



**Marisa Sofia Monteiro**    **Utilização de areia de moldação regenerada na**  
**Dias da Conceição**    **produção de machos para fundição**





**Marisa Sofia Monteiro  
Dias da Conceição**

**Utilização de areia de moldação regenerada na  
produção de machos para fundição**

Relatório de estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais, realizado sob a orientação científica do Doutor Augusto Luís Barros Lopes, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro e do Doutor José Carlos Martins de Almeida, Investigador do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro e supervisão na empresa do Engenheiro João Matos, responsável pelo Departamento de Métodos e Modelagem da Funfrap - Fundição Portuguesa S.A..



## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor Rui Ramos Ferreira e Silva**  
Professor associado Universidade de Aveiro

**Doutor Rogério Paulo Alves Lopes**  
Diretor técnico e de qualidade da empresa Duritcast

**Prof. Doutor Augusto Luís Barros Lopes**  
Professor auxiliar da Universidade de Aveiro



## **agradecimentos**

Ao Professor Doutor Augusto Lopes e ao Doutor José Carlos pela orientação e ajuda imprescindível na realização deste trabalho.

Ao Eng.º João Matos pela oportunidade de realizar o estágio na Funfrap, pela partilha de informação e conselhos ao longo de todo o estágio.

À Funfrap - Fundação Portuguesa, pela colaboração e por permitir o uso das suas instalações e em especial ao Sr. º José Matos e ao Eng.º João Castro que me acompanharam diretamente ao longo de todo o trabalho realizado e a todas as pessoas pertencentes ao departamento técnico que me ajudaram na integração à empresa.

À minha família pela ajuda, apoio e acompanhamento ao longo do meu percurso académico.

Aos meus amigos que partilharam comigo bons momentos durante estes anos académicos.

A todos, o meu obrigado.





## **palavras-chave**

Fundição, moldação em areia verde, areia de moldação, machos, areia para machos, regeneração mecânica

## **Resumo**

O presente trabalho foi realizado no âmbito do estágio curricular efetuado na empresa Funfrap - Fundição Portuguesa, S.A. e teve como objetivo principal avaliar a possibilidade da utilização de areia de moldação regenerada para produzir machos para fundição.

No estudo foram utilizadas areias resultantes do abate de moldações, regeneradas utilizando dois métodos mecânicos distintos e diferentes parâmetros de processamento.

A realização do trabalho envolveu um estudo comparativo das características das areias regeneradas, de areia virgem e de areia obtida do abate de moldações. Após esta etapa de caracterização dos materiais iniciais, foram produzidos provetes de macho com diferentes proporções de areia virgem e de areia regenerada que foram submetidos a testes de resistência mecânica e de permeabilidade. Com base nestes resultados, foi selecionada a formulação com 100% de areia regenerada B2 para produzir machos que foram submetidos a ensaios industriais. Estes testes mostraram que a substituição integral da areia virgem por areia regenerada B2 combinada com a adição de mais 10% de resina podia ser utilizada na produção de machos corpo/cilindro e camisa/teto sem degradação excessiva das características destes. No entanto, no caso dos machos RO2, esta substituição originou uma elevada percentagem de rejeição dos machos e de defeitos nas peças. Para além do impacto ambiental positivo, estimou-se que esta formulação permitiria uma poupança de aproximadamente 44 000€ mensais.

Foi ainda realizado uma análise das características da areia regenerada selecionada após diferentes estágios do processo de regeneração.



**Keywords**

Metal casting, green sand casting, moulding sand, core sand, mechanical regeneration treatment

**Abstract**

This work was carried out within the scope of a curricular internship performed at Funfrap - Fundação Portuguesa, S.A. with the main goal of evaluate the use of regenerated molding sand to produce cores for metal casting.

In the study were used molding sands obtained used molds and regenerated by two different mechanical methods using different processing parameters.

The work included a comparative study about the characteristics of the regenerated sands, the virgin sand and the sand obtained from used molds. After this stage of characterization of the sands, samples with different proportions of virgin and regenerated sand were produced and used in mechanical and permeability tests. Based on these results, the formulation with 100% regenerated sand B2 was selected to produce cores that were used in industrial tests. These tests showed that the total replacement of virgin sand by regenerated sand B2 combined with the addition of more 10% of resin could be used in the production of cylinders and water passages cores without excessive degradation of their characteristics. However, in the case of RO2 cores, this replacement resulted in a high ratio of core rejection and defects in the casted parts. In addition to the positive environmental impact, it was estimated that this formulation would allow savings of approximately 44,000€ per month.

An analysis of the characteristics of the selected regenerated sand after different stages of the regeneration process was also performed.



## Índice

<b>Índice de Figuras</b> .....	v
<b>Índice de Tabelas</b> .....	ix
<b>Índice de Abreviaturas e Símbolos</b> .....	xi
1. Introdução.....	1
1.1. Ferros fundidos .....	2
1.2. O processo de fundição .....	5
1.3. Fundição com moldações em areia .....	7
1.3.1. Moldação em areia verde .....	8
1.3.1.1. Características da areia utilizada no fabrico das moldações .....	11
1.3.2. O Processo de caixa fria fenólico uretano .....	14
1.3.2.1. Características da areia utilizada no fabrico de machos.....	16
1.4. Regeneração das areias de fundição .....	19
1.5. A empresa Funfrap.....	21
1.5.1. Processo Produtivo .....	23
1.5.1.1. Sector da moldação .....	23
1.5.1.2. Sector da macharia .....	24
1.5.1.3. Sector da fusão e vazamento .....	25
1.5.1.4. Sector do acabamento.....	25
2. Procedimento Experimental .....	27
2.1. Caracterização das areias .....	27
2.1.1. Determinação da percentagem de humidade.....	30
2.1.2. Determinação da percentagem de finos .....	30
2.1.3. Análise granulométrica e determinação do índice de finura .....	31
2.1.4. Determinação do coeficiente de angularidade .....	33
2.1.5. Determinação da perda ao fogo.....	35
2.1.6. Determinação do pH.....	36
2.1.7. Determinação do AVD.....	37

2.1.1.	Determinação do teor em material volátil .....	37
2.1.2.	Determinação da percentagem de argila ativa.....	38
2.1.3.	Determinação da percentagem de carbono.....	39
2.2.	Produção e caracterização de provetes de macho .....	40
2.2.1.	Determinação da resistência à flexão e da duração de vida em bancada .....	40
2.2.2.	Determinação da permeabilidade .....	42
2.3.	Ensaio industriais .....	44
2.3.1.	Determinação da dureza .....	47
2.3.2.	Ensaio com líquido penetrante .....	47
3.	Resultados e Discussão .....	49
3.1.	Caracterização das areias .....	49
3.2.	Caracterização dos provetes de macho .....	54
3.3.	Ensaio industriais com a formulação selecionada.....	65
3.3.1.	Machos para retorno de óleo do bloco de motor 740.....	65
3.3.2.	Machos corpo/cilindro e camisa/teto para o bloco de motor 275 .....	68
3.4.	Análise de custos .....	72
3.5.	Análise complementar da areia regenerada selecionada.....	73
3.5.1.	Caracterização da areia após cada passagem pelo sistema de regeneração ...	74
3.5.2.	Caracterização da fração recolhida pelo sistema de despoeiramento em cada passagem pelo sistema de regeneração .....	76
4.	Conclusões .....	79
	Sugestões para trabalho futuro .....	81
	Referências bibliográficas .....	83
	Anexos .....	87
	Figura A1 - Figura do gráfico que relaciona o tempo com o volume da areia para determinar a superfície específica real (gráfico pertencente à norma interna, fornecido pelo fabricante do equipamento).....	87
	Tabela A1 - Resultados da análise granulométrica das areias I, II, A1, A2, B1 e B2. ....	88

Tabela A2 - Resultados da análise granulométrica das areias I, II e da areia B2 após a 1 <sup>a</sup> , 2 <sup>a</sup> , 3 <sup>a</sup> e 4 <sup>a</sup> passagem pelo sistema de regeneração. ....	88
Tabela A3 - Resultados da análise granulométrica da fração recolhida pelo sistema de despoejamento durante a regeneração da areia B2. ....	89
Figura A2 - Registo dos ensaios industriais dos machos RO2 produzidos com a formulação selecionada. ....	90
Figura A3 - Registo do primeiro conjunto de ensaios industriais dos machos corpo/cilindro produzidos a formulação selecionada. ....	91
Figura A4 - Registo do primeiro conjunto de ensaios industriais dos machos camisa/teto produzidos a formulação selecionada. ....	92
Figura A5 - Registo do segundo conjunto de ensaios industriais dos machos corpo/cilindro e camisa/teto produzidos a formulação selecionada. ....	93





## Índice de Figuras

Figura 1 - Diagrama de equilíbrio verdadeiro (estável) das ligas de ferro-carbono. Adaptado de [9].	3
Figura 2 - Microestruturas dos diferentes tipos de ferro fundido: a) cinzento, b) nodular, c) branco, d) vermicular e e) maleável [9].	4
Figura 3 - Percentagem de C e Si no aço e em alguns tipos de ferros fundidos [13].	5
Figura 4 - Esquema ilustrativo do processo de fundição [15].	5
Figura 5 - Classificação dos processos de fundição. Adaptado de [15].	6
Figura 6 - Esquema representativo do processo de fundição em moldações de areia verde. Adaptado de [16].	8
Figura 7 - Ciclo típico de utilização da areia verde. Adaptado de [18].	9
Figura 8 - Sistema de gitagem de uma moldação [20].	10
Figura 9 - Representação esquemática do processo típico de produção por fundição com moldações em areia [17].	11
Figura 10 - Influência da granulometria da areia na permeabilidade [10].	12
Figura 11 - Evolução da resistência à compressão da moldação com o teor de humidade da areia verde para diferentes percentagens de bentonite. T - ponto de têmpera para a mistura com 6% de bentonite. Adaptado de [20].	13
Figura 12 - Mecanismo de reação do processo de caixa fria fenólico uretano. Adaptado de [23].	15
Figura 13 - Influência do teor de humidade da areia na resistência à flexão de machos imediatamente e uma hora após a cura [24, 28].	17
Figura 14 - Classificação da forma das partículas [14].	18
Figura 15 - Superfície específica de 1 kg de areia de sílica em função do seu tamanho médio e grau de angularidade das partículas (cujo valor é igual a 1 para partículas esféricas e aumenta com a irregularidade da forma das partículas) [24, 28].	18
Figura 16 - Esquema de um processo de regeneração térmico [33].	20
Figura 17 - Exemplo de um bloco de motor produzido pela Funfrap [36].	22
Figura 18 - Equipamentos utilizados pela Funfrap para a preparação das moldações: a) sistema de compactação das moldações superior e inferior e b) falso-molde para colocação dos machos na moldação.	24

Figura 19 - Ilustração da ferramenta utilizada no fabrico de machos <sup>[19]</sup> .....	25
Figura 20 - Areias estudadas no trabalho: areia virgem (areia I), areia resultante do abate de moldações (areia II), areias regeneradas pelo método A (areias A1 e A2) e pelo método B (areias B1 e B2). .....	28
Figura 21 - Representação esquemática dos processos de regeneração da areia utilizada no trabalho. a) Método A; b) e c) método B <sup>[38, 39]</sup> . .....	29
Figura 22 - Equipamento <i>METTLER TOLEDO HE53</i> utilizado na determinação da percentagem de humidade das areias <sup>[40]</sup> . .....	30
Figura 23 - Equipamentos utilizados para secar e lavar as areias: a) estufa <i>PROLABO</i> , b) excicador e c) Autoclay <i>DIETERT DETROIT NO. 534-A</i> . .....	31
Figura 24 - Sistema <i>TYLER Ro-Tap</i> de agitação de peneiros e série de peneiros <i>ASTM E 11</i> . .....	32
Figura 25 - a) Equipamento <i>Georg Fischer POF</i> usado na medição da superfície específica real; b) torneira na posição A; c) torneira na posição R e d) torneira na posição B. ....	34
Figura 26 - Equipamentos utilizados na determinação da perda ao fogo das areias. a) Cadinho refratário e b) mufla <i>Nabertherm B 180</i> . .....	36
Figura 27 - Equipamento <i>Brinkmann Metrohm 632 pH-Meter</i> utilizado na medição do pH e agitador magnético <i>LABOVOLT Secteur</i> .....	36
Figura 28 - a) Cadinho e tampa de platina e b) mufla <i>OCRAS ZAMBELLI ZA</i> . .....	37
Figura 29 - Ultrassons <i>LECO</i> e conjunto de equipamentos <i>Georg Fischer PMB</i> usados na determinação da percentagem de argila ativa. ....	39
Figura 30 - Espectrómetro <i>Leco CS230</i> utilizado na determinação da percentagem de carbono. ....	40
Figura 31 - Equipamentos utilizados na produção dos provetes: a) misturador <i>Felino</i> , b) gerador de DMEA e ar comprimido do <i>Laempe GMBH 63_C_05</i> e c) máquina de sopragem, caixa de provetes metálica, camisa de sopragem e cabeça de gazagem do <i>Laempe GMBH 63_C_05</i> . .....	41
Figura 32 - Sistema utilizado na determinação da resistência à flexão dos provetes. a) Equipamento <i>Georg Fischer PFG</i> e b) nanómetro com ponteiro de arrasto.....	42
Figura 33 - Equipamento <i>Georg Fischer PRA</i> para compactar o provete para a permeabilidade.....	43
Figura 34 - a) Equipamento <i>Georg Fischer PDU</i> usado na medição da permeabilidade. Torneira b) na posição A, c) na posição E e d) na posição B. ....	44

Figura 35 - Exemplo dos machos ensaiados: a) macho RO2; b) macho corpo/cilindro, c) macho camisa/teto. O macho da figura b) é apresentado antes da pintura e com um outro macho não ensaiado.....	45
Figura 36 - Misturador <i>FORDATH 3</i> , utilizado nos ensaios industriais. ....	46
Figura 37 - Durómetro <i>Georg Fischer GM-578</i> utilizado no trabalho.....	47
Figura 38 - Ensaio de líquido penetrante na zona do macho RO2. ....	48
Figura 39 - Distribuição granulométrica das areias I e II. Os resultados das análises são apresentados mais detalhadamente na Tabela A1 do anexo.....	50
Figura 40 - Distribuição granulométrica das areias regeneradas: a) areias A1 e A2 e b) areias B1 e B2. Os resultados das análises são apresentados mais detalhadamente na Tabela A1 do anexo.....	52
Figura 41 - Índice de permeabilidade dos provetes de macho produzidos com as diferentes formulações estudadas.....	55
Figura 42 - Resistência à flexão imediatamente e após 24h dos provetes de macho com 100% de areia I. ....	56
Figura 43 (cont.) - Resistência à flexão imediatamente e após 24h dos provetes de macho produzidos com areia I e com a) 10%, b) 20%, c)50%, d) 80% e e) 100% de areia regenerada A1. ....	59
Figura 44 (cont.) - Resistência à flexão imediatamente e após 24h dos provetes de macho produzidos com areia I e com a) 10%, b) 20%, c)50%, d) 80% e e) 100% de areia regenerada A2. ....	61
Figura 45 (cont.) - Resistência à flexão imediatamente e após 24h dos provetes de macho produzidos com areia I e com a) 10%, b) 20%, c)50%, d) 80% e e) 100% de areia regenerada B1. ....	63
Figura 46 (cont.) - Resistência à flexão imediatamente e após 24h dos provetes de macho produzidos com areia I e com a) 20%, b)50%, c) 80% e d) 100% de areia regenerada B2.65	
Figura 47 - Macho RO2 produzido com a nova formulação.....	66
Figura 48 - a) Bloco de motor 740 e b) zona do macho RO2 (delineada a azul). ....	67
Figura 49 - Defeitos dos blocos de motor 740: a) suporte do macho visível no interior da cavidade, b) bolha e c) penetração de metal em fissura do macho.....	67
Figura 50 - Macho corpo/cilindro do bloco de motor 275 produzido com a nova formulação. ....	69
Figura 51 - Macho camisa/teto do bloco de motor 275 produzido com a nova formulação. ....	69

Figura 52 - a) Bloco de motor 275 produzido com os machos obtidos com a nova formulação; b) parte superior; c) parte inferior. As cavidades definidas pelos machos corpo/cilindro e camisas/teto estão indicadas em azul na imagem b).....	70
Figura 53 - Defeitos em blocos de motor 275: a) devido a macho partido; b), c) e d) inclusão de areia.....	70
Figura 54 - Defeitos nas peças produzidas: a) defeito devido a macho partido e b) quebra a quente. ....	72
Figura 55 - Distribuição granulométrica da areia B2 após a 1ª, 2ª, 3ª e 4ª passagem pelo sistema de regeneração. Os resultados das análises são apresentados mais detalhadamente na Tabela A2 do anexo. ....	74
Figura 56 - Distribuição granulométrica da fração fina recolhida pelo sistema de despoeiramento durante a as várias passagens de regeneração da areia B2. Os resultados da análise são também apresentados na Tabela A3 do anexo. ....	76

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Principais tipos ferros fundidos <sup>[10]</sup> . .....	3
Tabela 2 - Série de peneiros usados nos ensaios de determinação da distribuição granulometria e do índice de finura da areia. ....	33
Tabela 3 - Série de peneiros usados nos ensaios de determinação da superfície específica teórica da areia.....	35
Tabela 4 - Valores de índice de finura, percentagem de finos, superfície específica teórica e real e coeficiente de angularidade das areias estudadas. ....	53
Tabela 5 - Valores de percentagem de humidade, de argila ativa, de carbono e matérias voláteis, perda ao fogo, pH e ADV das areias estudadas. ....	54
Tabela 6 - Resistência à flexão, permeabilidade, dureza e massa dos provetes de machos para o retorno de óleo do bloco de motor 740 produzidos com a formulação inicial e a nova formulação.....	66
Tabela 7 - Resistência à flexão, permeabilidade, dureza e massa dos provetes de machos corpo/cilindro de bloco de motor 275 produzidos com a formulação inicial e a nova formulação.....	68
Tabela 8 - Resistência à flexão, permeabilidade, dureza e massa dos provetes de machos camisa/teto de bloco de motor 275 produzidos com a formulação inicial e a nova formulação. ....	68
Tabela 9 - Resistência à flexão, permeabilidade e dureza dos provetes de machos corpo/cilindro de bloco de motor 275 produzidos com a formulação inicial e a nova formulação no segundo conjunto de ensaios. ....	71
Tabela 10 - Resistência à flexão, permeabilidade e dureza dos provetes de machos camisa/teto de bloco de motor 275 produzidos com a formulação inicial e a nova formulação no segundo conjunto de ensaios. ....	71
Tabela 11 - Análise de custos da utilização da formulação selecionada (100% de areia regenerada B2) em substituição da formulação inicial (100% de areia I). Valores mensais em euros.....	73
Tabela 12 - Variação (em %) dos parâmetros utilizados nas várias passagens da areia B2 pelo sistema de regeneração. ....	73
Tabela 13 - Valores de índice de finura e percentagem de finos das areias I, II e B2 após cada passagem de regeneração.....	75
Tabela 14 - Teor de humidade, de argila ativa e de carbono da fração fina recolhida pelo sistema de despoeiramento durante a as várias passagens de regeneração da areia B2. ....	77



## **Índice de Abreviaturas e Símbolos**

ADV - Acid Demand Value

AFS - American Foundry Society

ASTM - American Society for Testing and Materials

CNC - Computer Numeric Control

DMEA - Dimetiletilamina

DMIA - Dimetilisopropilamina

FCA - Fiat Chrysler Automobiles

GM - General Motors

IATF - International Automotive Task Force

ISO - International Organization for Standardization

MDI - Metileno difenil diisocianato

OHSAS - Occupational Health and Safety Assessment Series

TEA - Trietilamina

TMA - Trimetilamina

WCM - World Class Manufacturing





## 1. Introdução

Atualmente, a indústria de componentes para o setor automóvel é um dos setores que mais peças produz pelo processo de fundição com moldações em areia. Este processo é responsável pela produção de uma grande quantidade de resíduos (poeiras, lamas de despoejamento, areias, resíduos metálicos, escórias, refratários, etc.) sendo que, na produção de uma tonelada de fundido são produzidos cerca de 250 kg a uma tonelada de resíduos, em que 30% a 60% são areias utilizadas na obtenção de moldações e de machos <sup>[1]</sup>. A recuperação e reutilização pelas empresas de fundição desses resíduos é uma alternativa que tem menor impacto ambiental do que a atualmente utilizada, que é a deposição em aterro <sup>[2, 3]</sup>. Além disso, reduz a utilização de matérias-primas novas e os custos económicos associados.

O processo de fundição mais utilizado é o de moldação em areia verde, sendo responsável por cerca de 85% da produção de materiais ferrosos <sup>[2]</sup>. Esta é composta por areia de sílica (85-95%), argila ativa como ligante (3-6%), grafite em pó (1-6%) e água (1-4%). Neste processo, a areia é reciclada e reutilizada várias vezes até as suas características se degradarem e não poder ser novamente utilizada no processo. Antes de ser reutilizada, a areia passa por crivos para remover partículas de maior dimensão, por ímanes para retirar algum metal que tenha ficado do processo de abatimento da moldação e é adicionada areia nova, argila, grafite em pó e água para compensar as quantidades perdidas. Esta mistura é novamente usada no fabrico de novas moldações onde ocorrerá um novo vazamento de metal líquido <sup>[2, 4]</sup>. Para além da sua reintrodução no processo de produção de novas moldações, também é possível regenerar a areia e reutilizá-la noutros sectores da fundição, como por exemplo, no fabrico de machos. Estes resíduos podem também ser incorporados em outras indústrias como a da construção e da cerâmica <sup>[5]</sup>.

Em Portugal, com o decreto-lei nº 75/2015 de 11 de maio que aprova o Regime de Licenciamento Único de Ambiente, em conjunto com o decreto-lei nº 73/2015 de 11 de maio que aprova o Sistema da Indústria Responsável, pode-se introduzir no processo tecnológico resíduos em substituição de matérias-primas virgens, estimulando a utilização de resíduos como recurso, praticando uma “Economia Circular” <sup>[6]</sup>.

Um estudo realizado pela Associação Portuguesa de Fundição estimou que, a nível nacional durante o ano de 2016, as fundições de metais ferrosos produziram, como resíduo, entre 60 000 a 80 000 toneladas de areia de moldação e entre 5 000 a 8 000 toneladas de areia de machos com aglutinantes químicos [6].

A Funfrap - Fundição Portuguesa, S.A. é uma empresa de fundição de metais ferrosos para o setor automóvel que produz diariamente cerca de 100 toneladas de resíduos de areia de moldação que são atualmente depositadas em aterro. Com este trabalho pretende-se avaliar a possibilidade da utilização pela empresa de areia regenerada de moldação para produzir machos para fundição, de forma a diminuir os custos inerentes á deposição em aterro e à aquisição de areia virgem, reduzindo simultaneamente o impacto negativo no meio ambiente.

### 1.1. Ferros fundidos

Os ferros fundidos são ligas ferrosas, com um ponto de fusão de cerca de 1 500°C, que contêm mais do que 2,1% de carbono e cerca de 1 a 3% de silício, podendo conter também outros elementos [7, 8, 9].

As ligas de ferro-carbono podem solidificar de forma estável ou metaestável. Na solidificação estável (Figura 1) o carbono precipita sob a forma de grafite que confere uma excelente maquinabilidade, boa absorção de vibrações e atua como lubrificante em superfícies de desgaste. Na solidificação metaestável o carbono surge combinado na forma de cementite ( $Fe_3C$ ) que confere à peça elevada dureza. O primeiro tipo de solidificação é favorecido pela presença de elementos grafitizantes (como o silício) no banho fundido e velocidades de arrefecimento lentas. Pelo contrário, a fase metaestável é favorecida por velocidades de arrefecimento rápidas e baixos teores de elementos grafitizantes [7, 8, 9].

