text{m}$ .

Posteriormente para obter a distribuição granulométrica do refratário, para tamanhos de 0,04 até 2000  $\mu\text{m}$ , foi usada a difração laser (Coulter LS 230). Este método consiste em incidir um feixe de luz sobre as partículas, que provocam uma alteração da intensidade luminosa. Esta intensidade é medida pelo algoritmo do modelo de refração adequado, onde uma partícula de grande tamanho irá emitir uma intensidade luminosa fraca e um elevado comprimento de onda e uma partícula pequena o inverso. Esta análise granulométrica é essencial pois influencia o empacotamento da mistura de partículas e posteriormente as propriedades do corpo sinterizado, como porosidade, tamanho dos poros e resistência mecânica.

Os resultados das distribuições granulométricas são importados para o programa EMMA onde se faz um ajuste da distribuição granulométrica à reta de Andreasen. Com este ajuste obtém-se o módulo da distribuição e determina-se a combinação de classes granulométricas mais adequadas para criar uma nova mistura granulométrica com a escoabilidade pretendida.

Seguiu-se para caracterização mineralógica das amostras por difração de raios X (DRX) de pó não orientado (difratômetro Rigaku Geigerflex D/max – C series) para identificar o tipo de material refratário. A identificação das fases cristalinas faz-se através da localização dos picos de difração.

# Capítulo V

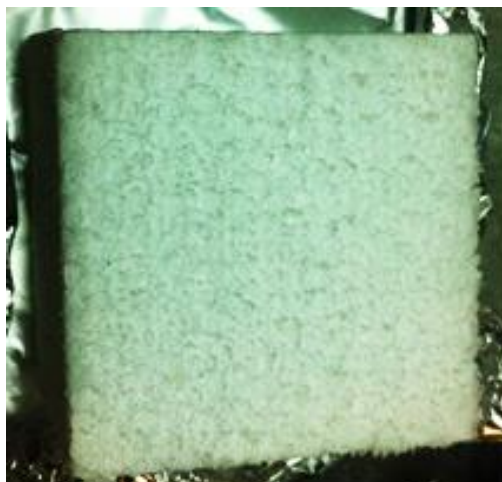




## 5 Apresentação e discussão de resultados

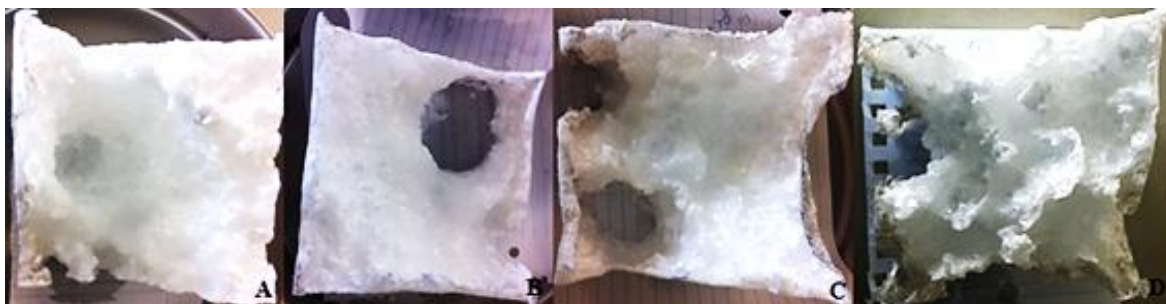
### 5.1 Solubilização EPS

Na Figura 17 pode observar-se a superfície de um cubo de EPS antes da reação com o R-limoneno.



**Figura 17:** superfície de um cubo de EPS antes da aplicação do limoneno.

Na Figura 18 podem observar-se os resultados obtidos após a aplicação de 10 ml de limoneno com uma pipeta para tempos de reação diferentes. A Figura 18- A corresponde a um tempo de reação de 30 min, a Figura 18- B corresponde a um tempo de reação de 2 horas, a Figura 18- C de 4 horas e a Figura 18- D de 24 horas.

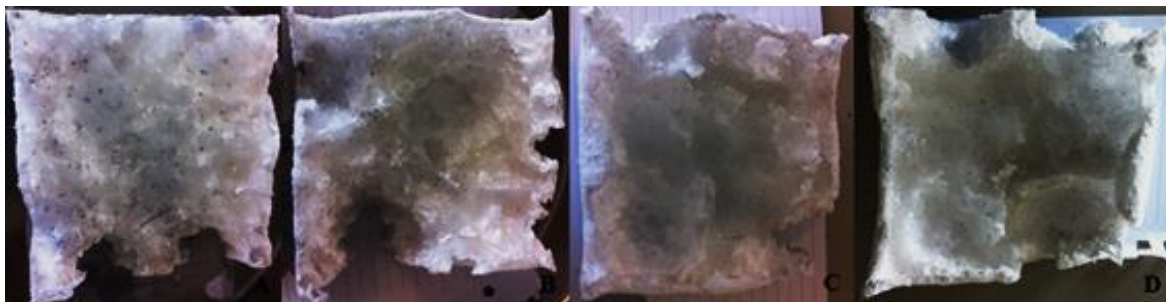


**Figura 18:** fotografias dos resultados obtidos após a aplicação do R-limoneno com uma pipeta para tempos de reação de 30 min e 2, 4 e 24 horas.