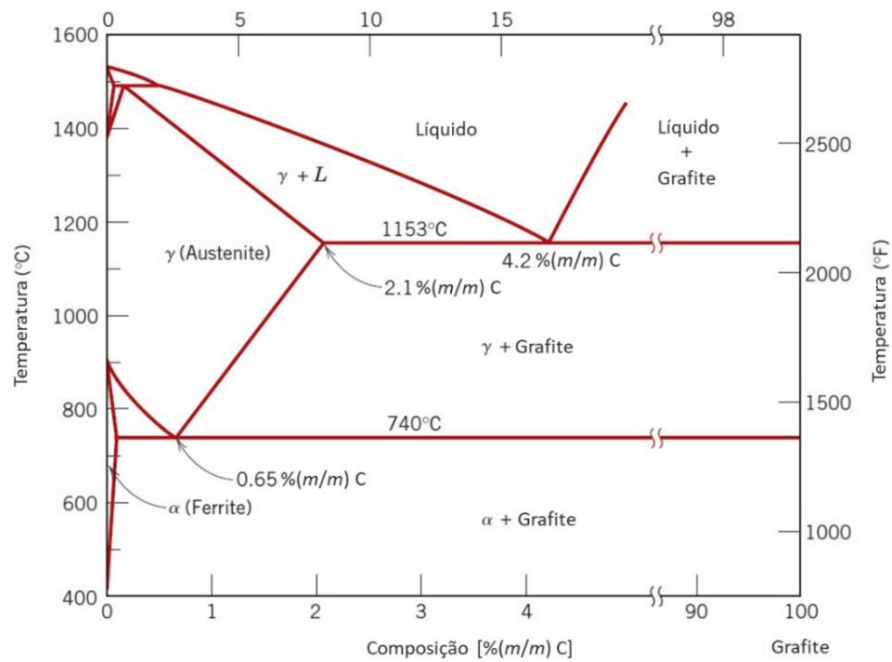


Figura 1 - Diagrama de equilíbrio verdadeiro (estável) das ligas de ferro-carbono. Adaptado de [9].

Os ferros fundidos são geralmente classificados de acordo com a forma como o carbono se apresenta (na forma de grafite ou de cementite) e com a morfologia da grafite (Tabela 1).

Tabela 1 - Principais tipos ferros fundidos <sup>[10]</sup>.

Tipo de ferro fundido	Fase rica em carbono	Matriz	Estrutura final obtida após
Cinzento lamelar	Grafite lamelar	Ferrite e/ou perlite	Solidificação
Cinzento nodular	Grafite nodular	Ferrite e/ou perlite	Solidificação
Branco	Cementite	Perlite e/ou martensite	Solidificação
Vermicular	Grafite vermicular	Ferrite e/ou perlite	Solidificação
Maleável	Grafite	Ferrite e/ou perlite	Tratamento térmico

O ferro cinzento lamelar (Figura 2a) é constituído por lamelas de grafite numa matriz ferrítica e/ou perlítica. Esta forma da grafite favorece a concentração de tensões que está na origem da tenacidade relativamente reduzida deste tipo de ferros fundidos. É de uso mais generalizado como, por exemplo, em blocos de motores, êmbolos, volantes, prensas e transmissões por engrenagens, etc. <sup>[7, 11, 12]</sup>.

No ferro fundido cinzento nodular (Figura 2b), a grafite precipita na forma de nódulos com forma esferoidal) em matrizes ferríticas e/ou perlíticas. Esta forma da grafite é conseguida através da adição de magnésio e/ou cério ao banho fundido, numa operação designada por nodularização. O ferro nodular apresenta maior resistência mecânica e ductilidade do que o ferro cinzento lamelar com composição idêntica. É utilizado no fabrico de corpos de válvulas e de bombas, caixas reductoras, entre outros [7, 11, 12].

O ferro fundido branco (Figura 2c) apresenta o carbono na forma de cementite, que lhe confere uma elevada dureza e resistência ao desgaste [11].

Nos ferros fundidos vermiculares (Figura 2d), a grafite precipita com uma forma vermicular numa matriz ferrítica e/ou perlítica. Os ferros maleáveis (Figura 2e) são obtidos a partir de um tratamento térmico dos ferros brancos. Estes ferros fundidos têm maior tenacidade do que os ferros brancos ou cinzentos lamelares [11].

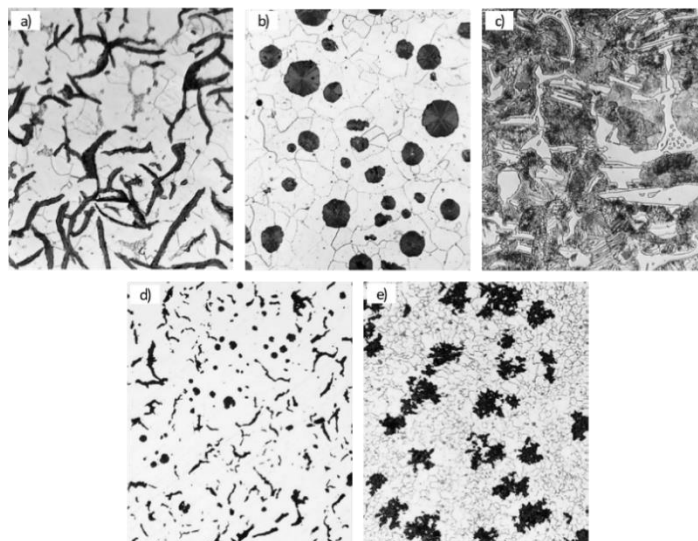


Figura 2 - Microestruturas dos diferentes tipos de ferro fundido: a) cinzento, b) nodular, c) branco, d) vermicular e e) maleável [9].

Na figura seguinte (Figura 3) são apresentados os teores típicos de carbono e de silício de vários tipos de ferros fundidos e do aço.

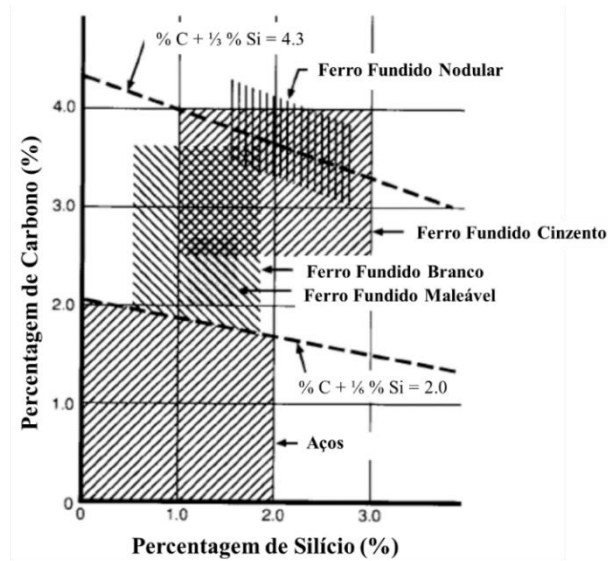


Figura 3 - Percentagem de C e Si no aço e em alguns tipos de ferros fundidos [13].

## 1.2. O processo de fundição

A fundição é um dos processos mais importantes utilizados para produzir peças metálicas. É um processo em que a peça é obtida por solidificação do metal líquido dentro da cavidade de um molde com a forma desejada (Figura 4) [10, 14].

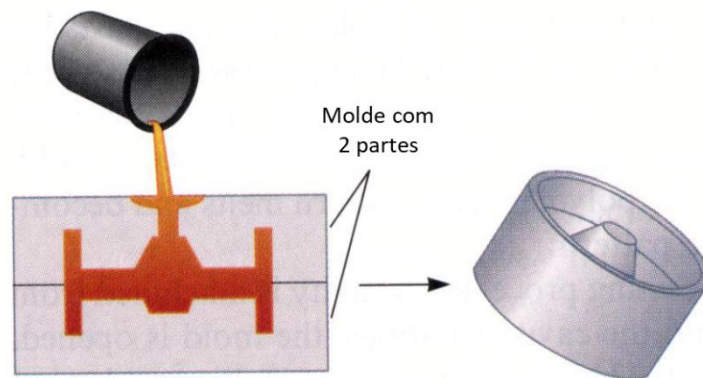


Figura 4 - Esquema ilustrativo do processo de fundição [15].

Este processo permite obter formas complexas que podem ter secções ocas ou cavidades internas. Permite também o fabrico de peças de grande dimensão e em metais difíceis de maquinar [10].

Os processos de fundição são frequentemente classificados em função do tipo de materiais usados no fabrico da moldação e do modelo (Figura 5) <sup>[10]</sup>. As moldações podem ser permanentes ou perdidas. Estas designações também podem ser aplicadas aos modelos, isto é, às peças que são utilizadas para definir a cavidade da moldação que será preenchida como metal líquido. As moldações permanentes são geralmente em ferro, cobre ou aço e não são destruídas após o vazamento. Neste caso, a etapa de acabamento é reduzida, uma vez que é possível obter peças com baixa rugosidade e sem inclusões da moldação. No entanto, estes processos apresentam elevados investimentos iniciais na aquisição das moldações e equipamentos, o tempo para o fabrico das primeiras peças é elevado devido ao elevado tempo de fabricação dos moldes e o peso e dimensões das peças vazadas são limitados. Devido ao elevado desgaste erosivo e fadiga térmica associados às altas temperaturas de vazamento, este tipo de moldações são utilizadas na produção de ligas com temperatura de fusão baixa ou moderada como, por exemplo, ligas com cobre, zinco, estanho, chumbo e magnésio <sup>[10, 16, 17]</sup>.

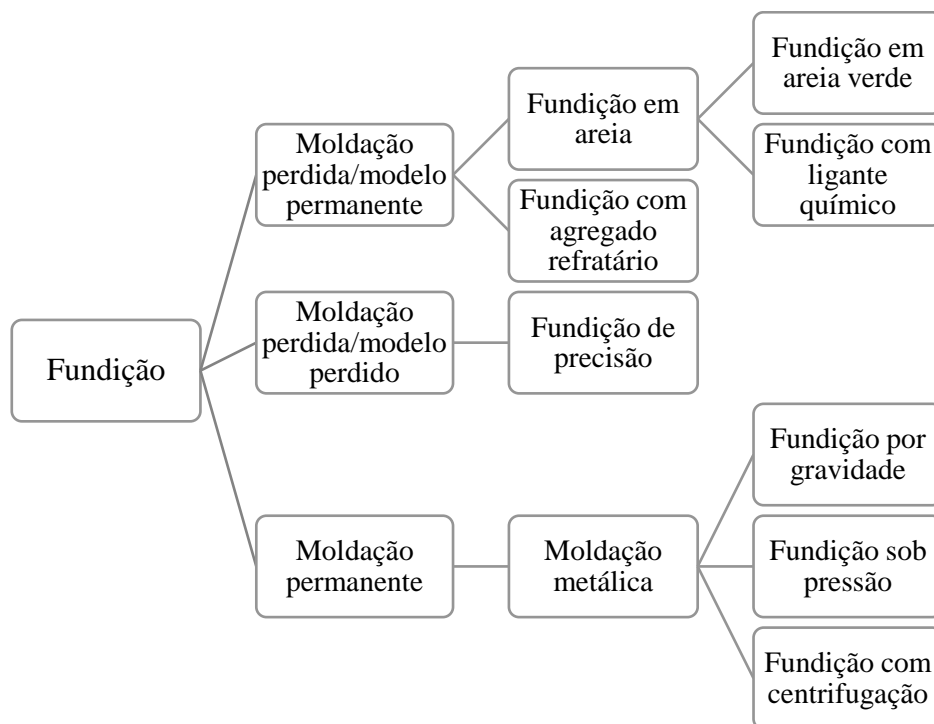


Figura 5 - Classificação dos processos de fundição. Adaptado de [15].

Nos processos com moldações perdidas, estas são destruídas após o vazamento, e incluem a fundição com moldações de areia verde ou com ligante químico, a fundição com moldações de agregado refratário e a fundição de precisão [10, 16, 17]. A seleção do processo de fundição a utilizar tem em conta a tolerância dimensional e acabamento superficial, tamanho, espessura da parede e peso das peças, material a ser vazado, tamanho da série a produzir, custo das ferramentas de produção, entre outros. [14, 15].

### 1.3. Fundição com moldações em areia

Na fundição com moldações em areia, cada moldação serve apenas para a obtenção de peças com um único sistema de gitagem<sup>1</sup>, sendo destruída após a solidificação da peça. O material escolhido para fazer as moldações influencia a tolerância dimensional e o acabamento das superfícies das peças obtidas, podendo também afetar a qualidade das peças vazadas pelo efeito que tem na formação de gases e no aparecimento de defeitos tais como porosidades ou inclusões não metálicas [10].

As moldações em areia podem ser classificadas segundo o tipo de aglomerantes utilizados, que podem ser argilosos ou químicos. Nestes processos, a areia funciona como material refratário e pode ser de sílica, de zircónia, de olivina ou de cromite. Os últimos três tipos de areia são usados quando se pretende produzir peças de metais com elevada temperatura de fusão, uma vez que têm uma temperatura de fusão superior à da sílica. No entanto, a utilização destas areias é limitada pelo seu elevado custo, no caso da fundição de metais ferrosos [10, 14].

Após a adição do aglomerante à areia, a mistura é colocada em contacto com o modelo e compactada. No caso da areia verde, a coesão entre as partículas de areia é assegurada por uma mistura de argila (geralmente bentonite) e água. É também adicionada grafite em pó para reduzir a oxidação e a adesão da areia à superfície das peças. No caso dos aglomerantes químicos, a coesão é fornecida pela cura do aglomerante [10, 17].

A nível mundial são produzidas todos os anos, milhões de peças metálicas pelo processo de fundição e, na sua maioria, recorre-se a moldações de areia para as fabricar. Em Portugal cerca de 95 a 98% dos metais ferrosos são obtidos por fundição com moldações em areia.

Da areia utilizada neste processo, cerca de 80% corresponde a moldações em areia verde e cerca de 15% é areia com aglomerantes químicos [10, 16].

### 1.3.1. Moldação em areia verde

Na moldação em areia verde pode-se distinguir as seguintes etapas principais (**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**): produção/manutenção dos modelos, preparação da mistura da areia com argila, grafite em pó e água, produção das moldações e machos, fusão, vazamento do metal fundido, desmoldação e acabamentos como, por exemplo, rebarbagem, soldadura e pintura [2, 17].

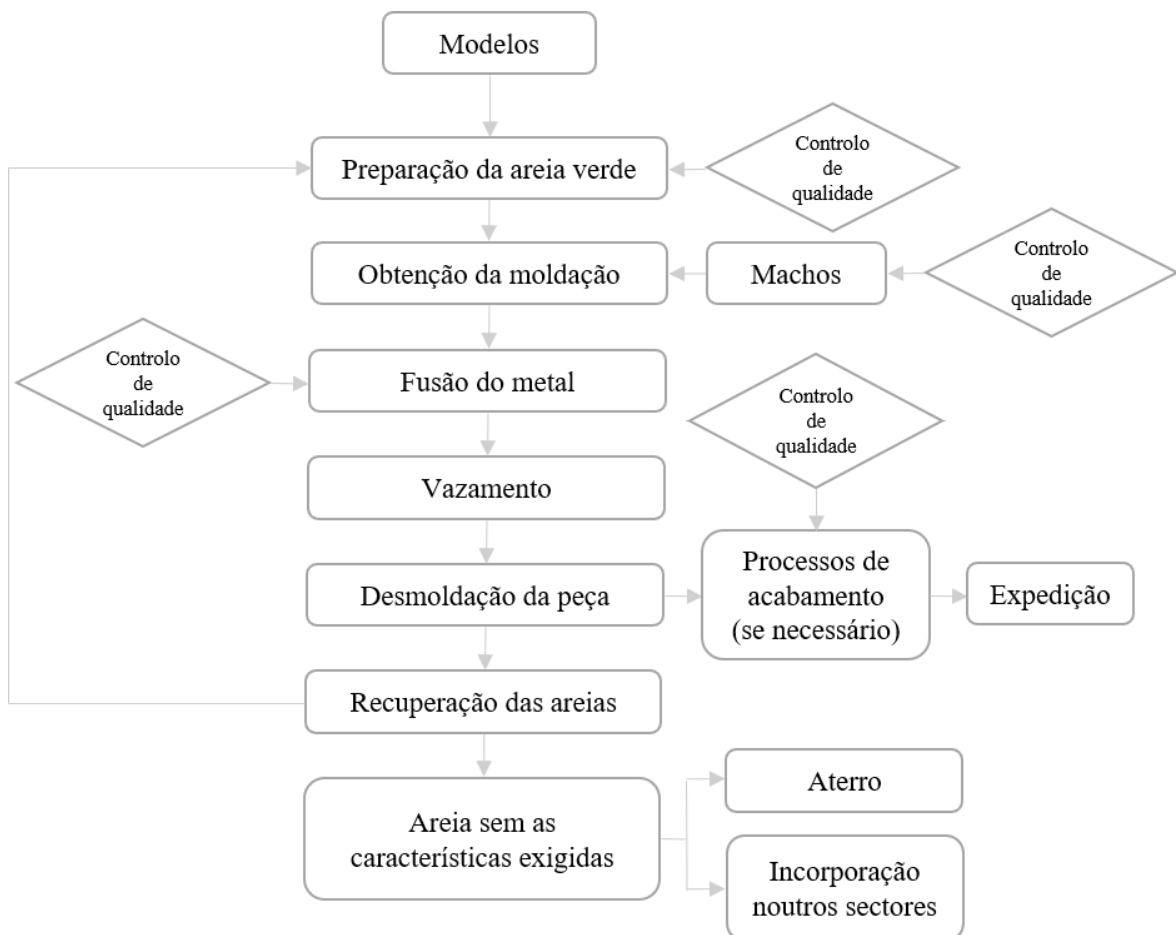


Figura 6 - Esquema representativo do processo de fundição em moldações de areia verde. Adaptado de [16].

Inicialmente é produzido o modelo. Este é obtido com a forma pretendida, tendo em conta a contração do metal durante a solidificação e possível etapa de maquinação. A



moldação é feita por compactação da mistura da areia sobre o modelo. Após a remoção do modelo, a moldação fica com a cavidade que corresponde à forma pretendida. As cavidades internas e reentrâncias das peças são obtidos por incorporação na cavidade moldante de machos produzidos geralmente em areia com ligante químico, de forma a garantir uma resistência mecânica suficiente para suportar a pressão do metal líquido durante o vazamento [10, 16].

Geralmente, a areia de moldação que cai durante as operações de enchimento, de compactação e que resulta do abate após vazamento, é reutilizada na produção de novas moldações (Figura 7).

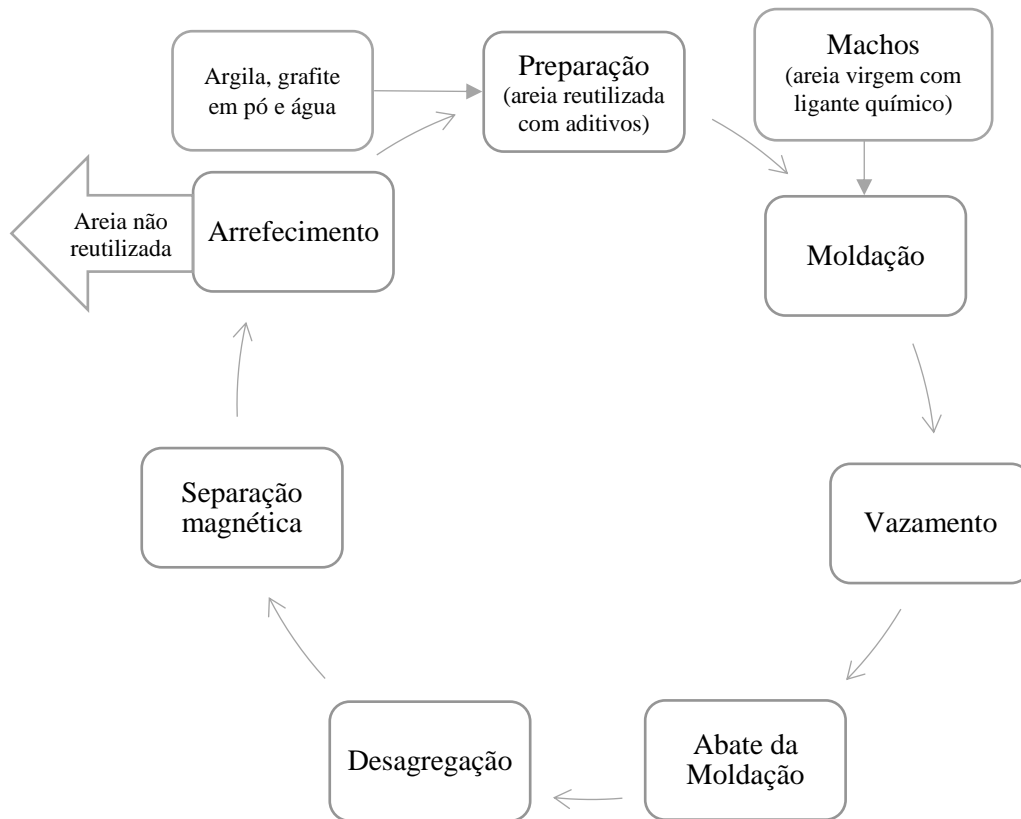


Figura 7 - Ciclo típico de utilização da areia verde. Adaptado de [18].

Na fundição em areia verde é fundamental o controlo da etapa da preparação das areias para se obter uma boa homogeneização da mistura e para assegurar um teor de humidade

adequado. Depois da homogeneização, a mistura entra na máquina de moldar já contendo os modelos, onde são feitas as moldações superior e inferior. A moldação inferior tem um grau de compactação maior que a moldação superior de forma a garantir uma maior resistência mecânica que lhe permita suportar o peso da restante moldação, os machos e pressão do metal líquido. Pelo contrário, o grau de compactação da moldação superior é menor, de forma a facilitar a libertação dos gases contidos na cavidade de moldação ou gerados durante o processo [18, 19].

Na moldação superior são feitos os respiros e a bacia de vazamento. Esta é responsável pelo direcionamento do metal líquido para o gito de descida que, juntamente com os canais de distribuição e ataques, definem o sistema de gitagem que permite transportar o metal do exterior para o interior da cavidade da moldação (Figura 8) [14, 19].

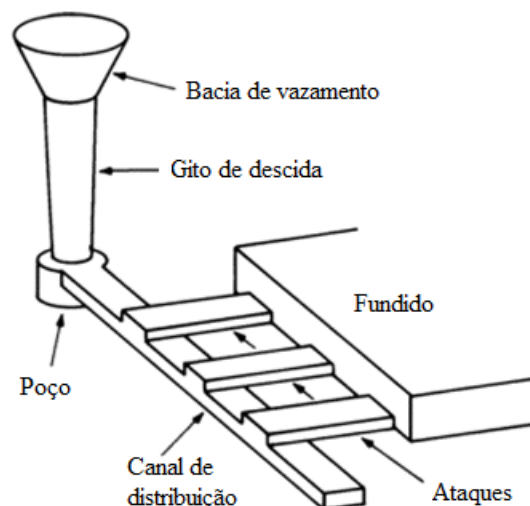


Figura 8 - Sistema de gitagem de uma moldação [20].

De seguida são colocados os machos e unem-se as duas metades da moldação que segue para a secção de vazamento, onde recebe o metal líquido. Após a solidificação, as moldações passam pelo quebra-gitos, onde a peça é separada da areia e dos gitos. Esta areia é separada e recuperada, sendo sujeita a uma dessegregação, peneiração, separação magnética e reposição dos teores de argila, grafite e humidade antes de ser reintroduzida no processo para produzir novas moldações [18]. Na figura seguinte (Figura 9) é apresentada de forma esquemática o processo típico de produção por fundição com moldações em areia.

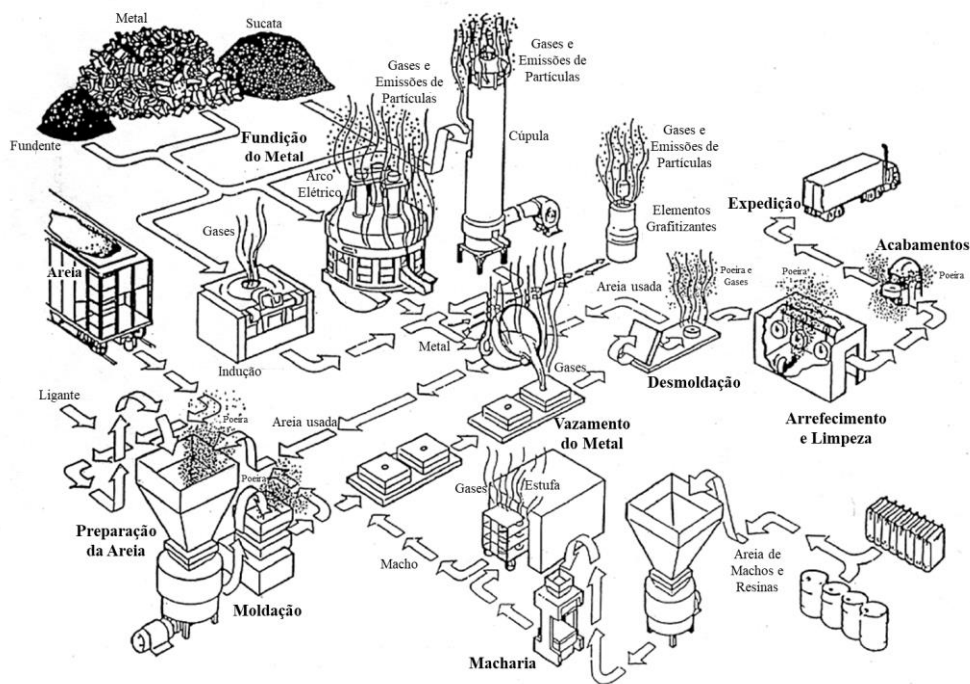


Figura 9 - Representação esquemática do processo típico de produção por fundição com moldações em areia [17].

### 1.3.1.1. Características da areia utilizada no fabrico das moldações

As moldações em areia verde devem de cumprir alguns requisitos para que não originem defeitos nas peças. Devem ter alguma capacidade de se deformar, de forma a permitir a desmoldação da placa do modelo, devem ter resistência mecânica adequada ao manuseamento da moldação, suportar a pressão metalostática no vazamento do metal líquido e permitir uma fácil desmoldação da peça. Tem de ter estabilidade térmica porque o calor durante o vazamento provoca uma rápida expansão da superfície de contacto moldação-metal, podendo criar fissuras na superfície. Além disso, deve ser suficientemente permeável, ou seja, tem de ter uma porosidade interconectada suficiente para permitir a saída do ar e gases gerados, sob pena de poder originar inclusões gasosas nas peças [21, 22].

A areia utilizada no fabrico de moldações em areia verde tem de ser um material desagregado, sem coesão interna podendo ser constituída por grãos de sílica, zircónia, olivina ou cromite, como referido anteriormente. Estas areias têm de ter estabilidade térmica e dimensional a elevadas temperaturas, não podem apresentar reatividade química com o fundido, devem ter uma reduzida molhabilidade pelo metal líquido, têm de apresentar uma

temperatura de fusão superior à de vazamento, não podem gerar gases a altas temperaturas e têm de apresentar uma composição uniforme e compatibilidade com os aglomerantes [4, 10, 21].

Nas fundições de ferro fundido, a mais utilizada é a areia de sílica, devendo esta apresentar um tamanho médio de partícula de cerca de 220  $\mu\text{m}$  a 250  $\mu\text{m}$  (índice de finura situado entre 50 e 60). Quanto menor for o tamanho médio de partícula melhor vai ser o acabamento superficial da peça fundida, mas menor será a permeabilidade da moldação aos gases retidos ou gerados. As areias com um tamanho de partícula elevado, apresentam espaços vazios maiores entre os grãos, proporcionando uma elevada permeabilidade à moldação. Pelo contrário, grãos finos dão origem a uma rede de canais mais estreitos que dificulta a passagem dos gases (Figura 10) [10, 21, 22]. Isto representa uma limitação importante à reutilização contínua das areias, tendo em conta que a quantidade de material fino que contém aumenta com o número de reutilizações.

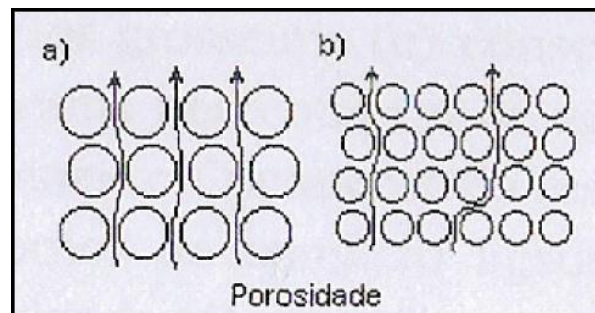


Figura 10 - Influência da granulometria da areia na permeabilidade [10].

O aglomerante, ao recobrir os grãos de areia, deve fornecer à mistura, após compactação, a resistência mecânica e estabilidade dimensional suficiente para o processo. A quantidade de aglomerante utilizada tem de ser suficiente de modo a permitir a coesão dos grãos, mas tem de possibilitar a existência de alguma porosidade interconectada para a passagem do ar e dos gases que se geram. O aglomerante mais comum é a bentonite [19, 21].

Outro componente utilizado é a grafite em pó. Este é incorporado na mistura para reduzir a oxidação do metal e a molhabilidade das paredes da moldação pelo metal líquido. Teores

elevados deste aditivo permitem melhor acabamento superficial das peças, mas diminuem a permeabilidade da moldação [18, 19, 21].

O teor de humidade é um fator também bastante importante nas propriedades das moldações em areia verde. O valor ideal depende fundamentalmente do tipo e quantidade de aglomerante, do teor de grafite em pó e do tamanho das partículas. Na Figura 11 é apresentada a evolução da resistência à compressão de moldações com o teor de humidade, para misturas de areia com diferentes quantidades de bentonite. Para cada mistura existe um valor máximo de resistência mecânica que é alcançado para um determinado teor de humidade, designado por ponto de têmpera, (assinalado na curva correspondente a 6% de bentonite com a letra “T”). Para teores de humidade diferentes da do ponto de têmpera, a resistência mecânica diminui, tornando a molda o mais suscetível a defeitos como, por exemplo, fissuras ou altera es da forma [18, 22].

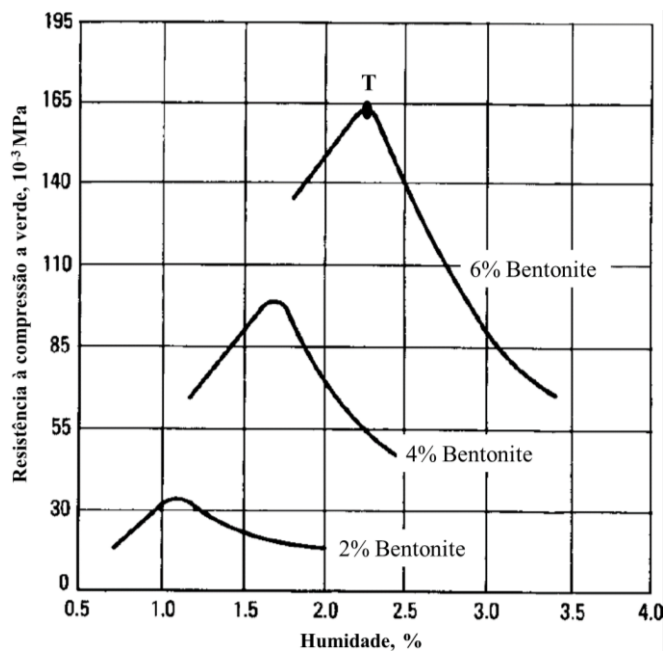


Figura 11 - Evolu o da resistência   compressão da molda o com o teor de humidade da areia verde para diferentes percentagens de bentonite. T - ponto de têmpera para a mistura com 6% de bentonite. Adaptado de [20].

### 1.3.2. O Processo de caixa fria fenólico uretano

Os processos mais comuns de produção de machos para fundição envolvem a utilização de aglomerantes químicos e o endurecimento à temperatura ambiente (processos com presa a frio), por aquecimento (processo de caixa quente) ou a reação com componentes em fase gasosa (processo de caixa fria).

Atualmente, o processo de caixa fria fenólico uretano (também conhecido por processo “*Ashland*” ou “*Isocure*”) é o mais utilizado, representando cerca de 78% da produção de machos para fundição [23]. Neste processo são usadas duas resinas: uma fenólica dissolvida em solventes orgânicos voláteis (denominada por parte I) e um poliisocianato dissolvido também em solvente orgânicos voláteis (denominada por parte II). Estes solventes orgânicos são substâncias de diluição utilizadas para diminuir a viscosidade das resinas [10, 14, 22].

A parte I é um oligômero linear com baixo peso molecular e solúvel, obtido através da reação de polimerização de condensação do formaldeído e do fenol e é responsável pela estabilidade térmica e influencia a reatividade do sistema [23, 24].

A parte II é o reagente para a formação do poliuretano e influencia a resistência térmica e mecânica e o tempo de vida em bancada dos machos. O tempo de vida em bancada corresponde ao tempo disponível para a produção dos machos, após a mistura da areia com o ligante, sem que ocorra a deterioração das propriedades mecânicas finais do macho que impeçam a sua utilização [14, 23, 24]. Existem diversos poliisocianatos e o mais utilizado no processo de caixa fria é o metileno difenil diisocianato (MDI). O MDI é bastante reativo devido à presença dos grupos NCO que reagem com compostos com átomos de hidrogênio ativos, como é o exemplo da água. Por isso, o seu manuseamento deve ser cuidadoso porque o MDI pode reagir com a humidade atmosférica, originando ureia e CO<sub>2</sub>. Esta reação reduz a interação da parte II com a parte I diminuindo a resistência mecânica da mistura da areia com as resinas [25, 26].

Geralmente são utilizados teores iguais de cada parte das resinas (relação 1:1), podendo haver uma diferença de 10% nestes valores. A percentagem de resina adicionada à areia no fabrico de machos pode variar entre 0,8 a 2%, consoante as características pretendidas [14, 24].

Como catalisador do processo de cura é usada uma amina terciária líquida utilizada sob a forma de aerossol, em conjunto com um gás de transporte que deverá ser seco para impedir a reação da amina com a humidade. Inicialmente a areia é misturada com as resinas parte I e parte II e, de seguida, é moldada e consolidada. A amina é introduzida sob a forma de gás através da mistura compactada para catalisar o processo de cura. Os compostos de amina que podem ser utilizados são a dimetiletilamina (DMEA), a trietilamina (TEA), a trimetilamina (TMA) e a dimetilisopropilamina (DMIA). A DMEA apresenta maior pressão de vapor e maior solubilidade no gás de transporte, sendo a mais utilizada neste processo. A percentagem de amina utilizada na cura varia entre 5% e 7% relativamente ao peso total de resina. Na prática, por cada quilo de mistura é geralmente utilizado cerca de 1 cm<sup>3</sup> a 1,5 cm<sup>3</sup> de amina [10, 14, 24, 27].

Na Figura 12 encontra-se esquematizado o mecanismo de reação resultante da combinação da resina fenólica e do poliisocianato, catalisado pela amina que, em poucos segundos, provoca a cura da mistura através da formação de poliuretano.

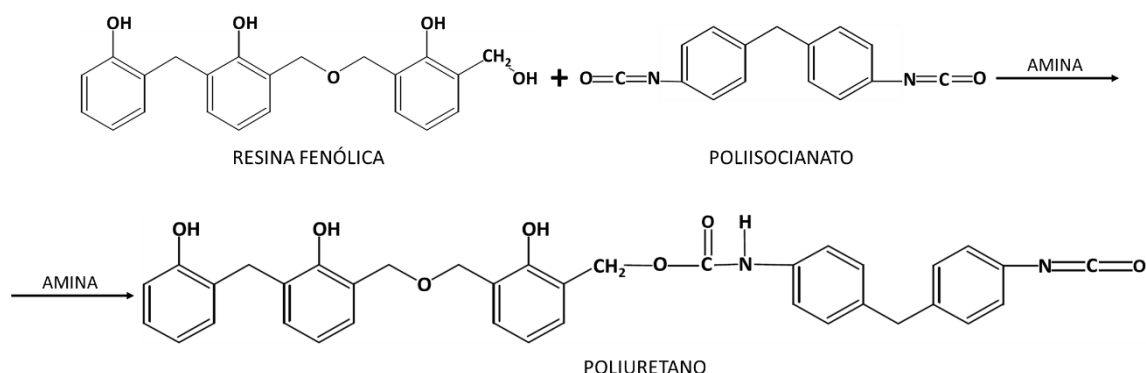


Figura 12 - Mecanismo de reação do processo de caixa fria fenólico uretano. Adaptado de [23].

As principais vantagens deste processo de caixa fria para a produção de machos são: obtenção de uma elevada resistência mecânica imediatamente após a cura, reduzida libertação de gases, elevada precisão dimensional, elevada produtividade, elevada fluidez da mistura, pressão de compactação reduzida, possibilidade de utilização imediata dos machos, possibilidade de obtenção de geometrias complexas e excelente acabamento superficial dos machos que podem dispensar pintura posterior [24, 27].

As principais desvantagens do processo são o custo elevado das resinas e agentes de cura, requer a utilização de areia com elevada qualidade e o controlo da temperatura, o ambiente de trabalho necessita de ser bem arejado e com exaustão que garanta a extração da amina, o sistema de gaseamento é caro e a baixa viscosidade do aglomerante pode dificultar a extração do macho da caixa de machos [24, 27].

#### 1.3.2.1. Características da areia utilizada no fabrico de machos

A qualidade dos machos produzidos pelo processo da caixa fria fenólico uretano depende fortemente das características da areia utilizada. A mais utilizada na produção de machos para fundição é a areia de sílica devido à relação favorável de características e preço. Esta deve apresentar um índice de finura entre 50 e 60, para se conseguir um menor consumo de resina, melhor permeabilidade e fluidez da mistura e para se reduzir o tempo da operação de cura com a amina [21, 22, 24]. Também devem ser controladas pelo menos as seguintes características da areia: humidade, natureza e teor de impurezas, temperatura, pH, tamanho e morfologia das partículas e teor de material fino.

A humidade reduz a fluidez da mistura da areia e provoca a diminuição da resistência mecânica do macho após a cura (Figura 13), porque a água tem tendência a combinar-se com o poliisocianato. Além disso, a sua evaporação devido às elevadas temperaturas durante o vazamento pode originar defeitos nas peças. Por estas razões, a areia deve ter um teor de humidade máximo de 0,2% a uma temperatura de 21°C e se a temperatura aumentar para 32°C o teor de humidade dever ser no máximo 0,1%, para não comprometer a qualidade dos machos [24, 27, 28].



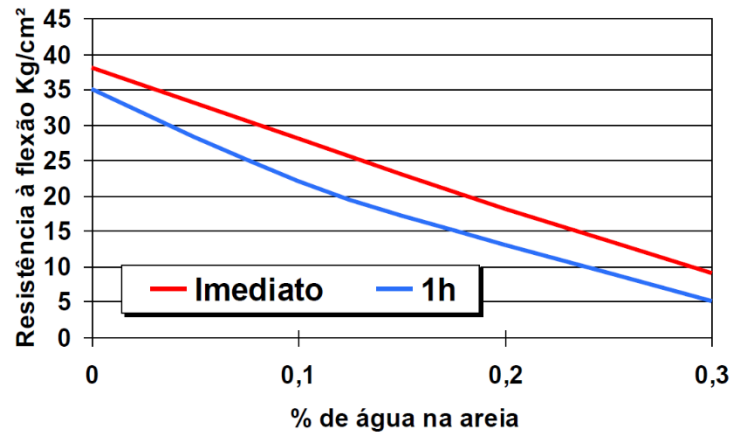


Figura 13 - Influência do teor de umidade da areia na resistência à flexão de machos imediatamente e uma hora após a cura [24, 28].

A areia pode apresentar impurezas que influenciam negativamente o desempenho da mistura. Estas impurezas dificultam a adesão do filme de ligante aos grãos de areia, provocando uma diminuição da resistência mecânica, aumento do consumo de resinas e redução do tempo de vida em bancada dos machos [24].

A temperatura da areia deve estar compreendida entre os 20 e os 25°C porque para temperaturas demasiado elevadas a reatividade da resina torna-se excessiva, diminuindo o tempo de vida em bancada. Podem também originar a evaporação de solventes, provocando uma diminuição da resistência mecânica dos machos. Temperaturas demasiado reduzidas também podem ser prejudiciais à mistura porque aumenta o tempo de cura da mistura e origina um maior consumo de catalisador [24, 27].

O pH deve ser compatível com o aglomerante utilizado. No caso do processo fenólico uretano este valor deve ser próximo de 7. Dado que a cura da mistura é favorecida em meios básicos, a utilização de areia com pH ácido tende a provocar um maior consumo de catalisador, porque uma parte do mesmo é neutralizada pela areia. Pelo contrário, em meios básicos a velocidade de reação entre as partes I e II do aglomerante químico aumenta, diminuindo a vida em bancada dos machos [24, 27].

A forma e tamanho das partículas são outras características importantes. As partículas arredondadas (Figura 14) favorecem uma menor permeabilidade dos machos porque apresentam uma superfície específica menor (Figura 15) do que grãos com superfície irregular pois necessitam de uma menor quantidade de aglomerante e catalisador. Pelo

contrário, partículas com formas mais irregulares apresentam menor fluidez, conferem maior permeabilidade aos machos, mas necessitam de mais aglomerante e catalisador [24, 28].

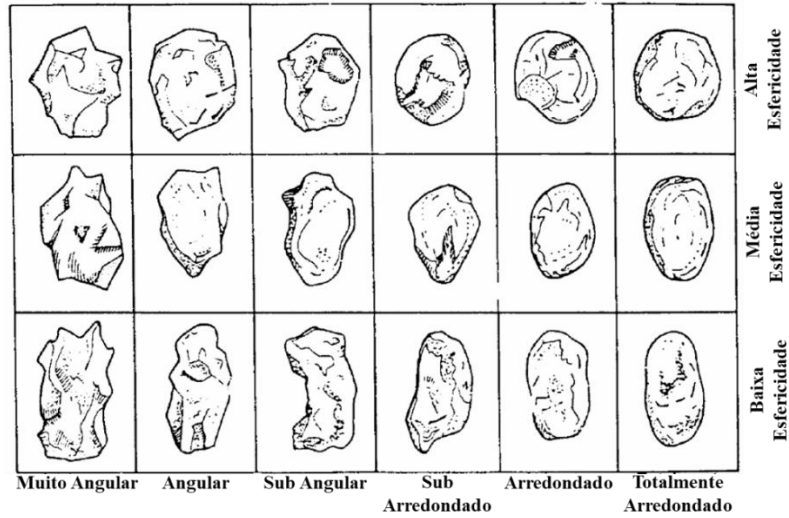


Figura 14 - Classificação da forma das partículas [14].

Relativamente ao tamanho das partículas, a sua diminuição é acompanhada por um aumento da superfície específica, que se traduz no aumento do consumo de aglomerante e de catalisador. Também diminui a permeabilidade dos machos, sendo recomendado que a areia apresente um teor máximo de partículas finas (com diâmetro inferior a 20  $\mu\text{m}$ ) de 2% [24, 28].

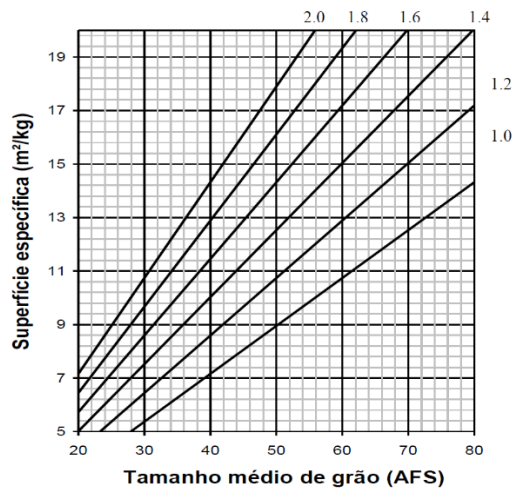


Figura 15 - Superfície específica de 1 kg de areia de sílica em função do seu tamanho médio e grau de angularidade das partículas (cujo valor é igual a 1 para partículas esféricas e aumenta com a irregularidade da forma das partículas) [24, 28].

#### 1.4. Regeneração das areias de fundição

Como foi referido anteriormente, a indústria da fundição gera uma grande quantidade de resíduos, dos quais uma parte significativa são areias que foram utilizadas na produção de moldações e machos.

Geralmente esta areia é recolhida após utilização e reutilizada várias vezes até á degradação das suas características. Quando isso ocorre, a areia é retirada do processo e é denominada de areia residual de fundição. Este resíduo contém partículas mais arredondadas e um teor mais elevado de partículas finas do que a areia de moldação devido à fratura dos grãos de areia e a desativação da argila pelas elevadas temperaturas de vazamento do metal líquido. A regeneração permite a reutilização de areias provenientes do processo de moldação e macharia e tem como objetivo aproximar as suas características às do material virgem, permitindo a sua reutilização na produção de novas moldações e machos [4, 16, 29].

A areia regenerada pode substituir totalmente ou parcialmente a areia virgem e o processo de regeneração pode ser por tratamento térmico, por via húmida, por tratamento mecânico, químico ou combinação de métodos. Entre os diferentes tipos de tratamentos de areias de fundição, o tratamento mais utilizado é o termomecânico que combina o tratamento térmico com o tratamento mecânico [29, 30, 31].

O tratamento térmico (Figura 16) é usado quando os ligantes podem ser eliminados por exposição a altas temperaturas (entre 500°C e 600°C). Este tipo de regeneração pode ser realizado utilizando fornos rotativos ou fornos de leito fluidizado. O equipamento mais utilizado é o forno de leito fluidizado porque tem menores custos de construção e manutenção e permite uma maior homogeneidade da temperatura. Este processo tem grande eficiência e a areia regenerada tem elevada qualidade porque permite a limpeza quase completa das partículas de areia, tendo um rendimento próximo dos 100%. As principais desvantagens são os elevados custos energéticos e a produção de gases durante a queima [29, 32].