Comparando a Figura 17 com a Figura 18- A observa-se que a reação do R-limoneno com o EPS é imediata. No entanto também se pode reparar que a velocidade da solubilização do EPS vai diminuindo à medida que o tempo vai aumentando. A extensão de reação seria maior caso se fosse adicionando os 10 ml de reagente ao longo do tempo de

reação. De salientar que há zonas onde a solubilização foi maior devido à incidência preferencial do reagente, apesar de se ter tentado fazer uma aplicação uniforme.

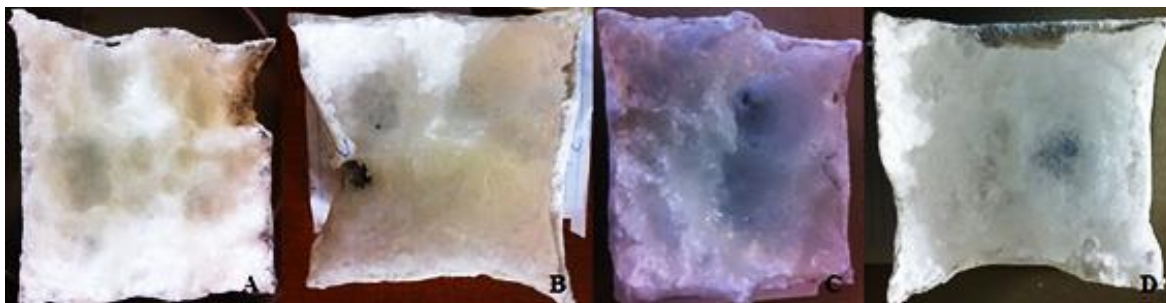
Na Figura 19 podem observar-se os resultados obtidos através da aplicação do limoneno (10 ml) com um pincel para os mesmos tempos de reação. A Figura 19- A corresponde a um tempo de reação de 30 min, a Figura 19- B corresponde a um tempo de reação de 2 horas, a Figura 19- C de 4 horas e a Figura 19- D de 24 horas.



**Figura 19:** fotografias dos resultados obtidos após a aplicação do R-limoneno com um pincel para tempos de reação de 30 min e 2, 4 e 24 horas.

Analisando a Figura 19 pode observar-se que a reação é mais regular pois este tipo de aplicação permite que a quantidade de limoneno na superfície do EPS seja mais uniforme. Com este tipo de aplicação a degradação do EPS será mais lenta e, como tal, deve ser usada para quando se pretende fazer moldações de peças menores que 1 Ton.

Na Figura 20 podem observar-se os resultados obtidos através da aplicação do limoneno (10 ml) com um aspersor para os mesmos tempos de reação. A Figura 20- A corresponde a um tempo de reação de 30 min, a Figura 20- B corresponde a um tempo de reação de 2 horas, a Figura 20- C de 4 horas e a Figura 20- D de 24 horas.



**Figura 20:** fotografias dos resultados obtidos após a aplicação do R-limoneno com um aspersor para tempos de reação de 30 min e 2, 4 e 24 horas.

Através da análise da Figura 20 e comparando com a Figura 18 e Figura 19 pode-se concluir que a degradação é muito mais lenta mas mais regular pois a aplicação com um aspersor permite distribuir o reagente em toda a área de forma mais uniforme. No entanto as arestas do cubo de EPS demoram mais tempo a degradar-se do que quando se aplica o reagente com um pincel ou com uma pipeta.

Dos três tipos de aplicação o mais eficaz será o da pipeta pois para a mesma quantidade de R-limoneno (10 ml) houve uma maior solubilização do EPS. No entanto a aplicação com um pincel ou aspersor será mais indicada para zonas da moldação de difícil acesso.

Na Figura 21 pode avaliar-se a evolução da degradação do EPS na moldação da peça de teste (Figura 13) após se ter aplicado o R-limoneno com um pincel. Na Figura 21– A observa-se a superfície do modelo de EPS sem a aplicação do reagente. Na Figura 21– B pode examinar-se o estado de degradação do modelo de EPS ao fim de 10 minutos e na Figura 21– C ao fim de 30 minutos. Na Figura 21– D pode verificar-se que o modelo de EPS foi totalmente removido estando a moldação pronta para receber o metal vazado.