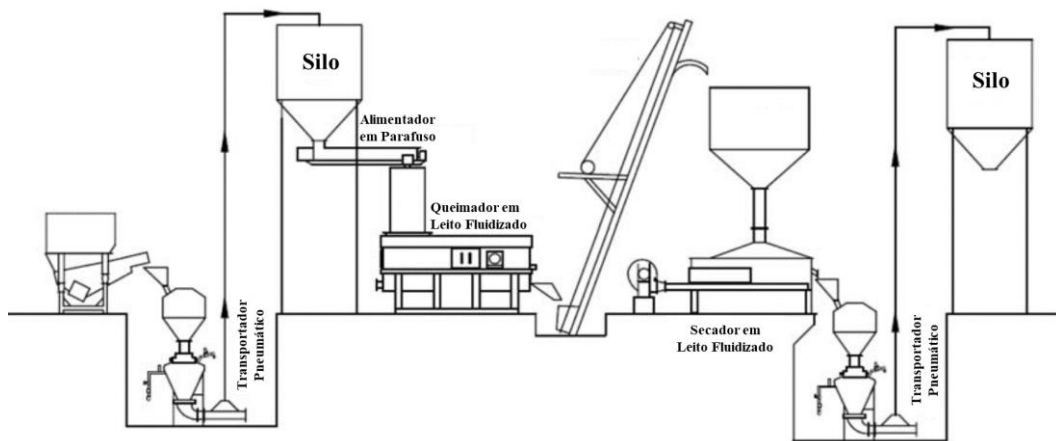


Figura 16 - Esquema de um processo de regeneração térmico [33].

O tratamento por via húmida só é eficaz no tratamento de areias que utilizam ligantes solúveis em água ou que podem ser removidas por lavagem da superfície das partículas de areia como, por exemplo, a areia com silicato de sódio e a areia verde. Nesta técnica, a areia é misturada com água para remover o ligante que se encontra na superfície das partículas e envolve a separação do efluente líquido da areia regenerada, podendo todo o processo ser monitorizado em tempo real. Este tratamento inclui uma etapa de desagregação e separação magnética, seguida de operações de elutriação, decantação e secagem. As principais desvantagens são a criação de resíduos líquidos, o elevado custo de equipamentos e a necessidade de uma etapa final de secagem do material antes de ser reutilizado. Este processo produz areia com qualidade equivalente à virgem, tendo um rendimento tipicamente próximo de 90% [29, 32, 34].

O tratamento químico inclui vários processos que diferem no agente oxidante utilizado. O mais usado é o processo de oxidação avançado, também conhecido por processo Fenton, que utiliza uma mistura de peróxido de hidrogênio e um ião ferroso, criando radicais hidroxil altamente reativos, que atacam e destroem os contaminantes. A grande vantagem associada a esta técnica é que estes contaminantes são destruídos quimicamente, em vez de sofrerem apenas uma concentração, como acontece em processos de adsorção e filtração [29, 35].

O tratamento mecânico consiste na remoção dos resíduos presentes na superfície dos grãos de areia através do impacto e abrasão entre partículas, ou das partículas contra as paredes do equipamento. Este sistema é eficiente para a remoção de resíduos duros e frágeis, tendo perdas de material entre 5% e 15%. No entanto, a obtenção de uma eficiência elevada

exige forças de impacto e abrasão intensas que podem fraturar os grãos e, conseqüente, aumentar a produção de partículas finas [29, 32].

A regeneração mecânica pode ser mecânico-pneumático ou mecânico-rotativo.

O processo mecânico-pneumático é num processo contínuo de regeneração em que é usado ar sob pressão para promover a colisão dos grãos de areia. A areia é transportada juntamente com uma corrente de ar ao longo de um tubo, no fim do qual existe um alvo. Durante o transporte e ao atingir o alvo, os grãos de areia colidem entre si e com as paredes do equipamento, originando a remoção de parte do material que envolve os as partículas de areia. Os principais parâmetros de operação são a velocidade das partículas e o número de passagens pelo sistema. As principais vantagens deste processo são a ampla variedade das areias de fundição que podem ser regeneradas, a reduzida manutenção dos equipamentos e o excelente controlo da distribuição granulométrica das partículas obtidas. Como desvantagem, apresenta a necessidade do equipamento ter de ser alimentado com aglomerados menores que 0,3 cm, precisando de uma operação prévia de desagregação dos aglomerados maiores [29, 32].

No processo mecânico-rotativo, a areia é enviada para uma cuba que ao girar acelera os grãos para que colidam entre si e contra as paredes do equipamento. Em alguns sistemas, as partículas são arrastadas em vez de serem projetadas, de forma a aumentar a abrasão entre elas e com as paredes do equipamento. Neste processo, a aceleração conferida aos grãos de areia é significativamente maior que no processo mecânico-pneumático, resultando numa remoção mais eficiente das camadas contaminantes, mas originando geralmente mais fratura das partículas [29, 32].

### 1.5. A empresa Funfrap

A Funfrap - Fundição Portuguesa, S.A é uma empresa de fundição pertencente ao grupo Teksid e encontra-se localizada em Cacia, no distrito de Aveiro. Criada em 1983, iniciou a sua atividade em janeiro de 1985 [36].

A fábrica desenvolve e produz componentes para a indústria automóvel em ferro fundido como, por exemplo, blocos de motor (Figura 17), cárteres chapéus, cambotas e caixas

diferenciais. Tendo uma capacidade de produção de 45 000 toneladas por ano, toda a produção da Funfrap é exportada, sendo os principais clientes a Fiat Chrysler Automobiles (FCA), a Renault, o grupo PSA e a OMR - GM (General Motors) <sup>[36]</sup>.



Figura 17 - Exemplo de um bloco de motor produzido pela Funfrap <sup>[36]</sup>.

A unidade de produção inclui <sup>[36]</sup>:

- ✓ 4 fornos elétricos com capacidade de 7,3 toneladas cada;
- ✓ 1 máquina de vazamento automático - Mezger;
- ✓ 1 máquina de moldar Osborn;
- ✓ 10 máquinas de fabrico de machos;
- ✓ 16 robots para montagem, pintura e embalagem;
- ✓ 4 máquina de Computer Numeric Control (CNC) para pré-maquinação;
- ✓ sistemas de análise química com espectrómetros automáticos;
- ✓ máquinas de controle dimensional 3D e de digitalização ótica;
- ✓ capacidade de modelação e simulação com softwares AutoCad, Unigraphics, Catia e Magmasoft.

A empresa é certificada pelas normas IATF 16949:2016 (antiga ISO/TS 16949), NP EN ISO 14001, OHSAS 18001 e pela ISO 50001 e tem implementada a metodologia World Class Manufacturing (WCM) para uma melhoria contínua em todos os processos <sup>[37]</sup>. É uma das 7 fundições do grupo italiano Teksid que foi fundado em 1978 pelo Grupo FIAT. Em 2014, com a fusão da Fiat S.p.A e do Grupo Chrysler surge o novo grupo FCA, da qual a

Teksid tornou-se também parte, que atualmente é o sétimo maior fabricante de automóveis do mundo. Por sua vez, a Teksid produz peças em ferro fundido e alumínio para a indústria automóvel e está presente em 6 países: Portugal, Itália, Polónia, China, México e Brasil, tendo uma capacidade produtiva de 620 mil toneladas de peças por ano <sup>[36]</sup>.

Na Funfrap as peças são produzidas em ferro fundido lamelar e nodular, as moldações são em areia verde e os machos são obtidos pelo processo de caixa fria fenólico uretano utilizando o DMEA como agente catalisador.

### 1.5.1. Processo Produtivo

O processo produtivo principal da Funfrap pode ser dividido em quatro sectores: moldação, macharia, fusão e vazamento e acabamentos.

#### 1.5.1.1. Sector da moldação

A moldação corresponde a uma linha contínua composta por duas etapas fundamentais: a preparação da areia verde e a produção da moldação. A primeira etapa envolve a recolha, arrefecimento, desagregação, remoção das partículas metálicas e da fração das partículas demasiado finas da areia das moldações e machos abatidos. Ao material resultante é adicionada, bentonite, grafite em pó e água, de forma a repor a formulação pretendida.

Na produção da moldação, a areia é compactada sobre as placas modelo (Figura 18a) e os respiros que são feitos utilizando uma ferramenta denominada placa de agulhas. De seguida é feita a bacia de vazamento e são colocados os machos com o auxílio de um sistema automático designado por falso-molde (Figura 18b). Por fim, as moldações são fechadas e é efetuado o vazamento do metal líquido para o seu interior.

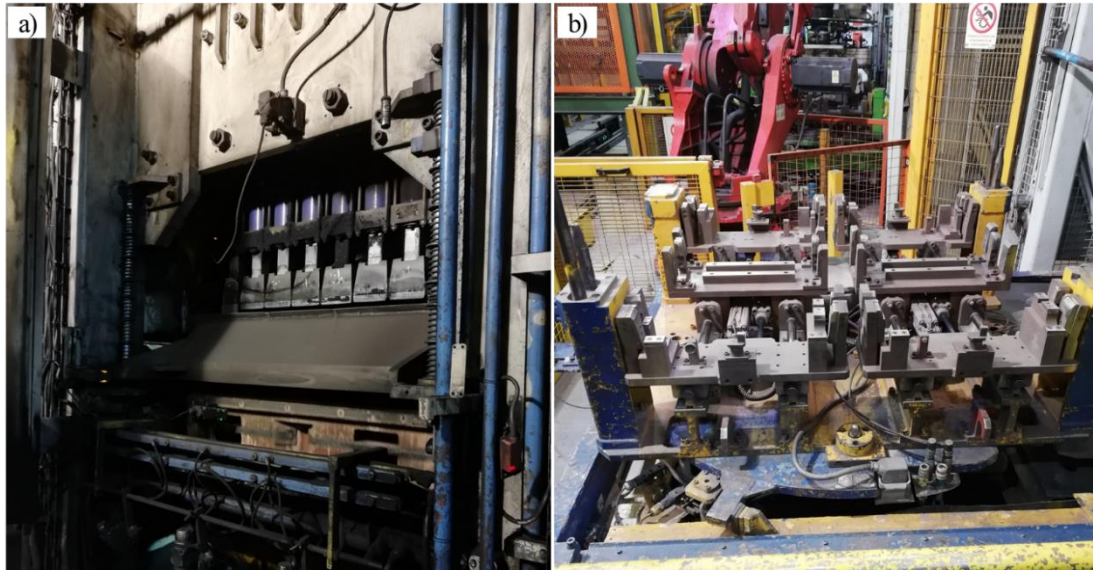


Figura 18 - Equipamentos utilizados pela Funfrap para a preparação das moldações: a) sistema de compactação das moldações superior e inferior e b) falso-molde para colocação dos machos na moldação.

#### 1.5.1.2. Sector da macharia

Os machos são produzidos no setor da macharia com o recurso a uma caixa de machos, representada esquematicamente na Figura 19.

Inicialmente, ocorre a mistura da areia com a resina (parte I e parte II) num misturador. De seguida, a mistura é introduzida com pressão de ar comprimido na caixa de machos (Figura 19), feita a descompressão e a introdução da DMEA durante um tempo predefinido. Após a extração, facilitada pelo acionamento de ejetores, os machos são pintados, secos em estufas e guardados em armazém até serem utilizados na produção.



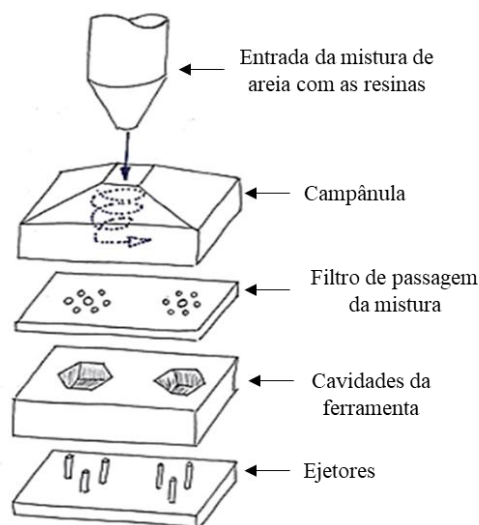


Figura 19 - Ilustração da ferramenta utilizada no fabrico de machos <sup>[19]</sup>.

#### 1.5.1.3. Sector da fusão e vazamento

A fusão e vazamento pode ser dividida em quatro etapas: preparação da carga metálica, transferência da carga do forno para a colher (transvaze), vazamento e arrefecimento.

Este setor inclui uma linha de vazamento e quatro fornos com capacidade de 7,3 toneladas cada <sup>[36]</sup>. O sistema de vazamento é semiautomático, uma vez que o metal fundido é primeiro transferido do forno para as colheres e destas para as moldações. Após o vazamento e solidificação, a moldação é destruída por um sistema vibratório e extraída a peça.

#### 1.5.1.4. Sector do acabamento

O acabamento da peça envolve a sua separação do sistema de giteagem, granalhagem, retificação, acabamento manual (para remoção de excessos de areia e metal que ficaram nas superfícies exteriores das peças), pintura, secagem e acondicionamento. Na Funfrap é realizada ainda uma pré-maquinação das caixas diferenciais após o acabamento manual.



## **2. Procedimento Experimental**

Este trabalho foi realizado no âmbito do estágio curricular na empresa Funfrap - Fundação Portuguesa, S.A. e, como já foi referido, teve como objetivo principal avaliar a possibilidade da utilização de areia de moldação regenerada para produzir machos para fundição.

No estudo foram utilizadas areias resultantes do abate de moldações e regeneradas por empresas externas utilizando dois métodos mecânicos distintos (método A e método B) e diferentes parâmetros de processamento.

A realização do trabalho envolveu um estudo comparativo das características das areias regeneradas A1 e A2, regeneradas pelo método A, e as areias B1 e B2, regeneradas pelo método B, de areia virgem utilizada pela Funfrap na produção de machos (areia I) e de areia obtida do abate de moldações (areia II).

Após esta etapa de caracterização dos materiais iniciais, foram produzidos provetes de macho com diferentes proporções de areia virgem e de areia regenerada que foram submetidos a testes de resistência mecânica e de permeabilidade. Com base nestes resultados, foi selecionada uma formulação para produzir machos para serem usados em ensaios industriais. O sucesso da nova formulação foi avaliado através da análise da quantidade e o tipo de defeitos exibidos pelos machos e peças obtidas nestes ensaios.

Foi ainda realizado um estudo do impacto económico da alteração e uma análise das características da areia regenerada selecionada após diferentes estágios do processo de regeneração.

### **2.1. Caracterização das areias**

Todas as técnicas utilizadas para caracterizar as areias estudadas neste trabalho (Figura 20) foram realizadas nos laboratórios químico e de caracterização de areias da Funfrap, seguindo as normas internas da empresa. Estas técnicas incluíram a determinação da percentagem de humidade, a percentagem de finos (norma nº ME0023), a granulometria e do índice de finura (norma nº ME0024), o coeficiente de angularidade (norma nº ME0032), a perda ao fogo (norma nº ME0025), o ADV (Acid Demand Value) (norma nº ME0007), o

pH (norma nº ME0010), a percentagem de matérias voláteis (norma nº ME0018), a percentagem de argila ativa (norma nº ME0005) e a percentagem de carbono (norma nº I016PRS2).

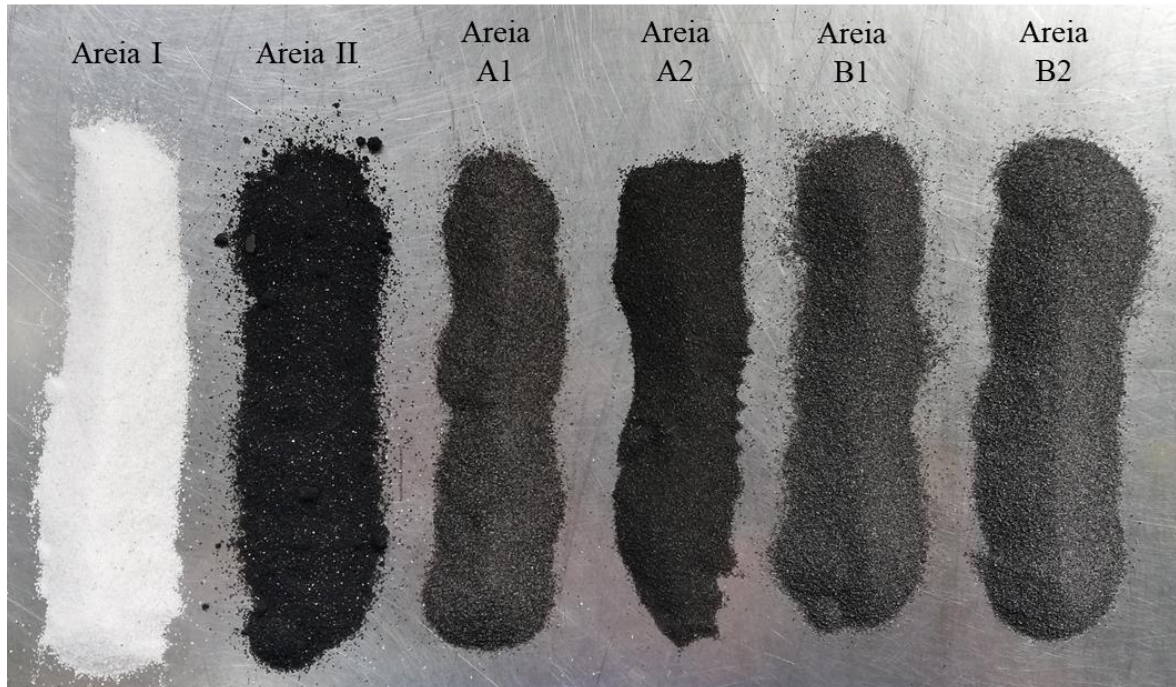


Figura 20 - Areias estudadas no trabalho: areia virgem (areia I), areia resultante do abate de moldações (areia II), areias regeneradas pelo método A (areias A1 e A2) e pelo método B (areias B1 e B2).

As areias regeneradas encontravam-se armazenadas em contentores com cerca de 1 tonelada durante aproximadamente quatro meses antes de se realizar as análises. Todas as areias foram regeneradas por processos mecânicos que incluíram a separação magnética de partículas metálicas e crivagem, seguida de desagregação e eliminação parcial dos aditivos da areia de moldação através de um processo de abrasão promovido pela rotação de rolos no interior de uma câmara e, por fim, uma aspiração do material mais fino por uma corrente de ar forçado (Figura 21).

As areias A1 e A2 foram regeneradas através de uma única passagem pelas diferentes etapas do processo de regeneração A, utilizando a mesma velocidade de rotação, mas diferentes tempos de ciclo, que foi maior para a areia A1. As areias B1 e B2 foram regeneradas através de 4 passagens sucessivas pelo processo de regeneração B, utilizando diferentes velocidades de rotação, diâmetros do tambor de retenção da areia, comprimento da haste e pressão dos cilindros. De referir que o processo A é descontínuo, permitindo a

regeneração de cerca de 40 kg de material de cada vez, com um rendimento de aproximadamente 85% (a que corresponde 15% de material fino removido pelo sistema de aspiração). O processo B é contínuo e tem um rendimento de aproximadamente 70%.

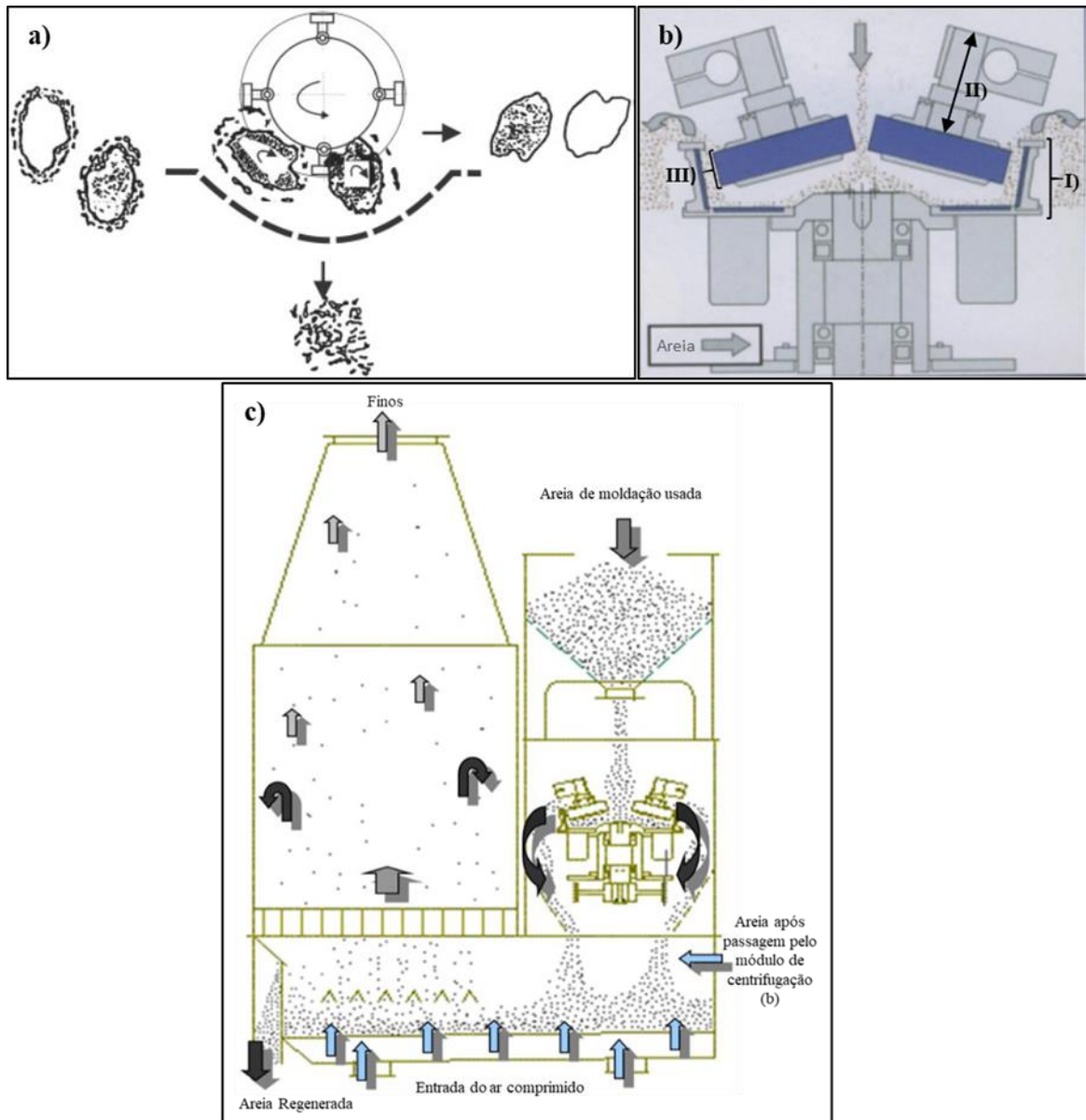


Figura 21 - Representação esquemática dos processos de regeneração da areia utilizada no trabalho. a) Método A; b) e c) método B [38, 39].

### 2.1.1. Determinação da percentagem de humidade

A percentagem de humidade foi determinada utilizando um equipamento *METTLER TOLEDO HE53* (Figura 22), utilizando-se cerca de 15 a 20 gramas de amostra. Após uma operação prévia de calibração do equipamento, a amostra foi submetida a uma temperatura de 105°C e determinada a perda de peso durante a secagem.



Figura 22 - Equipamento *METTLER TOLEDO HE53* utilizado na determinação da percentagem de humidade das areias <sup>[40]</sup>.