**Figura 21:** evolução da degradação do modelo de EPS após aplicação do limoneno com um pincel numa moldação de uma peça menor que 1 Ton.

Para a total solubilização do EPS gastou-se cerca de 2 litros de reagente que foi sendo pincelado de 20 em 20 minutos ao longo de cerca de 52 minutos. Neste caso, como o modelo tinha dimensões bastante pequenas, optou-se por aplicar o reagente com um pincel pois a reação seria mais rápida e porque seria mais fácil aplicá-lo na zona em que o modelo estava praticamente todo coberto com areia. De seguida a peça foi vazada para se averiguar se o facto de a areia conter resíduos de limoneno poderia afetar ou não o vazamento e a superfície da peça.

Na Figura 22 apresenta-se uma fotografia da peça após vazamento.



**Figura 22:** peça obtida através da moldação estudada.

Pode-se verificar que a superfície da peça contém alguns defeitos que seriam eliminados por granalhagem caso não se tratasse de um ensaio experimental. Estes pequenos defeitos devem-se a alguma desagregação superficial da areia durante a aplicação do EPS pois ao aplicar-se o limoneno a areia ficou molhada e, como tal, mais suscetível de se desagregar ligeiramente. Isto levou a que superfície de vazamento ficasse um pouco rugosa levando a peça final a ficar com uma aparência menos uniforme. No entanto pode-se comprovar que todo o processo de vazamento e arrefecimento da peça decorreu dentro da normalidade.

Na Figura 23 pode observar-se a moldação mostrada na Figura 14, mas após a aplicação do limoneno e total degradação do EPS.



**Figura 23:** moldação após a degradação total do EPS.

Nesta moldação começou-se inicialmente por pincelar nas zonas visíveis pequenas quantidades de reagente e nas zonas tapadas pela areia de moldação optou-se por verter diretamente o limoneno pois de outra forma seria muito difícil chegar a certas zonas do modelo de EPS. Para se obter uma peça de ferro com 1 Ton, gastou-se cerca de 20 litros de R-limoneno. Este ensaio teve a duração de uma hora e trinta e cinco minutos. Quando se compara este ensaio com o ensaio analisado anteriormente verifica-se que o facto de limoneno ter sido vertido acelerou a operação.

Na Figura 24 vê-se uma fotografia da peça final obtida através da moldação da Figura 23.



**Figura 24:** peça obtida através da moldação da Figura 23.

Esta peça ficou com uma superfície muito menos rugosa que a peça da Figura 22 pois a aplicação do limoneno foi realizada de uma forma mais cuidada para evitar que a peça ficasse com defeitos de superfície e pudesse ser recusada pelo cliente.

Na Figura 25 pode analisar-se o estado de degradação do modelo de EPS da Figura 15 ao fim de 4 horas de reação.



**Figura 25:** estado de degradação do modelo de EPS ao fim 4 horas de reação.

Como este modelo era de tamanho bastante superior aos analisados anteriormente optou-se por aplicar o reagente com um aspersor para ser mais fácil chegar ao meio do modelo o que, de outra forma, seria impossível. Neste modelo foram gastos cerca de 60 litros de limoneno e a reação durou cerca de 5 horas. Após passarem 12 horas voltou-se a aplicar mais 5 litros de limoneno, ou seja, no total foram aplicados 65 litros.

Na Figura 26 pode ver-se a moldação após a solubilização de todo o modelo de EPS.