### 2.1.2. Determinação da percentagem de finos

A percentagem de finos corresponde à percentagem em peso de partículas com diâmetro equivalente inferior a 20  $\mu\text{m}$ . Este parâmetro foi determinado pelo método da sedimentação, utilizando a lei de Stokes. Para tal, pesou-se 100 g de areia seca numa balança analítica *PIONEER OHAUS PA4102C*. A areia foi seca na estufa *PROLABO* (Figura 23a) a 105 °C e arrefecida em excicador (Figura 23b). Todas as amostras secas utilizadas nas análises seguintes seguiram este procedimento. Após a pesagem, foi adicionado 0,05 g de pirofosfato de sódio ( $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ ) e 150 ml de água destilada. O material resultante foi posteriormente submetido a agitação por ultrassons utilizando um equipamento *Georg Fischer PMS* durante 10 min, mexendo-se ocasionalmente. De seguida, o material foi colocado no Autoclav *DIETERT DETROIT NO. 534-A* (Figura 23c) e iniciou-se o dispositivo de lavagem. O aparelho fez ciclos sucessivos de decantação e sifonagem até que a água, após a decantação,

ficasse límpida. A partir do peso do material resultante após secagem a 105°C, determinou-se a percentagem de finos através da seguinte equação:

$$\text{Percentagem de finos (\%)} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100, \quad (1)$$

em que P1 é o peso inicial da amostra a estudar e o P2 é o peso da amostra lavada e seca.



Figura 23 - Equipamentos utilizados para secar e lavar as areias: a) estufa *PROLABO*, b) excicador e c) *Autoclave DIETERT DETROIT NO. 534-A*.

### 2.1.3. Análise granulométrica e determinação do índice de finura

O índice de finura é um valor correspondente ao número de um peneiro fictício que reteria todos os grãos da amostra analisada, se estes tivessem a mesma dimensão média. O índice de finura é aproximadamente proporcional à superfície específica da areia (superfície total da areia por unidade de peso). Quanto maior for o índice de finura, mais fino será o material e maior será a superfície específica <sup>[10]</sup>.

Nestes ensaios utilizou-se uma série de peneiros com abertura de malha normalizada segundo a norma *ASTM E11* (Tabela 2). Para a análise granulométrica, utilizou-se amostras que foram previamente lavadas para se retirar os finos através do processo descrito no ponto 2.1.2. Sobrepôs-se os peneiros (Figura 24) sobre a base por ordem decrescente de aberturas da malha, colocou-se a amostra sobre o peneiro superior e agitou-se o conjunto durante 10 min utilizando um sistema de agitação *TYLER Ro-Tap* (Figura 24). De seguida calculou-se a fração de material retido em cada peneiro a partir da determinação do peso de material respetivo. Nestes ensaios confirmou-se que a diferença entre o peso total de material retido

pelos peneiros e o peso de material inicial não ultrapassava  $\pm 0,2 \%$ . Nos casos em que a diferença não foi nula, este valor foi repartido pelos dois peneiros com maior fração retida.



Figura 24 - Sistema *TYLER Ro-Tap* de agitação de peneiros e série de peneiros *ASTM E 11*.

A distribuição granulométrica foi representada através de um histograma da fração da massa de material retido em cada peneiro e o índice de finura foi calculado através da equação:

$$\text{Índice de finura} = \frac{\text{Soma dos produtos}}{\text{Total das frações retidas}}. \quad (2)$$

A soma dos produtos foi obtida pela soma da multiplicação de cada fração retida em cada peneiro, pelo coeficiente multiplicativo indicado na Tabela 2.



Tabela 2 - Série de peneiros usados nos ensaios de determinação da distribuição granulometria e do índice de finura da areia.

<b>Nº do Peneiro <i>ASTM E 11</i></b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Coefficiente multiplicativo</b>
6	3,360	3
12	1,700	5
20	0,850	10
30	0,600	20
40	0,425	30
50	0,300	40
70	0,212	50
100	0,150	70
140	0,106	100
200	0,075	140
270	0,053	200
Fechado	0	300

#### 2.1.4. Determinação do coeficiente de angularidade

O coeficiente de angularidade traduz o desvio da forma das partículas relativamente à forma esférica e foi obtida através do cálculo da razão entre os valores da superfície específica real e da superfície específica teórica. A medida da superfície específica real foi baseada na passagem de ar através de uma coluna de areia (princípio de Blaine). A superfície específica teórica calculou-se a partir da análise granulométrica, supondo que todos os grãos eram esféricos.

Para a determinação da superfície específica real pesou-se 50 g de areia lavada e seca que foi colocada no tubo graduado do equipamento Georg Fischer *POF* (Figura 25a). Para uma melhor compactação, foi-se batendo nas paredes do tubo, até que não se verificasse redução de volume de material. Após leitura do volume na escala do tubo graduado, colocou-se a torneira na posição A (aspiração) (Figura 25b) e com o auxílio de uma pera de borracha, fez-se subir o petróleo contido no tubo de medida até uma posição predefinida no tubo (marca superior negra) e colocou-se a torneira na posição R (repouso) (Figura 25c). Para a medição rodou-se a válvula para a posição B (serviço) (Figura 25d) e, quando o petróleo

atingiu a segunda posição predefinida (marca superior vermelha), iniciou-se a contagem do tempo que o petróleo demorava a atingir a terceira posição predefinida (marca vermelha inferior). Este tempo foi utilizado para determinar, utilizando a Figura A1 em anexo, a superfície específica real da areia.



Figura 25 - a) Equipamento *Georg Fischer POF* usado na medição da superfície específica real; b) torneira na posição A; c) torneira na posição R e d) torneira na posição B.

Para o cálculo da superfície específica teórica, foi determinada a distribuição granulométrica da areia usada na medição da superfície específica real. O valor foi obtido pela soma dos produtos das frações de material retido em cada peneiro pelo coeficiente multiplicativo indicado na Tabela 3, dividido pelo peso total da amostra.

Tabela 3 - Série de peneiros usados nos ensaios de determinação da superfície específica teórica da areia.

Nº do Peneiro ASTM E 11	Abertura (mm)	Coefficiente multiplicativo
20	0,850	17,94
30	0,600	31,61
40	0,425	44,75
50	0,300	63,04
70	0,212	89,15
100	0,150	125,91
140	0,106	177,95
200	0,075	252,51
270	0,053	355,91
Fechado	-	619,18

Por sua vez, o coeficiente de angularidade foi calculado pela equação:

$$\text{Coeficiente de angularidade} = \frac{\text{Superfície específica real}}{\text{Superfície específica teórica}} \quad (3)$$

#### 2.1.5. Determinação da perda ao fogo

A perda ao fogo corresponde à percentagem de peso que o material perde durante a calcinação. Para a determinação deste parâmetro utilizou-se entre 10 a 15 g de areia seca que foi colocada num cadinho refratário e submetida a calcinação a 900°C durante 1 hora numa mufla *Nabertherm B 180* (Figura 26). Após arrefecimento em excicador e pesagem, determinou-se a perda ao fogo pela equação:

$$\text{Perdas ao fogo (\%)} = \frac{P_2 - P_3}{P_2 - P_1} \times 100, \quad (4)$$

em que P1 é peso da cápsula onde se coloca a areia, P2 é o peso da cápsula mais o produto antes da queima e o P3 é o peso da cápsula mais o produto depois da queima.

O resultado foi a média de dois ensaios, garantindo-se que nenhuma medida diferia do valor médio mais do que 2%.

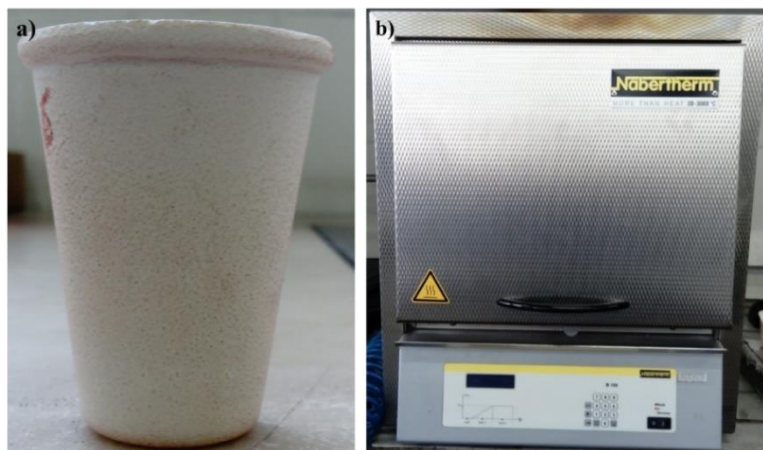


Figura 26 - Equipamentos utilizados na determinação da perda ao fogo das areias. a) Cadinho refratário e b) mufla *Nabertherm B 180*.

#### 2.1.6. Determinação do pH

Na medição do pH utilizou-se o equipamento *Brinkmann Metrohm 632 pH-Meter* apresentado na Figura 27. Para o efeito, pesou-se 30 g de areia seca à qual foi adicionado 30 ml de água destilada e submetida a agitação com ultrassons durante 10 min, agitando-se com uma vareta de vidro duas a três vezes para desagregar a areia. Após um período de estabilização da leitura em que o elétrodo do medidor de pH foi mantido em contacto com a amostra, foi registado o valor exibido pelo equipamento.



Figura 27 - Equipamento *Brinkmann Metrohm 632 pH-Meter* utilizado na medição do pH e agitador magnético *LABOVOLT Secteur*.

### 2.1.7. Determinação do AVD

O ADV (Acid Demand Value) corresponde ao volume de ácido que reage com diversas impurezas contidas na areia. Para a determinação deste valor foi utilizada 50 g de areia, 50 ml de água destilada e 50 ml de HCl N/10. Após a mistura com agitador magnético durante 5 minutos e repouso durante 1 hora para que as impurezas reagissem com o ácido, foi adicionada uma solução 0,1N de NaOH até o pH atingir o valor 3. O procedimento foi repetido para uma amostra preparada nas mesmas condições, mas sem areia (ensaio branco). O ADV foi dado pela diferença entre o volume de NaOH consumido em ambos os ensaios.

### 2.1.1. Determinação do teor em material volátil

O teor em matérias voláteis foi determinado através da perda de peso resultante do aquecimento da amostra a 900°C. Nestes ensaios foi utilizada 1 g de areia previamente seca que foi colocada no interior de um cadinho com tampa (Figura 28a). O conjunto foi pré-aquecido durante 30 segundos na entrada aberta da mufla *OCRAS ZAMBELLI ZA* (Figura 28b) previamente aquecida até 900 °C e, de seguida, colocado no interior desta com a porta fechada durante 2 min e 30 s adicionais.



Figura 28 - a) Cadinho e tampa de platina e b) mufla *OCRAS ZAMBELLI ZA*.

Após arrefecimento em exsiccador, o material foi pesado e a percentagem de matérias voláteis calculada pela equação:

$$\text{Material volátil} = \frac{P1-P2}{P1} \times 100 (\%), \quad (5)$$

em que P1 é peso inicial da areia e P2 é o peso após calcinação.

### 2.1.2. Determinação da percentagem de argila ativa

Este ensaio consistiu na determinação da retenção de azul metileno pelas areias de moldação, permitindo conhecer a quantidade de argila ativa, ou seja, a quantidade de partículas de argila não queimada.

Para isso, pesou-se 5 g de areia seca à qual foi adicionado 50 ml de  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$  com uma concentração de 2%. Após agitação com ultrassons durante 8 min, a mistura foi mantida em agitação com agitador magnético e adicionou-se 2 ml de ácido sulfúrico 5N. Esperou-se 30 s e juntou-se, aproximadamente 80% da quantidade de azul de metileno necessária para obter mudança de cor. Esta quantidade foi determinada através de um ensaio preliminar. Esperou-se mais 2 min antes de se depositar uma gota da solução sobre um papel de filtro. Quando não era observada auréola azul esverdeada contornando a gota depositada (que indicava a presença de azul metileno em solução devido à adição em excesso), adicionou-se mais 1 ml de azul metileno e procedeu-se à recolha da uma nova gota. Esta operação foi repetida até à observação da auréola azul esverdeada. Após confirmação do resultado com recolha de nova gota ao fim de mais 1 min e 30 s, determinou-se a quantidade total de azul metileno adicionado.

O teor de argila ativa na areia foi determinado pela comparação com o valor obtido para uma areia preparada com a percentagem de argila conhecida (mistura padrão). Neste ensaio utilizou-se 4,6 g de areia branca lavada e seca e 0,4 g de argila seca (mistura de 8% de argila ativa) e repetiu-se o procedimento descrito anteriormente. A percentagem de argila ativa foi calculada através da equação:

$$\% \text{A.A} = \frac{Y \times 8}{X} (\%), \quad (6)$$

em que Y e X é o volume de azul de metileno utilizado, respetivamente, no ensaio padrão e na amostra a estudar.

Na Figura 29, encontra-se ilustrado o conjunto de equipamentos utilizados nestes ensaios.



Figura 29 - Ultrassons *LECO* e conjunto de equipamentos *Georg Fischer PMB* usados na determinação da percentagem de argila ativa.

### 2.1.3. Determinação da percentagem de carbono

Para a determinação da percentagem de carbono utilizou-se o método da combustão direta recorrendo-se a um espectrómetro *Leco CS230* (Figura 30). Esta técnica usa um forno de indução para promover a oxidação do carbono, cujo teor é determinado através da medida da absorção de radiação infravermelha pelo  $\text{CO}_2$  gasoso formado. Nesta análise foi utilizada 0,3 g a 0,5 g de areia, à qual foi adicionado um material fundente e um material acelerador. O cadinho contendo a mistura foi conduzido para o interior do forno onde ocorreu a oxidação. Previamente, a câmara de combustão foi purificada com oxigênio para expulsar os gases atmosféricos residuais e, de seguida, iniciada a combustão da mistura numa atmosfera rica em oxigênio para formar  $\text{CO}_2$ . Estes gases são arrastados para uma câmara onde células de infravermelhos vão medindo a absorção pela atmosfera e, desta forma, permitindo a determinação da concentração do carbono na amostra inicial.

Para cada amostra foram realizados 2 ensaios e calculado o valor médio, confirmando-se que a diferença entre os dois resultados não excedia 2%.



Figura 30 - Espectrômetro *Leco CS230* utilizado na determinação da percentagem de carbono.

## 2.2. Produção e caracterização de provetes de macho

Para avaliar o efeito da utilização na areia regenerada na produção de machos, foram preparados provetes de machos a partir da mistura de areia I com areia regenerada A1, A2 e B1 nas seguintes proporções: 100%, 80%, 50%, 20% e 10%. No caso da areia regenerada B2, as proporções estudadas foram 100%, 80%, 50%, 20%.

Para a obtenção dos provetes das diversas formulações foi utilizada 1,6% de aglomerante do sistema fenólico uretano, constituída por 50% da parte I e 50% da parte II. Para o efeito, utilizou-se 10 kg de areia a que foi adicionado 80 g de componente I de resina e 80 g de componente II de resina. Após homogeneização da mistura num misturador *Felino* (Figura 31a), foram preparados provetes para serem usados em ensaios de resistência à flexão (norma nº ME0034 e norma nº ME0039) e de permeabilidade (norma nº ME0050). O processo de obtenção dos provetes e as condições de ensaio foram as definidas pela Funfrap para comparação e controlo de novos produtos para machos.

### 2.2.1. Determinação da resistência à flexão e da duração de vida em bancada

Nestes ensaios foram utilizados provetes retangulares com um comprimento igual a 175 mm e uma altura e largura igual a 22,4 mm. Para tal, encheu-se a camisa de sopragem com a mistura de areia e resinas que foi soprada para o interior da caixa de provetes com uma



pressão de ar de 6 bar. De seguida retirou-se a camisa de sopragem, colocou-se a cabeça de gaseificação sobre a caixa de provetes que foi, de seguida, fechada para evitar fugas de gás. Após a injeção do DMEA e lavagem durante 23 segundos com ar comprimido, foi retirada a cabeça de gaseificação e aberta a caixa para retirar os provetes.

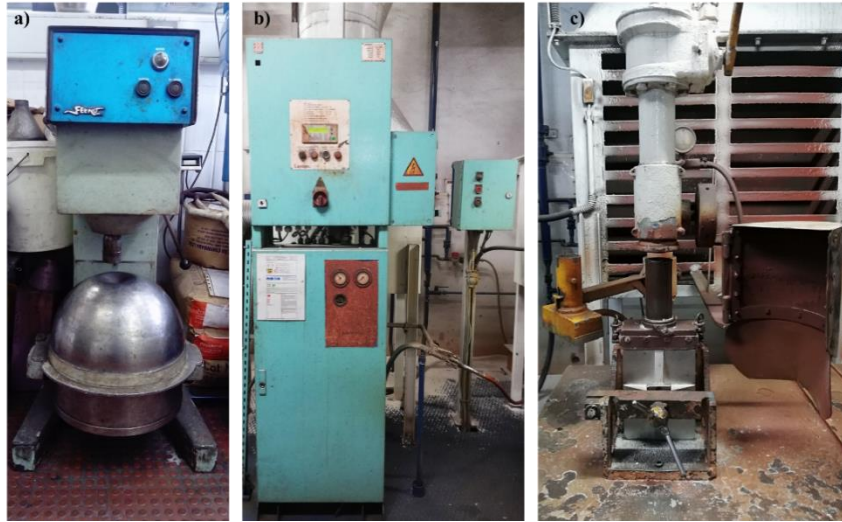


Figura 31 - Equipamentos utilizados na produção dos provetes: a) misturador *Felino*, b) gerador de DMEA e ar comprimido do *Laempe GMBH 63\_C\_05* e c) máquina de sopragem, caixa de provetes metálica, camisa de sopragem e cabeça de gazagem do *Laempe GMBH 63\_C\_05*.

A caracterização da resistência à flexão dos provetes de macho foi realizada através medida da carga de rotura em flexão após 3 min (imediato) e após 24h da preparação dos provetes (norma nº ME0034). Para tal, colocou-se o provete horizontalmente numa prensa manual *Georg Fischer PFG* (Figura 32a) equipada com um manómetro com ponteiro de arrasto (Figura 32b). Por rotação da manivela foi aplicada uma força crescente sobre o provete, que o fletiu até à rotura. A força na rotura foi determinada por leitura da posição do ponteiro de arrasto após o ensaio. Para cada condição foram realizados dois ensaios (em que os valores obtidos não diferiram mais do que 0,5 MPa), sendo o resultado dado pela média aritmética destes valores.

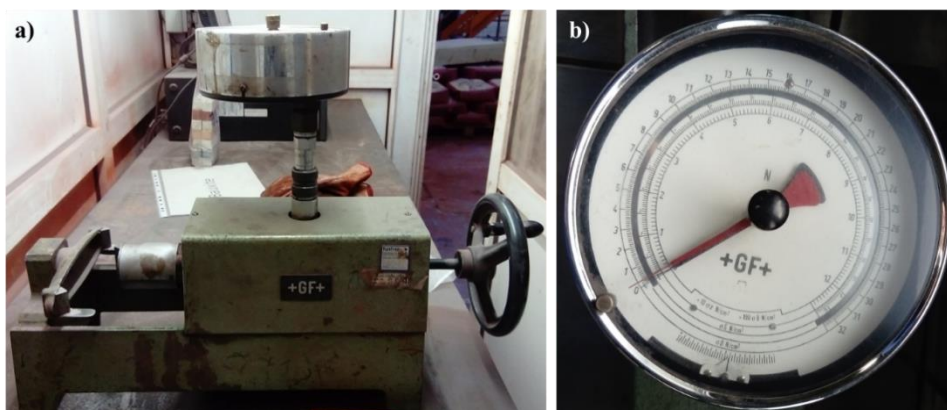


Figura 32 - Sistema utilizado na determinação da resistência à flexão dos provetes. a) Equipamento *Georg Fischer PFG* e b) nanómetro com ponteiro de arrasto.

A duração de vida em bancada foi determinada pela evolução da resistência à flexão de provetes preparados imediatamente após a mistura da areia com a resina, após 30 min, 1h e 2h (norma nº ME0039). Para cada um destes tempos de envelhecimento da mistura da areia com resina antes da produção dos provetes com DMEA, foi medida a resistência à flexão após 3 minutos (imediate) e após 24 horas da obtenção dos provetes, utilizando o procedimento descrito anteriormente.

### 2.2.2. Determinação da permeabilidade

Na determinação da permeabilidade utilizou-se as mesmas misturas de areia e resina que nos ensaios de flexão. Os provetes foram preparados com um molde cilíndrico e um compactador *Georg Fischer PRA* (Figura 33) utilizando 120 g a 130 g da amostra, de forma a obter-se um provete com  $50 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$  de altura. Para tal, introduziu-se a mistura da areia e resina num molde que foi submetido a três ciclo de compactação por movimento de uma massa normalizada ativado por uma manivela.



Figura 33 - Equipamento *Georg Fischer PRA* para compactar o provete para a permeabilidade.

Nos ensaios utilizou-se o permeâmetro *Georg Fischer PDU* (Figura 34a). Este equipamento possui dois orifícios calibrados para medir diferentes gamas de permeabilidade. Inicialmente, selecionou-se a gama de baixa permeabilidade e colocou-se o molde num anel de borracha, da forma a vedar a ligação entre o molde/equipamento. Colocou-se a torneira do aparelho na posição A (aspiração) (Figura 34b) e levantou-se a campânula. Esta posição foi fixada através da seleção da torneira na posição E (Figura 34c). Imediatamente após a seleção da posição B (Figura 34d) da torneira, iniciou-se a medição do tempo que a campânula demora a descer e registou-se o valor de pressão em altura da coluna de água.

O índice de permeabilidade é dado pelo volume de ar em  $\text{cm}^3$  que, sobre uma pressão de 98,06 Pa, atravessa um cubo ou cilindro de  $1 \text{ cm}^2$  de secção e de 1 cm de altura durante um minuto, podendo ser calculado pela expressão:

$$P = \frac{V \times h}{S \times p \times t}, \quad (7)$$

em que  $V$  é o volume de ar que se escoia ( $2000 \text{ cm}^3$ ),  $h$  é a altura do provete (5 cm),  $S$  é a área da secção reta do provete ( $19,63 \text{ cm}^2$ ),  $p$  é a pressão em cm de coluna de água (cm) na

passagem da marca de 1000 cm<sup>3</sup> de ar e t é o tempo de escoamento (min) para 2000 cm<sup>3</sup> de ar.

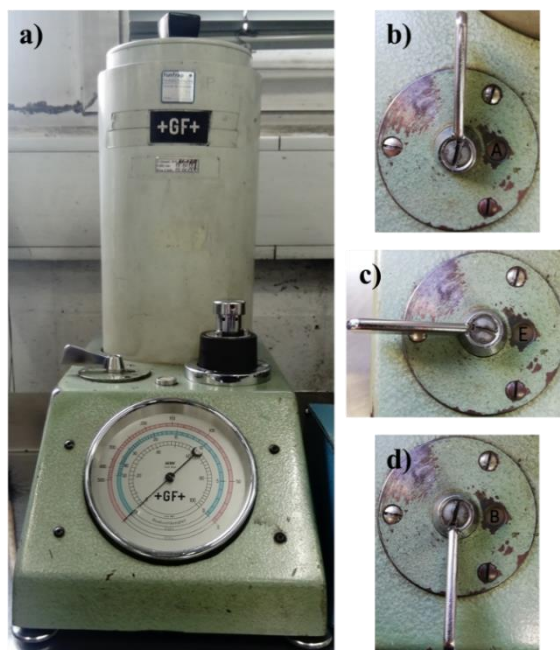


Figura 34 - a) Equipamento *Georg Fischer PDU* usado na medição da permeabilidade. Torneira b) na posição A, c) na posição E e d) na posição B.

### 2.3. Ensaio industriais

Com a formulação seleccionada com areia regenerada foram produzidos os seguintes machos pelo setor de macharia (registos dos ensaios nas Figuras A2 a A5, em anexo):

- retorno de óleo (RO2) do bloco de motor 740 (Figura 35a).
- corpo/cilindro do bloco de motor 275 (Figura 35b);
- camisa/teto do bloco de motor 275 (Figura 35c);

Ambos os blocos de motor testados são fabricados com ferro cinzento lamelar.