**Figura 26:** moldação após a solubilização de todo o modelo de EPS.

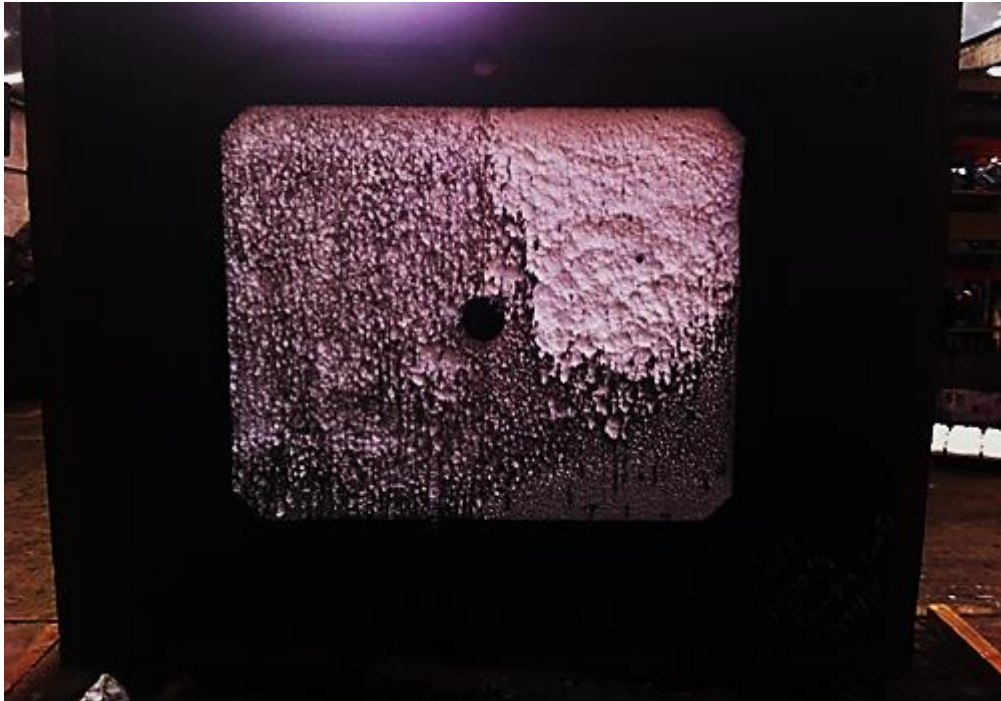
Ao analisar a Figura 26 podemos observar que por cima da areia de moldação ficou o EPS dissolvido. Como a caixa de moldação e o modelo de EPS tinham dimensões muito grandes tornou-se impossível a sua remoção pois não se conseguia alcançar certas zonas da moldação.

Na Figura 27 pode ver-se uma ampliação da Figura 26 onde se vê nitidamente o EPS dissolvido.



**Figura 27:** ampliação da Figura 26.

Devido à elevada viscosidade da solução de EPS que ficou depositada sobre a areia de moldação, impossível de retirar por se comportar como uma espécie de cola, resolveu-se repetir este ensaio passando a posição da caixa de moldação de horizontal para vertical (Figura 28) com o intuito de facilitar a remoção do EPS.



**Figura 28:** repetição do ensaio anterior com a caixa de moldação na vertical.

Optou-se por esta alternativa para que o EPS fosse escorrendo à medida que fosse sendo dissolvido. No entanto como se pode verificar na Figura 29 o problema do EPS ficar agarrado à areia de moldação manteve-se.



**Figura 29:** estado de degradação do modelo de EPS ao fim 4 horas de reação.



Colocando a moldação na vertical a reação é mais lenta porque o limoneno também vai escorrendo sendo necessário usar uma maior quantidade de limoneno. O ensaio foi parado ao fim de 4 horas pois observou-se que o EPS continuava a ficar agarrado à areia e como tal removeu-se manualmente o resto do modelo.

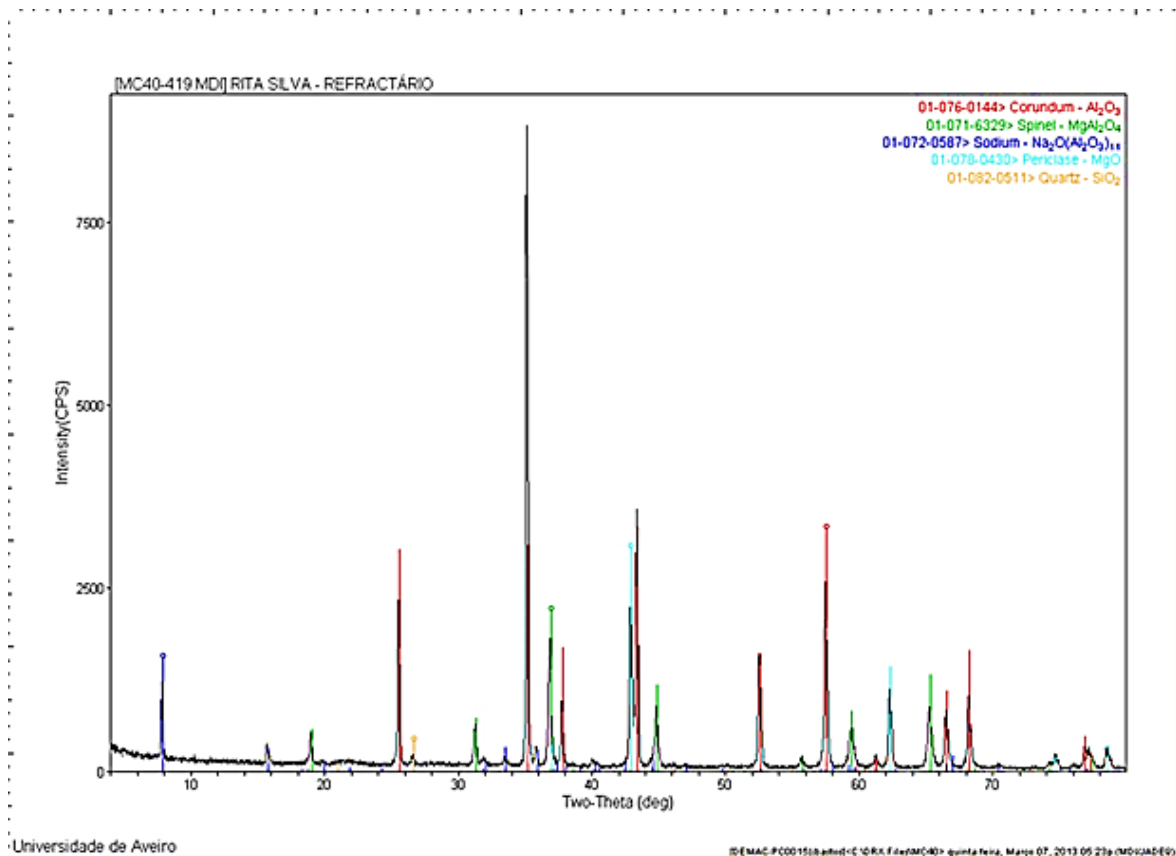
## 5.2 Reutilização dos revestimentos refratários

Neste procedimento experimental foi estudada a amostra de refratário comercial virgem (amostra 1). Este refratário, com o nome comercial de “Coral SXL”, é usado no revestimento de fornos de indução sem núcleo. É constituído essencialmente por alumina e magnésia (para desenvolver a formação da espinela), é um granulado denso e seco e aplica-se por compactação (*ramming mix*). Na Tabela 8 apresenta-se a composição química da amostra 1.

**Tabela 8:** elementos químicos da amostra 1 segundo a ficha técnica do fornecedor.

Elemento	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO
Massa %	86	13	0,2	0,15	0,3

Na Figura 30 pode observar-se o DRX de uma amostra de refratário obtida após o desmantelamento do forno (amostra 2).



**Figura 30:** DRX obtido a partir da amostra do refratário usado.

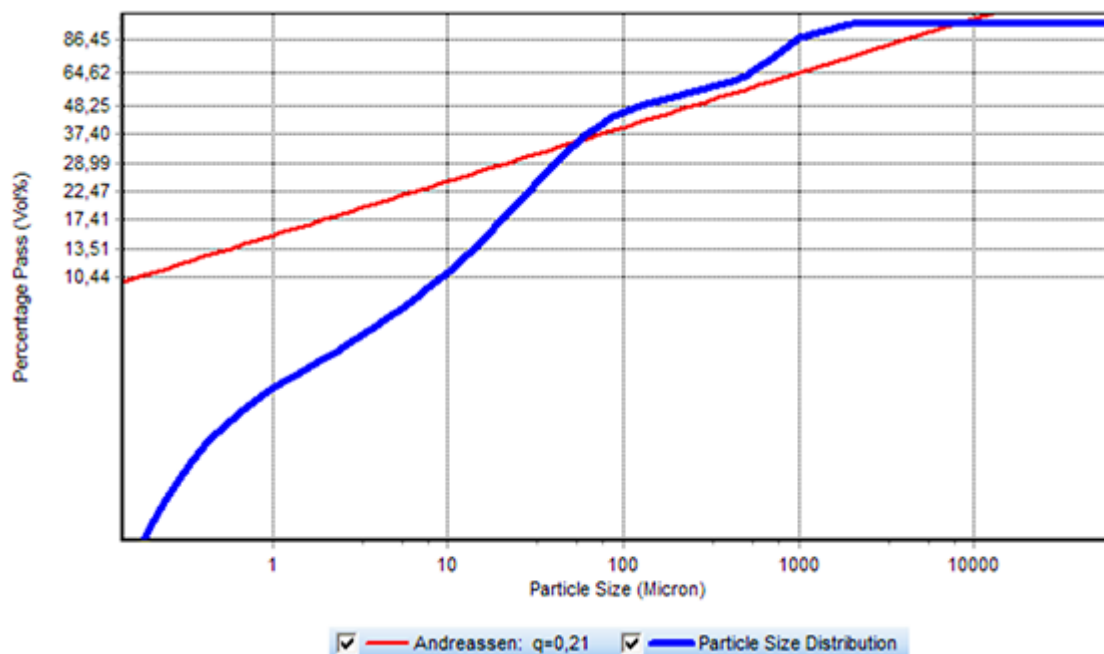
Pela análise da Figura 30 verifica-se que a amostra é composta por alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), por espinela de aluminato de magnésio ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ), aluminato de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{11}$ ), óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ) e sílica ( $\text{SiO}_2$ ). A presença de espinela é habitual nos refratários com elevado teor em magnésia. A formação da espinela depende do teor de alumina e apenas ocorre para temperaturas superiores a  $1200^\circ\text{C}$  <sup>9</sup>.