O primeiro tipo de macho (machos RO2) foi escolhido para os ensaios industriais porque é o mais difícil de produzir devido à sua forma e dimensões e é o que origina mais defeitos nas peças. Os machos para o corpo/cilindro e para a camisa/teto do bloco de motor 275 foram seleccionados porque são os que consomem, respetivamente, mais areia e mais resina.

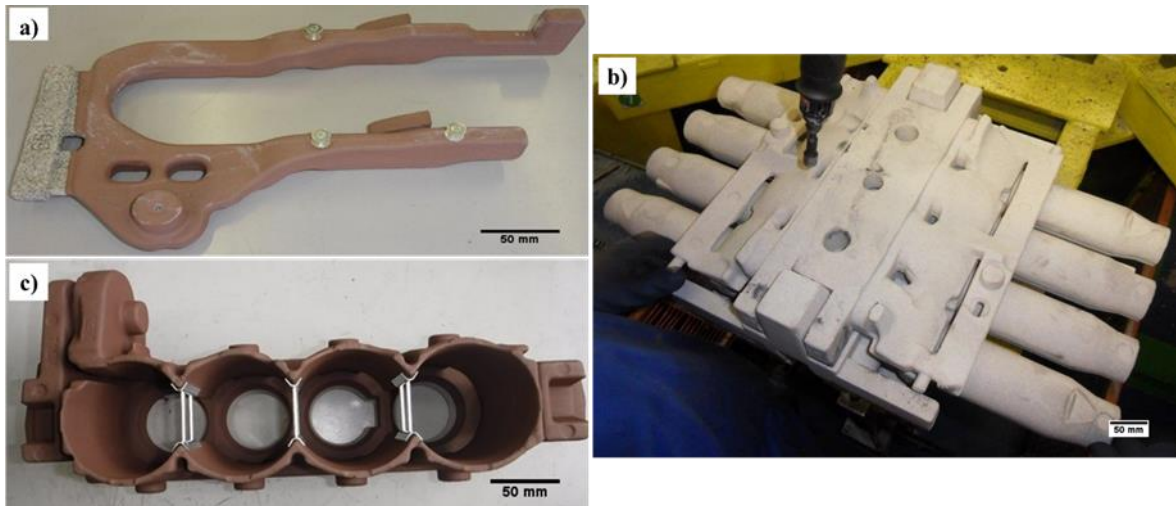


Figura 35 - Exemplo dos machos ensaiados: a) macho RO2; b) macho corpo/cilindro, c) macho camisa/teto. O macho da figura b) é apresentado antes da pintura e com um outro macho não ensaiado.

A areia utilizada na formulação inicial dos machos RO2 era constituída por 50% de areia de sílica e 50% de partículas cerâmicas refratárias. Nos restantes machos, toda a areia utilizada era areia de sílica.

A mistura utilizada na produção destes machos foi pesada e introduzida manualmente no misturador *FORDATH 3* (Figura 36), evitando-se assim a utilização do sistema de alimentação automática e, conseqüentemente, a contaminação da areia de produção utilizada por este sistema.



Figura 36 - Misturador *FORDATH 3*, utilizado nos ensaios industriais.

Para todos os tipos de machos foram realizados ensaios de resistência à flexão, permeabilidade e de dureza em provetes sem pintura. Os testes de resistência à flexão e de permeabilidade foram realizados segundo o procedimento referido em 3.2.1 e 3.2.2, respetivamente. No entanto, nestes ensaios só foram usados provetes da formulação selecionada (100% de areia B2) e a proporção de areia/resina foi a mesma que a utilizada na produção dos machos com a areia I.

Após vazamento e solidificação, as peças obtidas nos ensaios industriais com os machos com areia regenerada foram submetidas a uma análise macroscópica de defeitos. No caso das peças obtidas com os machos RO2, estas análises incluíram ensaios não destrutivos com líquido penetrante, de forma a determinar a existência fissuras exteriores que pudessem comprometer o correto funcionamento da peça. Foram também realizados testes com raios X para confirmar a integridade interna das peças.

### 2.3.1. Determinação da dureza

Para a determinação da dureza dos machos, utilizou-se um durómetro *Georg Fischer GM-578* (Figura 37) e provetes que resultaram dos ensaios da flexão. Este equipamento permitiu medir a profundidade de penetração no macho de uma fresa após movimentação em sentidos opostos repetida 5 vezes.

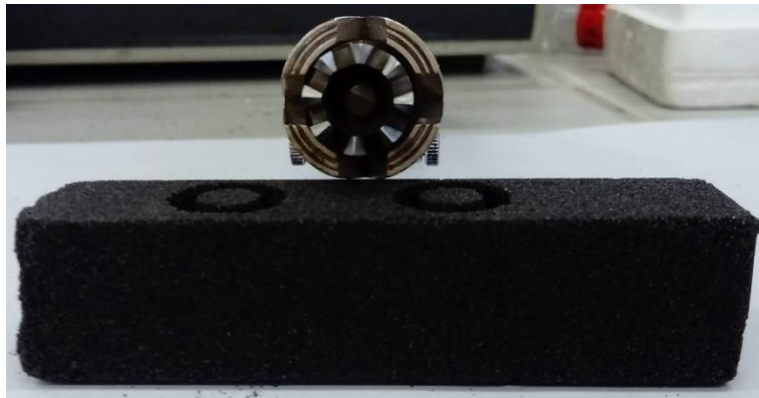


Figura 37 - Durómetro *Georg Fischer GM-578* utilizado no trabalho.

### 2.3.2. Ensaio com líquido penetrante

O ensaio com líquido penetrante é um ensaio não destrutivo que deteta defeitos à superfície das peças, como pequenas perfurações e fissuras. Esta técnica consiste na aplicação de um líquido corante vermelho que, por efeito de capilaridade, penetra nas falhas do material, sendo revelado por um composto na forma de pó fino branco <sup>[41]</sup>. Na Figura 38 é apresentado o resultado de um ensaio realizado numa peça com defeito.



Figura 38 - Ensaio de líquido penetrante na zona do macho RO2.



### **3. Resultados e Discussão**

#### **3.1. Caracterização das areias**

Na Figura 39 é apresentada a distribuição granulométrica das areias I e II juntamente com os valores máximos e mínimos definidos pela Funfrap para a percentagem em peso de areia que deverá ser retida em cada um dos peneiros utilizados nos ensaios, de forma a permitir a produção de machos com as quantidades de resina especificadas e as características desejadas.

No caso da areia I todos os valores encontram-se no intervalo definido, o que confirma a aptidão, ao nível da distribuição granulométrica, desta areia para a produção de machos de fundição.

A granulometria da areia II é semelhante à da areia I, o que é compatível com o facto da primeira ter sido obtida a partir de moldações produzidas inicialmente com areia I. No entanto, apresenta uma quantidade excessiva de partículas mais finas (tamanhos entre 75  $\mu\text{m}$  e 20  $\mu\text{m}$ ) que é justificada pela presença de bentonite, pó de grafite, resina (esta última introduzida com os machos abatidos com as moldações) e, provavelmente, pela fratura de partículas de areia durante a sua utilização no ciclo produtivo.

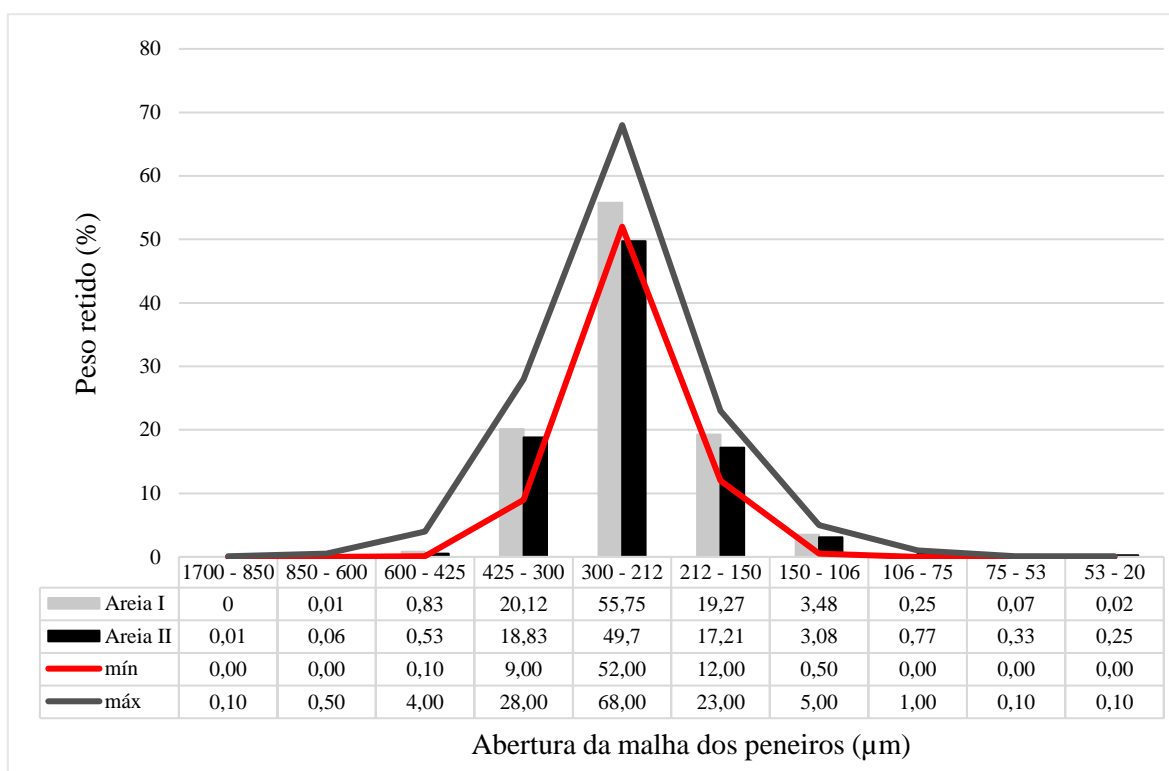


Figura 39 - Distribuição granulométrica das areias I e II. Os resultados das análises são apresentados mais detalhadamente na Tabela A1 do anexo.

No caso das areias regeneradas pelo método A, a distribuição granulométrica (Figura 40a) é caracterizada pela presença de um excesso de partículas com tamanho inferior a 150  $\mu\text{m}$ . Esta diferença é menos acentuada nas areias regeneradas pelo método B (Figura 40b), que apresenta excesso de material com tamanho entre 75  $\mu\text{m}$  e 20  $\mu\text{m}$  na areia B1 e entre 212  $\mu\text{m}$  e 106  $\mu\text{m}$  na areia B2. Estes resultados traduzem-se em valores de índice de finura (Tabela 4) mais elevados para as areias A1 e A2, seguidas pela areia B2 e, com o valor mais próximo da referência (areia I), pela areia B1.

Para tamanhos inferiores a 20  $\mu\text{m}$  (percentagem de finos, na Tabela 4), são também as areias A1 e A2 as que apresentam a maior quantidade de material, seguidas da areia B1 e da areia B2, esta última com um valor muito próximo da referência (areia I). No caso das areias A1 e A2 o valor ultrapassa os 2%, que é o limite superior definido definida pela Funfrap para o fabrico de machos, pelo que a sua utilização implicaria um aumento do consumo de resina e uma redução da permeabilidade dos machos obtidos.

É de referir que a menor percentagem de finos apresentada pelas areias B1 e B2 do que pelas areias A1 e A2 é consistente com o maior número de passagens do material pelo sistema de aspiração de finos durante processo de regeneração pelo método B (4 passagens) do que pelo método A (1 passagem). Por outro lado, a maior quantidade de partículas com tamanho inferior a 212  $\mu\text{m}$  detetado na areia A1 relativamente à areia A2 pode ser justificado pelo maior tempo de ciclo de regeneração da primeira. O elevado valor de percentagem de finos obtido para a areia II é coerente com o excesso de partículas mais finas observado na distribuição granulométrica da Figura 39.

Ainda relativamente à Tabela 4, verifica-se que os valores de superfície específica real das areias regeneradas é tanto maior quanto maior for a percentagem de finos, sendo que também é a areia B2 a que apresenta o valor mais próximo do obtido para a areia I. Relativamente ao coeficiente de angularidade, os valores obtidos indicam que a B2 é também a areia regenerada cujas partículas apresentam uma forma mais próxima da areia I, embora mais arredondadas (menor valor do parâmetro).

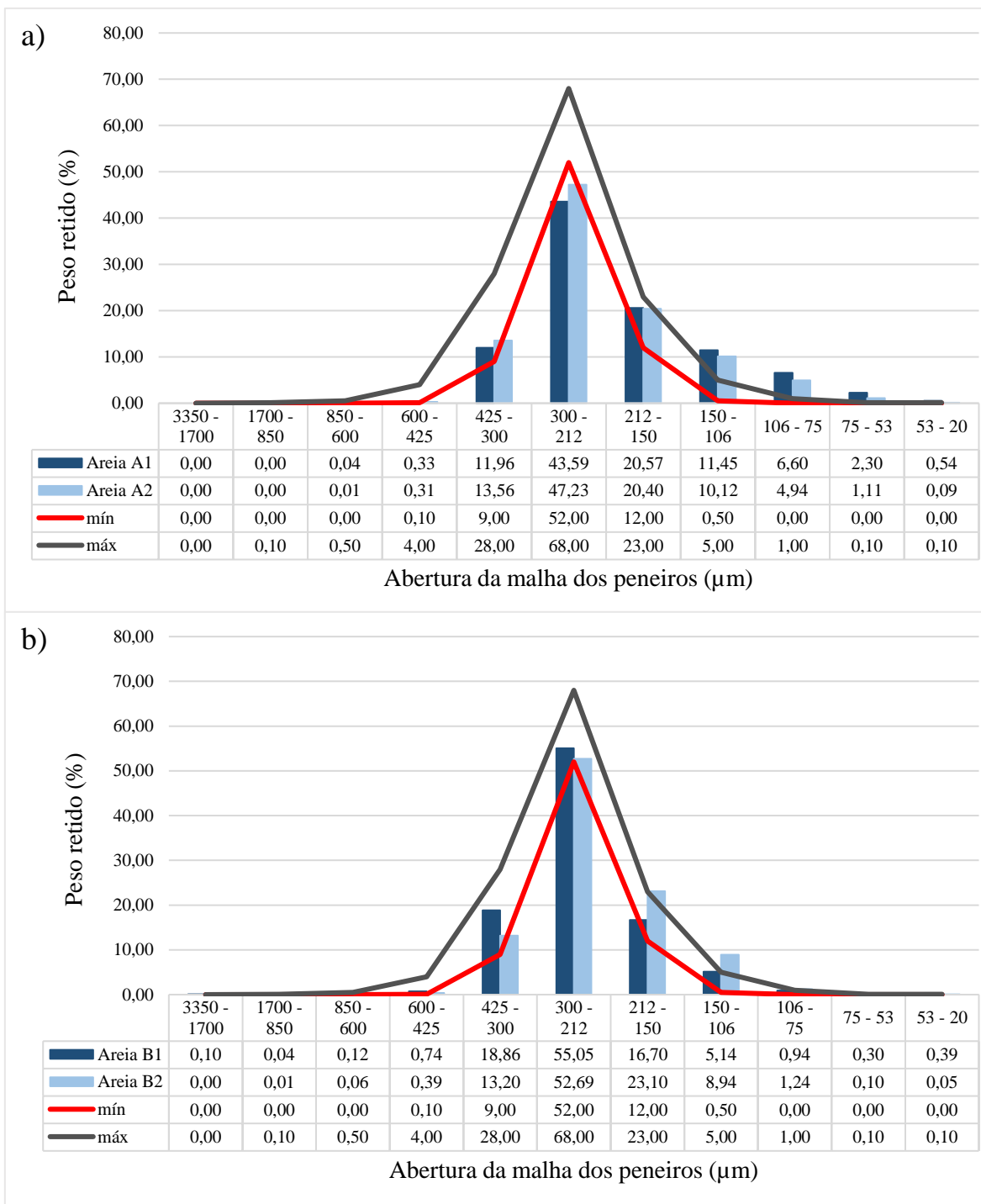


Figura 40 - Distribuição granulométrica das areias regeneradas: a) areias A1 e A2 e b) areias B1 e B2. Os resultados das análises são apresentados mais detalhadamente na Tabela A1 do anexo.

Tabela 4 - Valores de índice de finura, percentagem de finos, superfície específica teórica e real e coeficiente de angularidade das areias estudadas.

Análise	Areia I	Areia II	Areia A1	Areia A2	Areia B1	Areia B2
Índice de finura	53,80	55,27	69,82	64,37	56,15	59,08
Percentagem de finos (%)	0,20	9,23	2,64	2,23	1,62	0,22
Superfície específica teórica (cm <sup>2</sup> /g)	94,40	97,23	130,84	109,02	98,96	106,37
Superfície específica real (cm <sup>2</sup> /g)	118	115	182	148	134	128
Coeficiente de angularidade	1,25	1,18	1,39	1,36	1,35	1,20

Outra característica importante das areias para moldações e machos de fundição é a grau de humidade e o teor e natureza das impurezas que contêm. Elevados valores de humidade dificulta o escoamento da areia, reduz a resistência mecânica dos machos e origina maior quantidade de gases que podem originar defeitos nas peças, sendo 0,20% o valor máximo estabelecido pela Funfrap. Como se pode verificar na Tabela 5, apenas a areia A2 apresenta um teor em humidade superior a este valor limite. Além disso, verifica-se que as areias regeneradas pelo método B (particularmente a areia B2) apresentaram menos humidade do que as regeneradas pelo método A, o que sugere que o processo B promove uma secagem mais eficiente do material. No entanto, dado que este parâmetro depende das condições e período de armazenamento do material (que foi diferente para as várias areias), esta conclusão requer confirmação através de ensaios medição da humidade das diferentes areias imediatamente após a sua receção na fábrica ou após armazenagem em condições semelhantes.

Relativamente ao grau de pureza após regeneração, os menores teores em argila ativa, de carbono e de material volátil e de perda ao fogo obtidos para as areias regeneradas pelo método B demonstram que este processo é o mais eficiente na limpeza das areias de moldação. Novamente, é a areia B2 que apresenta o menor teor em impurezas, traduzido por valores dos parâmetros referidos mais próximos dos da areia I. As areias regeneradas pelo processo A são as que apresentam valores mais distantes da areia I. Os valores mais elevados destes parâmetros foram registados para a areia II, o que é consistente com o facto desta areia já ter sido utilizada no processo para produzir moldações e machos e não ter sido regenerada.

O grau de pureza das areias regeneradas é também refletido nos valores de ADV obtidos. Com efeito, o menor valor de ADV foi registado para a areia B2, seguida pela areia B1, e só depois pelas areias regeneradas pelo método A. No entanto, apesar do valor de B2 ser o mais próximo do da areia I, ainda é relativamente elevado (o que traduz um maior teor em impurezas que reagem com o ácido).

Relativamente ao pH, todas as areias regeneradas e a areia II são básicas com valores próximos de 10, tal como a areia II. Pelo contrário, a areia I apresenta um valor próximo do recomendado (pH = 7) para o processo fenólico uretano.

Tabela 5 - Valores de percentagem de humidade, de argila ativa, de carbono e matérias voláteis, perda ao fogo, pH e ADV das areias estudadas.

<b>Análise</b>	<b>Areia I</b>	<b>Areia II</b>	<b>Areia A1</b>	<b>Areia A2</b>	<b>Areia B1</b>	<b>Areia B2</b>
Humidade (%)	0,01	0,16	0,17	0,24	0,10	0,04
Argila ativa (%)	-	4,46	1,20	1,40	0,60	0,40
Carbono (%)	-	2,22	0,53	0,58	0,24	0,16
Material volátil (%)	0,05	1,24	0,63	0,74	0,51	0,15
Perdas ao fogo (%)	0,18	2,89	1,00	1,01	0,31	0,25
pH	7,2	9,8	10,1	10,0	10,3	10,2
ADV (ml)	0,2	-	20,00	26,60	10,30	7,30

### 3.2. Caracterização dos provetes de macho

Na Figura 41 são apresentados os valores do índice de permeabilidade de provetes de machos produzidos com 100% de areia I (que serve de referência) e com misturas contendo diferentes proporções de areia I e de areia regenerada. Como se pode verificar, para teores até 20% de areia regenerada todas as formulações apresentaram permeabilidades relativamente próximas do valor obtido para os provetes produzidos com 100% de areia I. No entanto, para teores superiores verifica-se uma diminuição acentuada da permeabilidade dos provetes como aumento da percentagem de areia regenerada A1 e A2. Pelo contrário, as formulações com as areias regeneradas pelo método B mantêm o índice de permeabilidade bastante estável e semelhante ao valor de referência. Estas diferenças são consistentes com

maior semelhança ao nível da granulometria entre as areias regeneradas pelo método B e a areia I do que as regeneradas pelo método A. Com efeito, o decréscimo acentuado da permeabilidade com a percentagem de areia regenerada A1 e A2 está de acordo com os maiores valores do índice de finura e da percentagem de finos que, ao promoverem um maior empacotamento das partículas, dificultam a passagem dos gases.

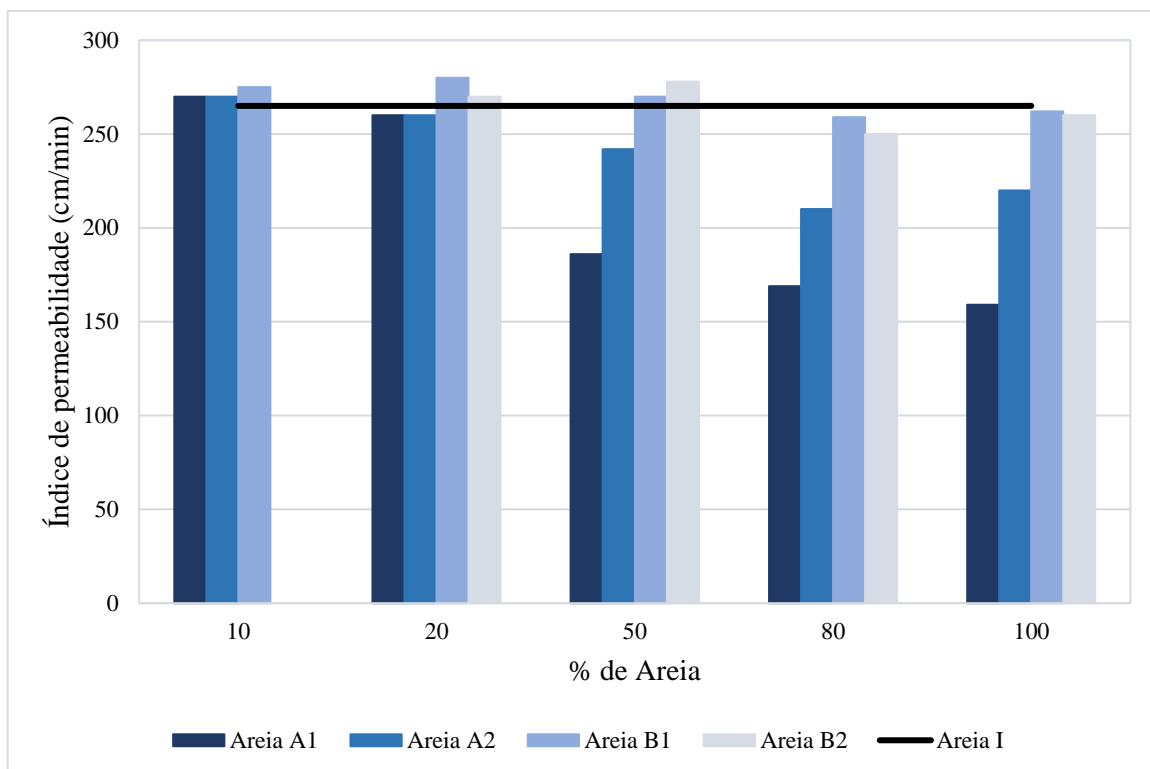


Figura 41 - Índice de permeabilidade dos provetes de macho produzidos com as diferentes formulações estudadas.

Outra característica medida nos provetes de macho foi a resistência à flexão imediatamente e após 24 horas da obtenção dos mesmos. De forma a avaliar a duração da vida em bancada, estes ensaios foram realizados utilizando misturas de areia e resina após diferentes tempos de envelhecimento. Os resultados obtidos para as diferentes formulações são apresentados nas Figura 42 a Figura 46.

No caso dos provetes de macho preparados com 100% de areia I (Figura 42) verifica-se um aumento da resistência à flexão nas primeiras 24 horas após a sua obtenção, para todos os tempos de envelhecimento da mistura estudados. Este efeito é o resultado da continuação

das reações de polimerização da resina após a exposição da mistura ao agente catalisador (DMEA). Verifica-se também uma diminuição da resistência à flexão dos provetes com o tempo de envelhecimento da mistura, mais significativa quando os provetes são testados após 24 horas da sua obtenção. Esta degradação determina o tempo de vida em bancada e é o resultado de fenômenos como a reação da resina com a humidade e a reação lenta entre os componentes da resina antes da exposição ao catalisador.

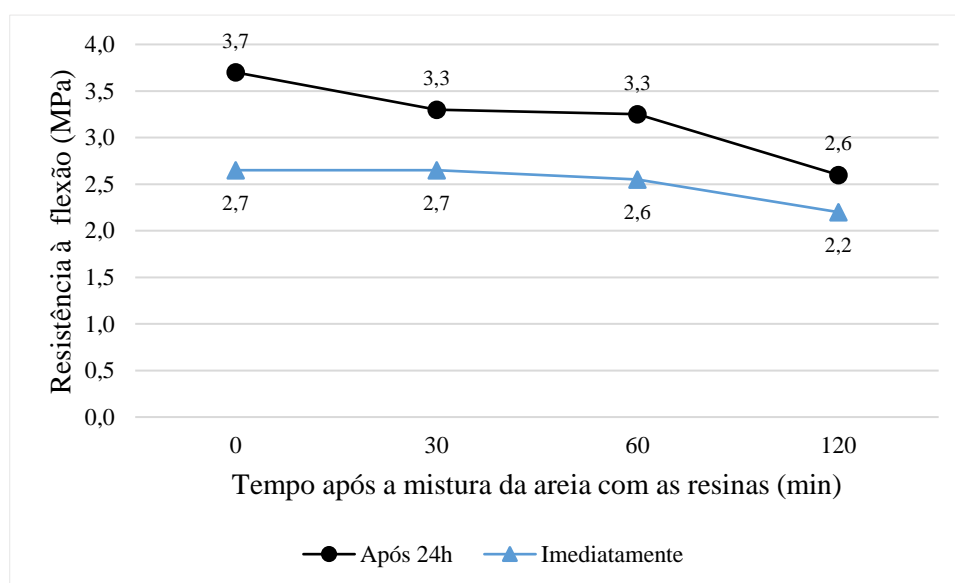


Figura 42 - Resistência à flexão imediatamente e após 24h dos provetes de macho com 100% de areia I.

Estas alterações na resistência mecânica dos provetes de machos com o tempo foram também observadas nos provetes produzidos com areias regeneradas (Figura 43 a Figura 46). Com efeito, para todas as formulações estudadas, verifica-se um aumento da resistência mecânica dos provetes após 24 horas relativamente aos ensaiados imediatamente após a sua preparação e observa-se uma degradação da resistência mecânica dos provetes com o tempo de envelhecimento da mistura de areia e resina.

Os dados obtidos revelam também uma tendência para os provetes que contêm areia regenerada (linhas a cheio) apresentarem valores de resistência mecânica inferiores aos dos produzidos com 100% de areia I (linhas a tracejado), sendo esta diferença tanto maior quanto maior for a fração de areia regenerada utilizada na sua produção.



No entanto, das areias regeneradas, é a adição da areia B2 (mesmo em elevados teores) que tem a menor influência na resistência à flexão dos provetes. Para esta areia, os melhores valores de resistência à flexão são obtidos para um teor de 20% e para uma substituição integral da areia I por areia B2 obteve-se um valor mínimo superior a 1,5 MPa (medido após 120 min de envelhecimento). Para todas as formulações com as outras areias regeneradas testadas nas mesmas condições, este valor mínimo só é ultrapassado quando a quantidade de areia regenerada é mínima (10%). É de salientar que esta menor influência da adição de areia B2 na resistência mecânica dos provetes é coerente com os resultados dos testes de caracterização das areias que mostraram que esta era a areia regenerada que apresentava as características mais próximas das da areia I.

Tendo em consideração estes resultados e porque as vantagens económicas e de impacto ambiental da substituição da areia virgem por areia regenerada é tanto maior quanto maior foi a fração substituída, foi seleccionada a formulação com 100% de areia B2 para realizar os ensaios industriais.

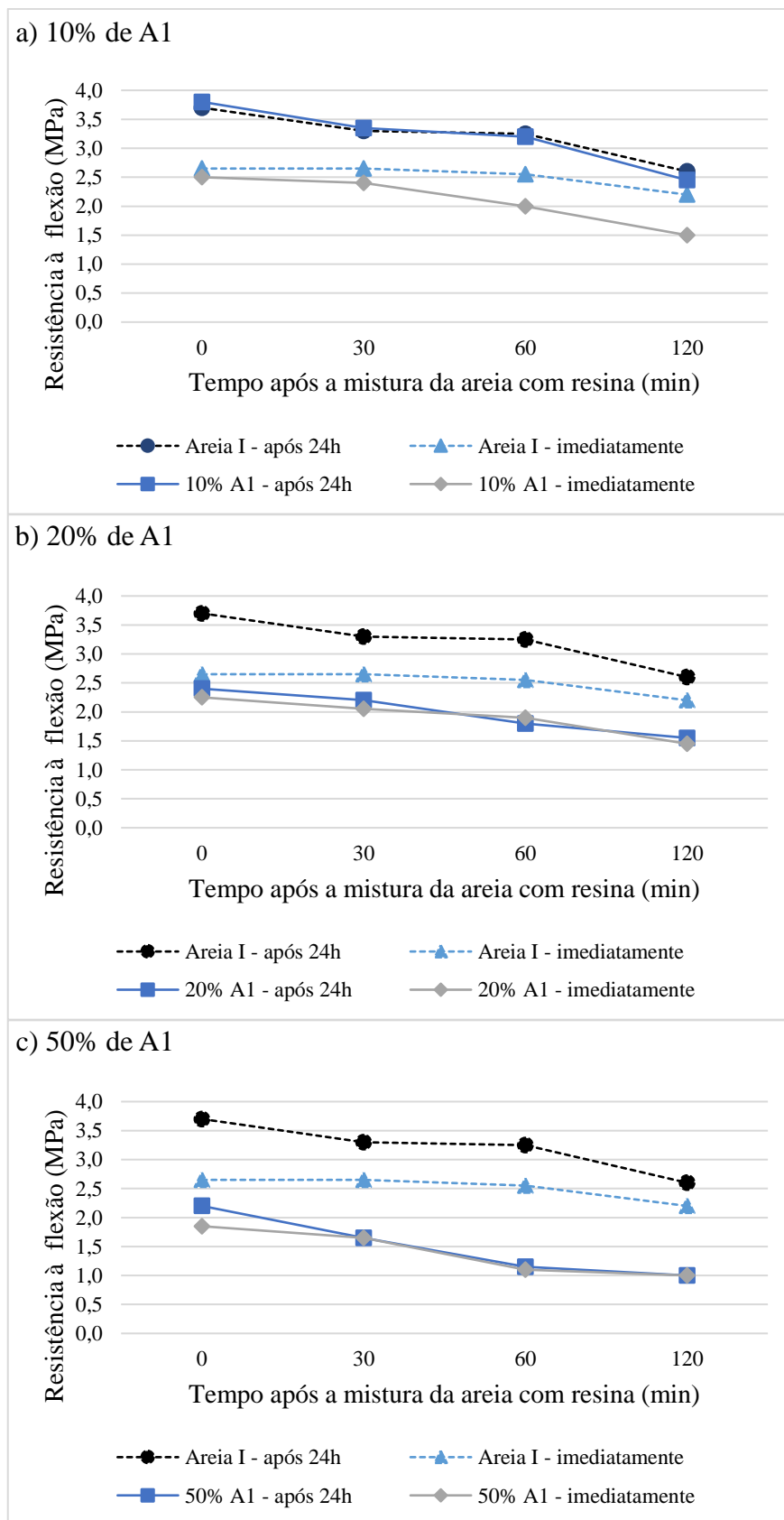


Figura 43 - Resistência à flexão imediatamente e após 24h dos provetes de macho produzidos com areia I e com a) 10%, b) 20%, c) 50%, d) 80% e e) 100% de areia regenerada A1 (cont.).

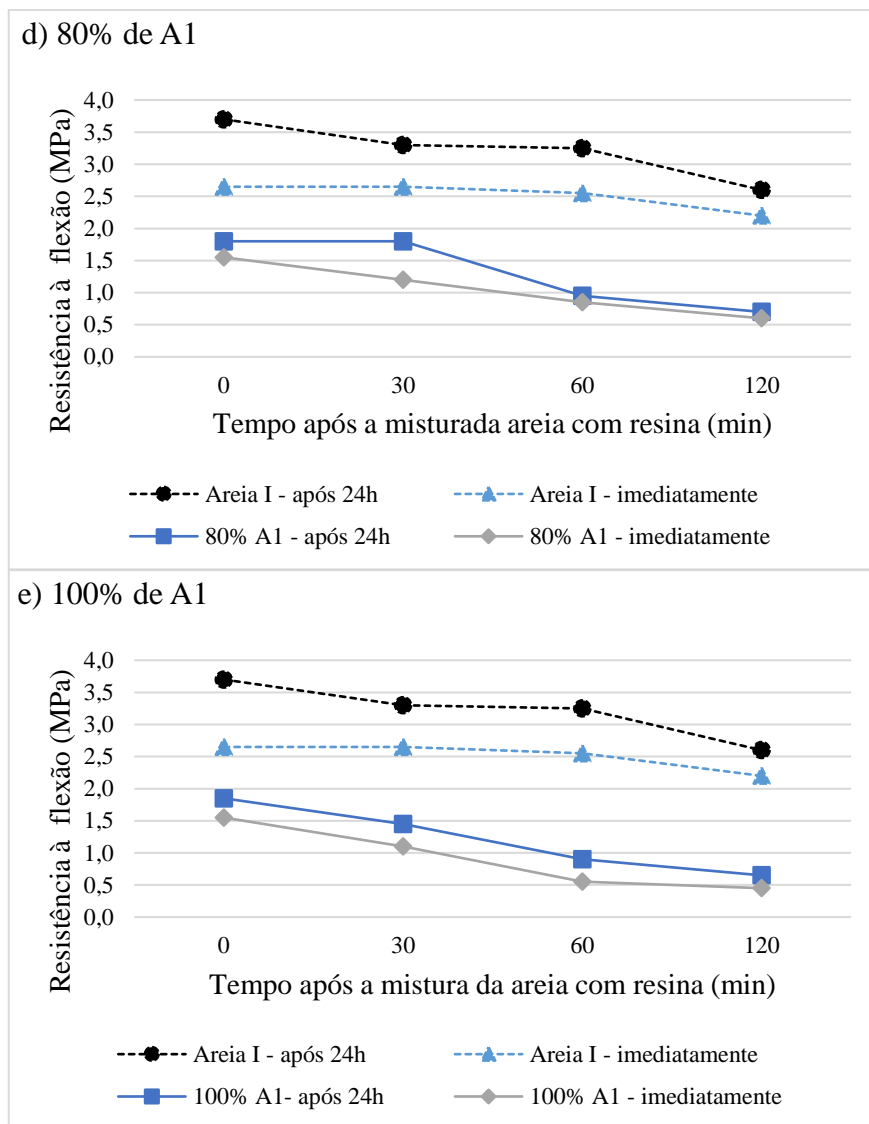


Figura 43 (cont.) - Resistência à flexão imediatamente e após 24h dos provetes de macho produzidos com areia I e com a) 10%, b) 20%, c) 50%, d) 80% e e) 100% de areia regenerada A1.

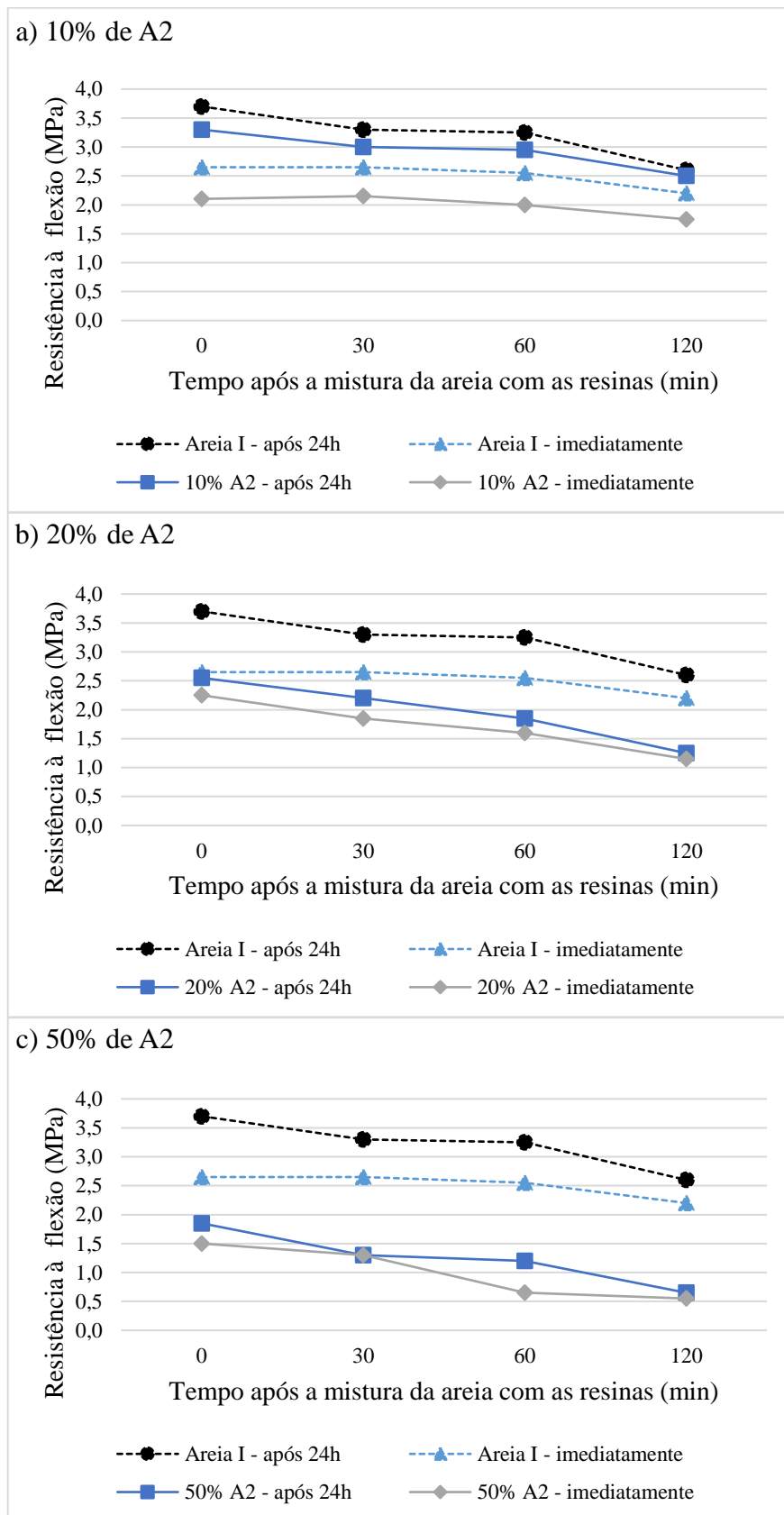


Figura 44 - Resistência à flexão imediatamente e após 24h dos provetes de macho produzidos com areia I e com a) 10%, b) 20%, c) 50%, d) 80% e e) 100% de areia regenerada A2 (cont.).

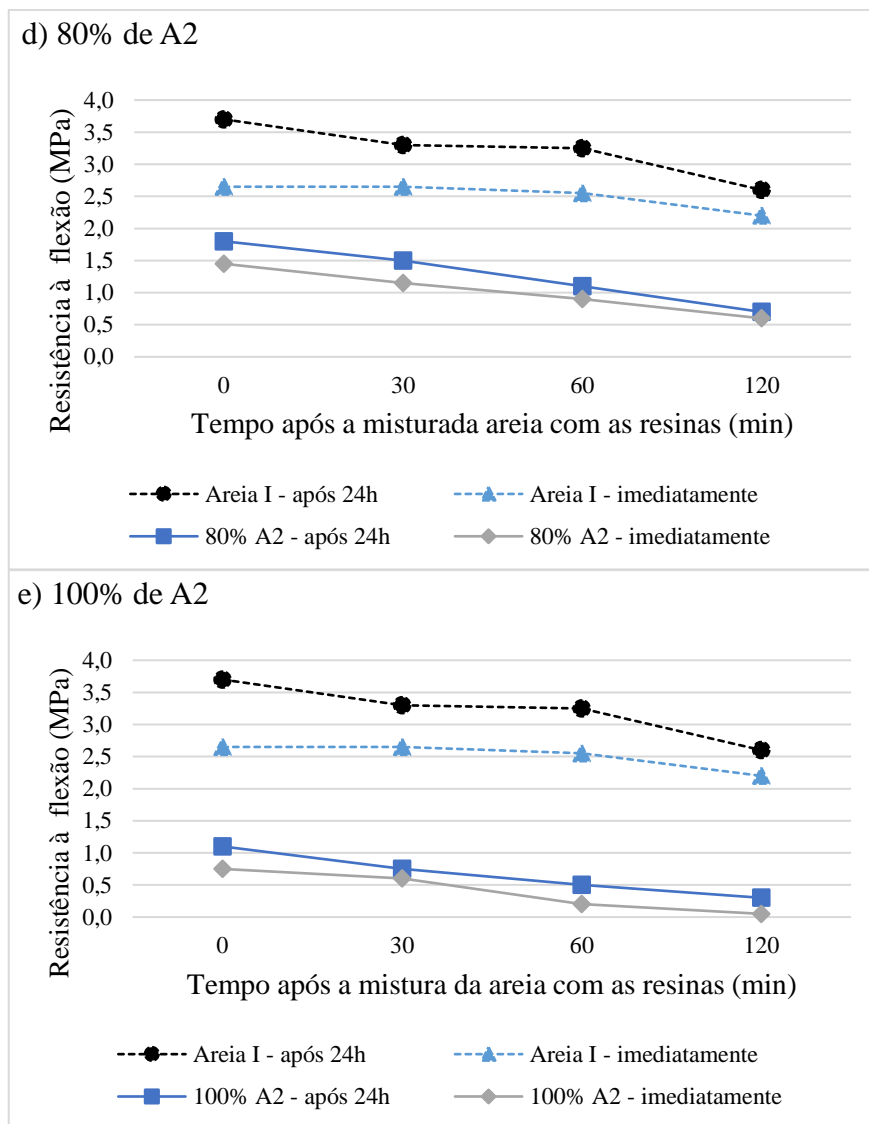


Figura 44 (cont.) - Resistência à flexão imediatamente e após 24h dos provetes de macho produzidos com areia I e com a) 10%, b) 20%, c) 50%, d) 80% e e) 100% de areia regenerada A2.

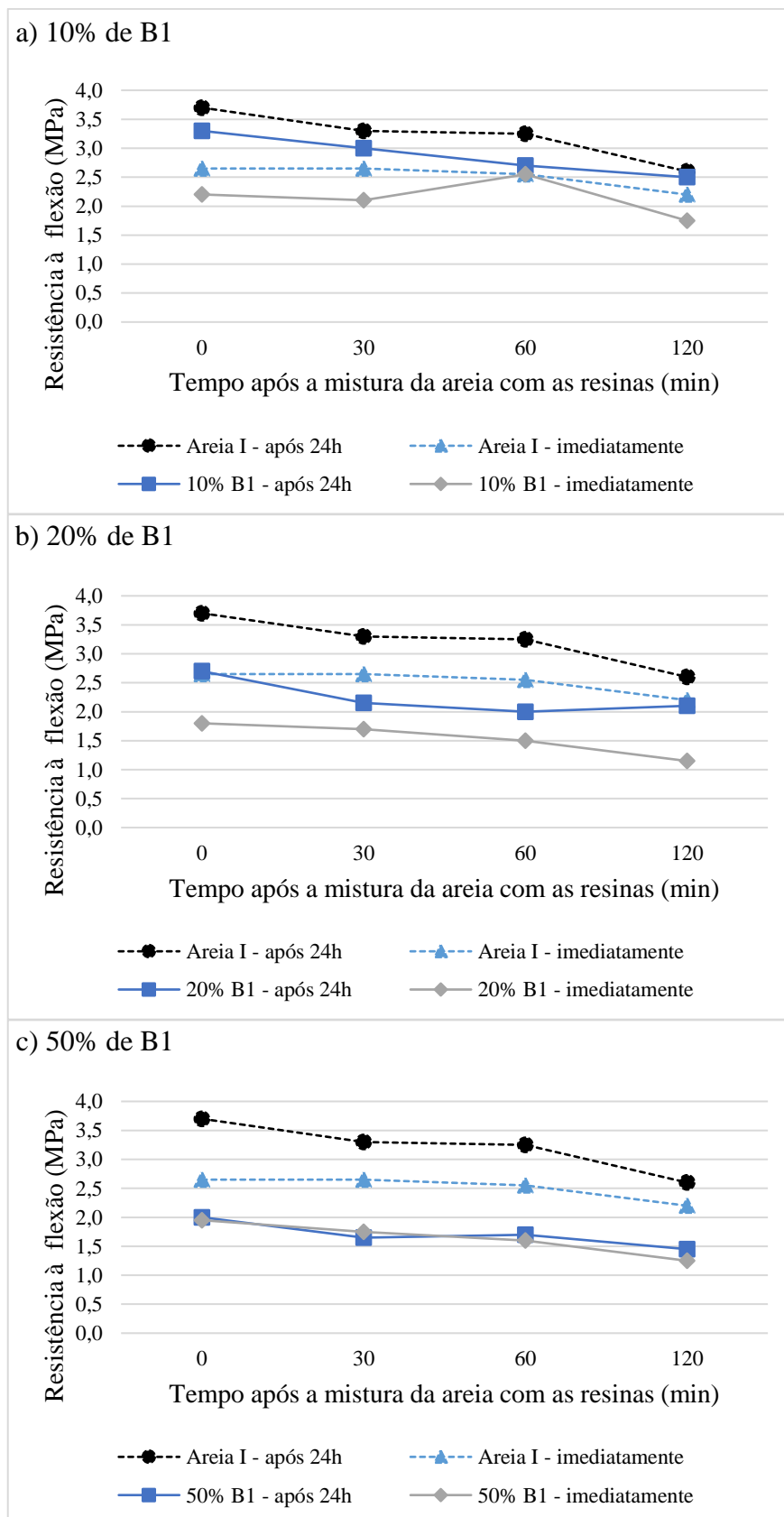


Figura 45 - Resistência à flexão imediatamente e após 24h dos provetes de macho produzidos com areia I e com a) 10%, b) 20%, c) 50%, d) 80% e e) 100% de areia regenerada B1 (cont.).