A alumina (corindo) é a fase de mais abundante como seria esperado pois, segundo a Tabela 8, o “Coral SXL” é constituído maioritariamente por esta.

Este tipo de revestimento têm como principais características uma boa condutividade térmica, perda de calor reduzida e bom comportamento em meios ácidos.

Tendo em vista uma futura reutilização dos pós na confeção de acessórios cerâmicos para a fundição do aço foi feito o estudo da escoabilidade dos pós.

Juntando os resultados de distribuição de tamanhos de partículas obtidos pelo Coulter e pela peneiração dos grãos mais grosseiros obteve-se a curva de distribuição granulométrica dos grãos refratários (Figura 31, curva azul) e a correspondente representação gráfica do modelo de Andreasen, com  $q=0,21$  (reta vermelha).



**Figura 31:** representação gráfica da distribuição granulométrica dos grãos refratários e do modelo de Andreasen obtidos para escoabilidade máxima ( $q=0,21$ ).

Na tabela 9 podemos ver a percentagem em peso de cada uma das classes granulométricas estudadas.

**Tabela 9:** distribuição granulométrica do refratário obtido após o abatimento do forno.

Classes granulométricas ( $\mu\text{m}$ )	Quantidade (% peso)
2000	38,3
1000	23,6
500	11,4
355	3,8
212	4,3
150	2,0
125	1
106	1,14
63	4,65
-----	9,81

O empacotamento de partículas, que condiciona o processamento e muitas propriedades de misturas de pós (pós soltos, suspensões, pastas, prensados e sinterizados), é fortemente condicionado pela distribuição granulométrica e morfologia das partículas.

Uma elevada eficiência de empacotamento de partículas apenas se consegue quando os pós estão presentes na mistura numa vasta gama de classes de tamanhos diferentes. Se a eficiência de empacotamento é máxima então a fluidez de escoamento é mínima.

O modelo clássico semi-empírico, de Andreasen, descrito pela equação 2, pressupõe a existência de uma distribuição contínua de tamanhos até partículas infinitamente pequenas, sendo representado graficamente por uma reta de declive  $q$ , chamado módulo de distribuição. Para a maximização da densidade de empacotamento, o módulo de distribuição ideal é  $0,37 < q < 0,40$ , podendo atingir valores inferiores a 0,33 para partículas longe da esfericidade. Vários trabalhos publicados demonstram que existe melhor escoamento (maior fluidez) para misturas com elevado teor de pós finos, isto é, com módulo de distribuição próximo de  $q=0,21$  <sup>8</sup>.

$$\frac{CPFT}{100} = \left(\frac{D}{D_L}\right)^q$$

**Equação 2**

Onde:

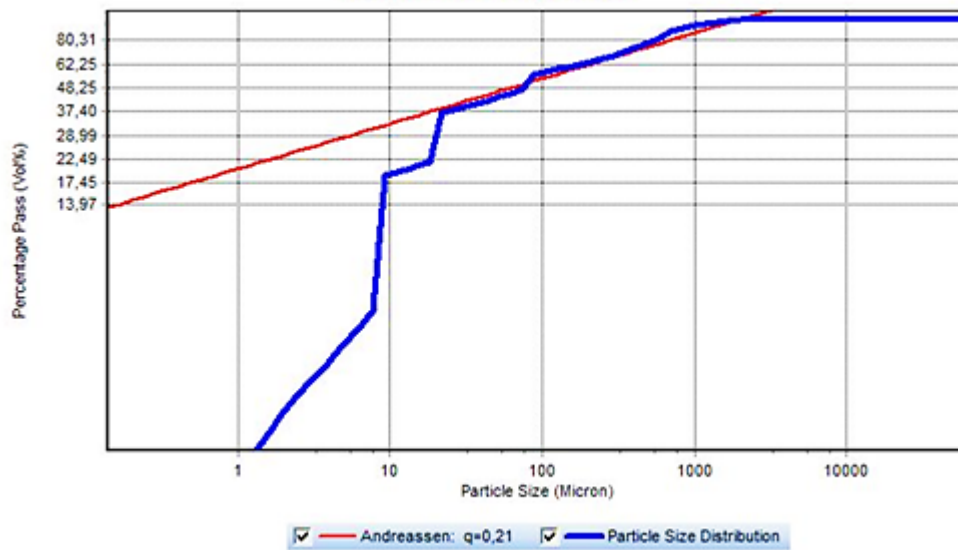
CPFT - percentagem cumulativa de partículas menores que D;

D - Diâmetro de partícula;

$D_L$  – Diâmetro da partícula de maior tamanho;

$q$  – Módulo de distribuição granulométrica.

Partindo de classes de tamanhos de partículas conhecidas, normalmente definidas pelas aberturas de malhas dos peneiros disponíveis, o programa de cálculo “EMMA” calcula, por um processo de convergência gráfica entre os pontos de sucessivas curvas de distribuição e a reta cujo declive é o módulo pretendido, a quantidade necessária de cada classe para se produzir uma mistura com um determinado módulo de distribuição e a correspondente curva final de distribuição (Figura 32).



**Figura 32:** curva de distribuição granulométrica da amostra com distribuição de Andraessen teórica e experimental obtida com a combinação de diferentes classes da matéria-prima.

Atendendo a que usualmente o tamanho mínimo da abertura dos peneiros na indústria é de 45  $\mu\text{m}$  não se considerou as classes granulométrica menores que 20  $\mu\text{m}$ . Para uma maior aproximação à reta de Andraessen foi necessário ajustar as classes granulométricas como se descreve na Tabela 10.

**Tabela 10:** constituição (% peso) de cada classe granulométrica na distribuição original e numa distribuição de fluidez máxima.

<b>Classes granulométricas (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Quantidade (% peso)</b>
Classe A (2000-106)	38,3
Classe B (2000-500)	29,7
Classe C (1000-500)	17,8
Classe D (106-63)	14,2



# Capítulo VI





## 6 Conclusão

A concretização deste estágio permitiu experienciar o meio industrial e desenvolver competências na área da fundição. As atividades laboratoriais permitiram a consolidação de conhecimentos relevantes para o processo produtivo e ganho de autonomia na prática laboratorial. Estas atividades de controlo são de elevada importância para o processo produtivo porque permitem averiguar possíveis problemas ou defeitos antes de a peça chegar ao cliente.

Dos vários ensaios realizados relativamente à degradação do EPS pode concluir-se que o método de aplicação mais eficaz seria com uma pipeta pois a reação dá-se de uma forma mais extensa. No entanto o tipo de aplicação deve ser escolhido segundo o tamanho do modelo e do tipo de construção da moldação.

Quando se pretende obter peças menores que 1 Ton este processo de degradação do EPS é praticável pois consegue-se remover o modelo na sua totalidade evitando o processo de queima que, para além de libertar grandes quantidades de CO<sub>2</sub>, pode danificar a areia de moldação. Para peças maiores que 1 Ton este processo não é viável pois fica difícil remover o EPS solubilizado devido à elevada quantidade de EPS necessária para fazer o modelo.

Futuramente, espera-se encontrar soluções para a solubilização do EPS para peças maiores que 1 Ton, que poderão incluir alguma remoção do EPS manualmente e apenas aplicar o R-limoneno nas zonas de acesso difícil para evitar que grandes quantidades de EPS fiquem agarradas à areia de moldação.

Através da análise mineralógica por DRX pode concluir-se que o revestimento do forno é à base de bauxite. Este tipo de revestimento tem um excelente comportamento quando exposto a elevadas temperaturas. Apesar de este revestimento já não reunir condições para utilização segura do forno pode ser reutilizado na forma de granulado recuperado para fazer machos para fundição ou cones cerâmicos de vazamento, desde que as peças produzidas tenham uma resistência mecânica suficiente para aguentar o peso do metal líquido.

A viabilidade deste método de reutilização, como qualquer outro, depende de uma análise económica antecipada. O investimento em equipamentos e recursos humanos para a

implementação de uma nova metodologia é elevado o que leva a uma demora no retorno da redução de matéria- prima e outros custos inerentes ao abatimento dos resíduos.

Com este trabalho pode concluir-se que para se obter um pó com escoamento ótimo deve-se adicionar 38,3% da classe (2000-106  $\mu\text{m}$ ), 29,7% da classe (2000-500  $\mu\text{m}$ ), 17,8% da classe (1000-500  $\mu\text{m}$ ) e 14,2% da classe (106-63  $\mu\text{m}$ ).

## Bibliografia

- (1) Duritcast [www.duritcast.pt](http://www.duritcast.pt) (acedido Oct 22, 2013).
- (2) Durit-Gruppe <http://www.durit-gruppe.de> (acedido Oct 23, 2013).
- (3) Ferreira, J. C. *Tecnologia da Fundição*; 1st ed.; Fundação Calouste Gulbekian: Lisboa, 1999.
- (4) Chiaverini, V. *Aços e Ferros Fundidos*; ABM, Ed.; 7th ed.; São Paulo, 2005.
- (5) Silva, R. Apontamentos de Fundição, Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro, Universidade de Aveiro.
- (6) Lopes, A. Apontamentos Aulas de Tecnologia Metalúrgica, Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica, Universidade de Aveiro, 2013.
- (7) Callister, Jr., W. *Ciência e Engenharia dos Materiais - Uma Introdução*; LTC–LivrosTécnicos e Científicos Editora S.A., Ed.; 7ª ed.; 2008.
- (8) Pinto, D. Comportamento Termomecânico de um Betão Refratário de 100% Alumina para Aplicações Monolíticas., Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2011.
- (9) Martins, A. X. Composições cerâmicas otimizadas a partir de resíduos do desmantelamento de refratários de fornos industriais, Universidade da Beira Interior, 2014.
- (10) Smith, J.D.; Fang, H.; Peaslee, K. D. Characterization and recycling of spent refractory wastes from metal manufacturers in Missouri. *Resources, Conservation and Recycling*, 1999, 25, 151–169.
- (11) Nystrom, H.E.; Kehr, W.R.; Pollock, J. Impediments to refractory recycling decision-making. *Resources, Conservation and Recycling*, 2001, 31, 318–326.
- (12) *EMMA User Guide. Elkem Materials Mixture Analyser.*
- (13) Kannan, P.; Biernacki, J. J.; Visco Jr., D. P. A review of physical and kinetic models of thermal degradation of expanded polystyrene foam and their application to the lost foam casting process. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 2007, 78, 162–171.
- (14) <http://www.acepe.pt/index.php/eps> <http://www.acepe.pt/index.php/eps> (acedido Nov 27, 2013).
- (15) Snijders, E. A. Water Expandable Polystyrene, Tese de Doutoramento, Eindhoven University of Technology, 2003.

- (16) Ferreira, J. C. Estudo da degradabilidade de poliestireno modificado quimicamente, Tese de Mestrado, Universidade do Minho, 2004.
- (17) Kannan, P.; Biernacki, J.J.; Visco Jr, D.P.; Lambert, W. Kinetics of thermal decomposition of expandable polystyrene in different gaseous environments. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 2009, 84, 139–144.
- (18) Metha, S.; Biederman, S.; Shivkumar, S. Thermal degradation of foamed polystyrene. *Journal of Materials Science*, 1995, 20, 2944–2949.
- (19) García, M.; Gracia, I.; Duque, G.; Lucas, A.; Rodríguez, J. F. Study of the solubility and stability of polystyrene wastes in a dissolution recycling process. *Waste Management*, 2009, 29, 1814–1818.
- (20) Miller-Chou, B.A.; Koenig, J. L. A review of polymer dissolution. *Prog. Polym. Sci.*, 2003, 28, 1223–1270.
- (21) Shin, C.; Chase, G. G. Nanofibers from recycle waste expanded polystyrene using natural solvent. *Polymer Bulletin*, 2005, 55, 209–215.
- (22) Bicas, J.L.; Dionísio, A.P.; Pastore, G. M. Bio-oxidation of Terpenes: An Approach for the Flavor Industry. *Chemical Reviews*, 2009, 109, 4518–4531.
- (23) Friedman, L.; Miller, J. G. Odor incongruity and chirality. *Science*, 1971, 172, 1044–1046.
- (24) Filipsson, A.F.; Bard, J.; Karlsson, S. World Health Organization: Geneve, 1998.
- (25) Toplisek, T.; Gustafson, R. Cleaning With D-Limonenes: A Substitute for Chlorinated Solvents? *Precision Cleaning*, Witter Publishing Corporation, 1995, 17–22.
- (26) Novaes de Oliveira, P. Apontamentos Aula de Metais Ferrosos e Não Ferrosos, Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis, 2012.
- (27) Reis da Silva, V. Implementação de um Sistema de Controlo do Processo de Produção do Ferro Fundido Nodular, Aplicando a Análise Térmica, Tese de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto, 2010.
- (28) Sousa, R. Incorporação de Metal Duro em Fundidos, Tese de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto, 2013.
- (29) Oliveira, R. P. Análise Térmica na Previsão da Resistência à Tracção de Ferros Fundidos Cinzentos de Grafite Lamelar, Tese de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Faculdade de Engenharia do Porto; Universidade do Porto, 2009.