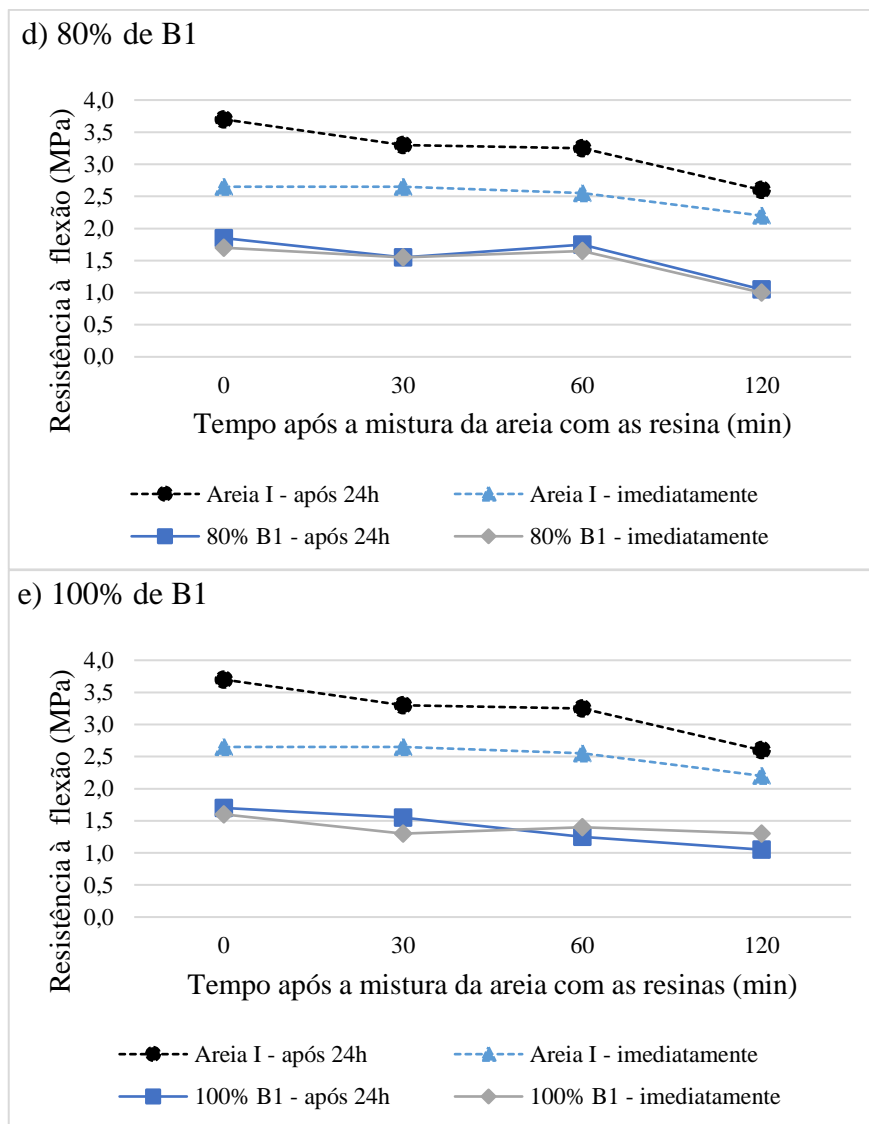


Figura 45 (cont.) - Resistência à flexão imediatamente e após 24h dos provetes de macho produzidos com areia I e com a) 10%, b) 20%, c) 50%, d) 80% e e) 100% de areia regenerada B1.

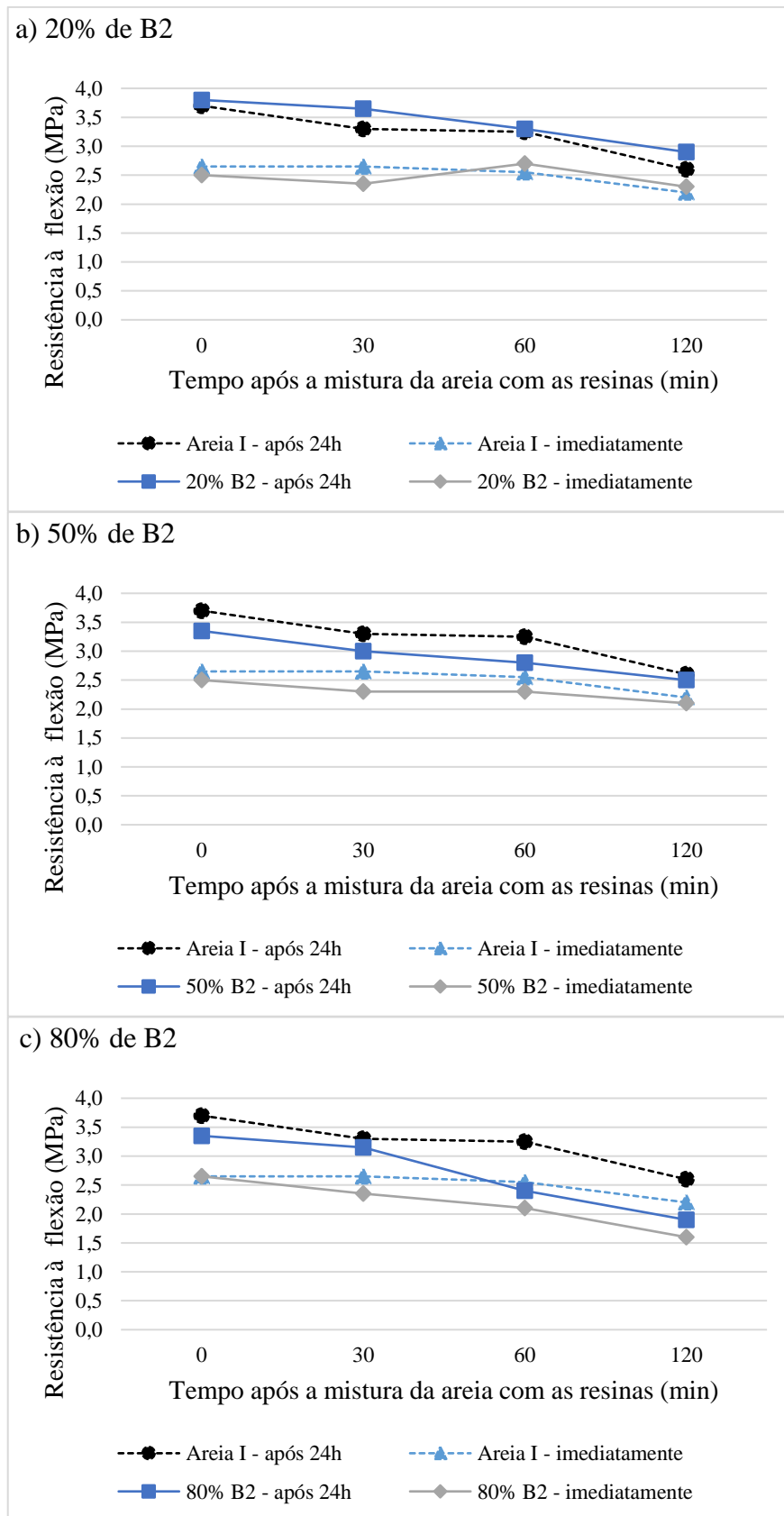


Figura 46 - Resistência à flexão imediatamente e após 24h dos provetes de macho produzidos com areia I e com a) 20%, b) 50%, c) 80% e d) 100% de areia regenerada B2 (cont.).



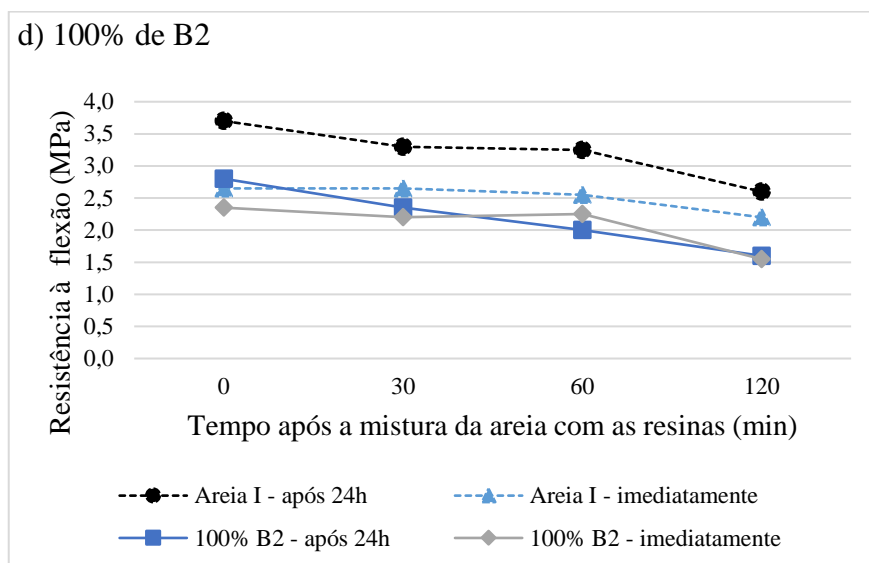


Figura 46 (cont.) - Resistência à flexão imediatamente e após 24h dos provetes de macho produzidos com areia I e com a) 20%, b)50%, c) 80% e d) 100% de areia regenerada B2.

### 3.3. Ensaio industriais com a formulação selecionada

Para os ensaios industriais foram preparados machos em que a areia I utilizada na formulação inicial foi integralmente substituída por areia regenerada B2. Para contrariar a redução da resistência mecânica esperada, tendo em conta os resultados do ponto anterior, decidiu-se utilizar uma quantidade de resina 10% superior à usada na formulação inicial (sem areia regenerada). O efeito destas alterações foi caracterizado através de testes de resistência mecânica, dureza e permeabilidade e análise de defeitos nos machos e nas peças produzidas.

#### 3.3.1. Machos para retorno de óleo do bloco de motor 740

Na Tabela 6 são apresentados os resultados dos testes realizados aos provetes de macho utilizados para produzir o retorno de óleo do bloco de motor 740 (machos RO2). Estes valores mostram que os machos produzidos com a nova formulação apresentam menor resistência à flexão e dureza do que os produzidos com a formulação inicial, o que é indicativo que o aumento da quantidade de resina (10%) foi insuficiente para compensar a redução da resistência mecânica devido à utilização de areia regenerada em vez de areia

virgem. No entanto, ao contrário do que era esperado tendo em conta os valores do índice de permeabilidade apresentados no ponto 3.2 e a maior quantidade de resina utilizada, a permeabilidade da nova formulação é superior à da formulação inicial. Na base desta variação deverá estar a utilização de diferentes lotes de partículas refratárias com índices de finura diferentes (valores de 60 e 55 para, respetivamente, os testes de resistência mecânica e de permeabilidade).

Tabela 6 - Resistência à flexão, permeabilidade, dureza e massa dos provetes de machos para o retorno de óleo do bloco de motor 740 produzidos com a formulação inicial e a nova formulação.

Propriedade	Formulação inicial	Nova formulação
Resistência à Flexão (MPa)	30	22
Dureza (mm)	2,6	2,9
Índice de permeabilidade (cm/min)	190	220
Massa (kg)	0,4687	0,4644

Para os ensaios de vazamento foram produzidos 431 machos, mas 361 não passaram os testes de qualidade. Esta elevada taxa de rejeição reflete a dificuldade de produção destes machos devido à sua forma e dimensões, acentuada pela menor resistência mecânica resultante da substituição da areia virgem por areia regenerada.



Figura 47 - Macho RO2 produzido com a nova formulação.

Dos machos sem defeitos, foram usados 20 em 10 moldações para produzir 20 blocos de motor 740 (Figura 48). Do total de peças vazadas, 11 não passaram nos testes de qualidade e foram rejeitadas. Em todas estas peças foram detetadas fissuras no teste com líquido penetrante, em 11 era visível o suporte dos machos (Figura 49a), que têm a função de definir a espessura da parede da peça na zona do macho e que deveriam ser completamente cobertas pelo metal, em 3 peças foi detetada a presença de bolhas (Figura 49b) e em 17 apresentavam defeito de sinterização e/ou penetração de metal em fissuras do macho, que podem ser removidos no Setor dos acabamentos (Figura 49c).

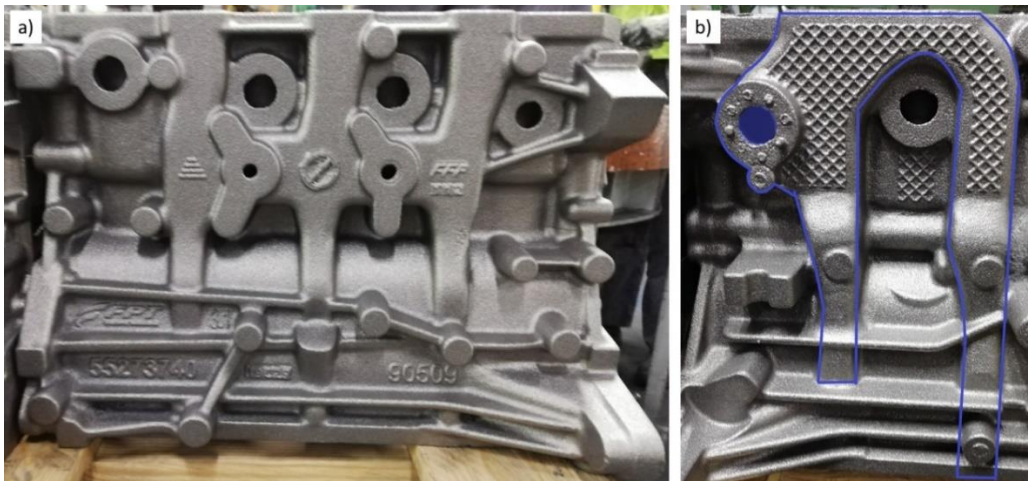


Figura 48 - a) Bloco de motor 740 e b) zona do macho RO2 (delineada a azul).

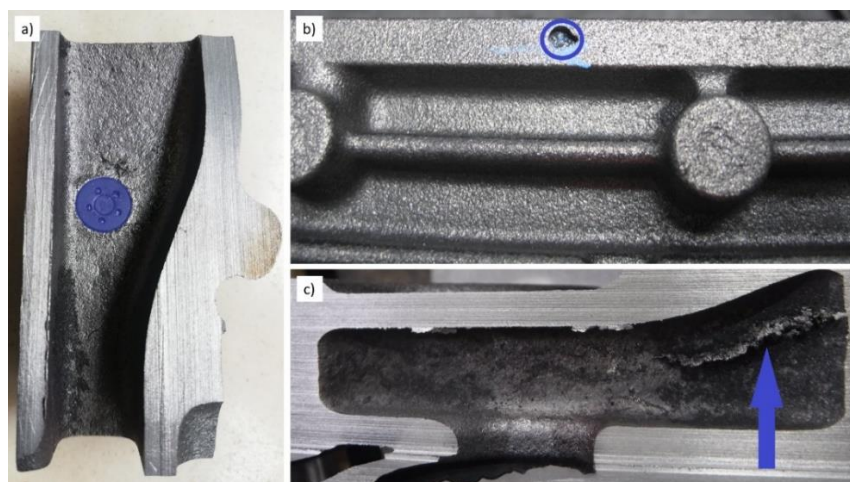


Figura 49 - Defeitos dos blocos de motor 740: a) suporte do macho visível no interior da cavidade, b) bolha e c) penetração de metal em fissura do macho.

### 3.3.2. Machos corpo/cilindro e camisa/teto para o bloco de motor 275

Os resultados dos ensaios realizados aos provetes de macho corpo/cilindro e de macho camisa/teto para o bloco de motor 275 são apresentados na Tabela 7 e na Tabela 8, respetivamente. Para ambos os casos, observa-se também uma diminuição da resistência à flexão e da dureza, embora menos acentuada do que nos machos RO2. Nestes casos, a permeabilidade diminuiu, como era esperado tendo em conta o maior índice de finura da areia B2 e a maior quantidade de resina utilizada na produção dos machos.

Tabela 7 - Resistência à flexão, permeabilidade, dureza e massa dos provetes de machos corpo/cilindro de bloco de motor 275 produzidos com a formulação inicial e a nova formulação.

<b>Propriedade</b>	<b>Formulação inicial</b>	<b>Nova formulação</b>
Resistência à Flexão (MPa)	18	16
Dureza (mm)	3,7	3,8
Índice de permeabilidade (cm/min)	270	225
Massa (kg)	17,675	18,025

Tabela 8 - Resistência à flexão, permeabilidade, dureza e massa dos provetes de machos camisa/teto de bloco de motor 275 produzidos com a formulação inicial e a nova formulação.

<b>Propriedade</b>	<b>Formulação inicial</b>	<b>Nova formulação</b>
Resistência à Flexão (MPa)	24	20
Dureza (mm)	2,0	3,6
Índice de permeabilidade (cm/min)	300	255
Massa (kg)	3,6819	3,640

Para os ensaios de vazamento foram produzidos 28 machos corpo/cilindro e 34 machos camisa/teto (Figura 50 e Figura 51), tendo-se obtido uma percentagem de rejeição de, 42% e 30%, respetivamente. A principal causa das rejeições foi a contaminação dos machos com mistura de areia e resina da formulação inicial (visível na parte superior da Figura 50), resultante de uma limpeza deficiente da tremonha utilizada no trabalho.



Figura 50 - Macho corpo/cilindro do bloco de motor 275 produzido com a nova formulação.



Figura 51 - Macho camisa/teto do bloco de motor 275 produzido com a nova formulação.

No vazamento das peças foram utilizados 12 machos corpo/cilindro e 24 machos camisa/teto para produzir 24 blocos de motor 275, dos quais 2 não passaram nos testes de controlo de qualidade porque um bloco apresentava descontinuidade na zona de um cilindro (Figura 52) e outro apresentava uma inclusão de escória. Também detetou-se a quebra e/ou fissuração de 8 machos por deficiente manipulação pelo falso-molde, por causa de um

problema mecânico no equipamento. A fissuração do macho origina geralmente penetração de metal e/ou inclusões de areia (Figura 53 b, c e d).

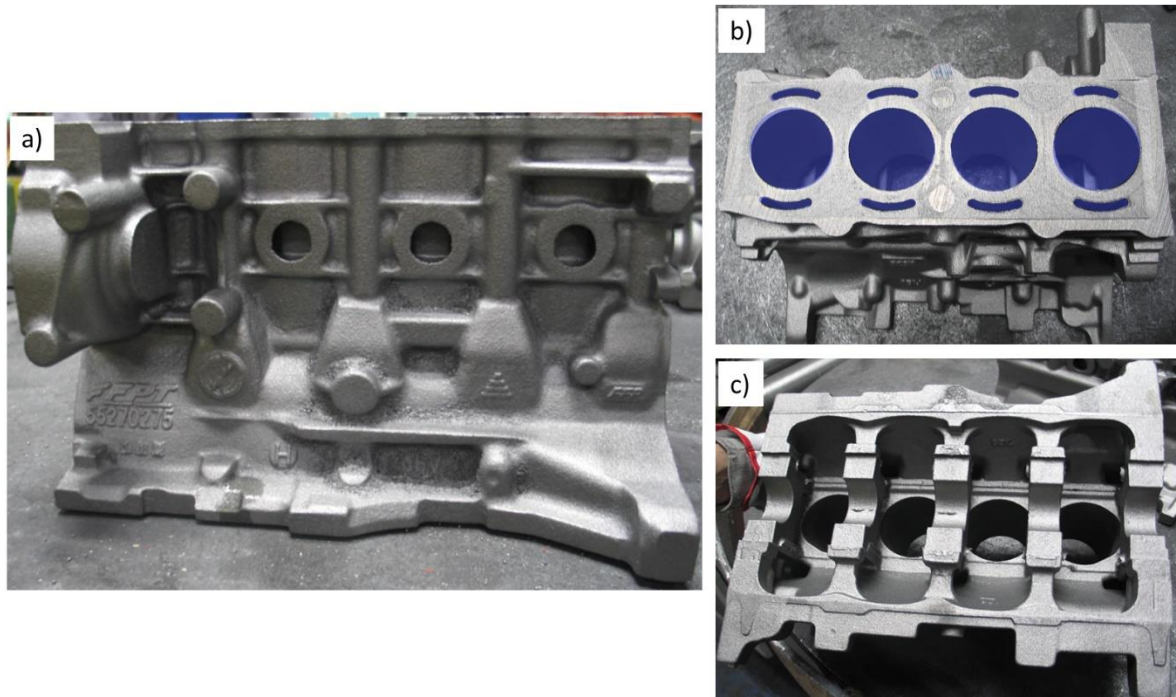


Figura 52 - a) Bloco de motor 275 produzido com os machos obtidos com a nova formulação; b) parte superior; c) parte inferior. As cavidades definidas pelos machos corpo/cilindro e camisas/teto estão indicadas em azul na imagem b).

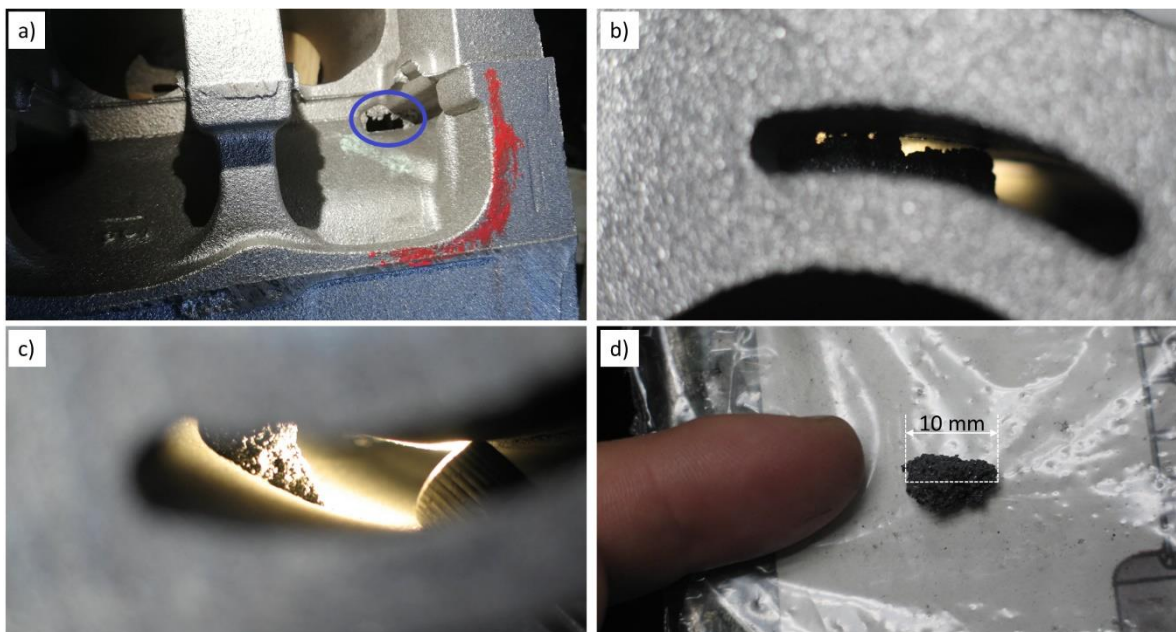


Figura 53 - Defeitos em blocos de motor 275: a) devido a macho partido; b), c) e d) inclusão de areia.

Dado que estes resultados, apesar de positivos, foram obtidos com machos produzidos com areia B2 contaminada com areia I, foi realizado um segundo conjunto de ensaios industriais com os machos corpo/cilindro e camisa/teto utilizando uma maior quantidade de areia, de forma a minimizar os problemas de contaminação. Seguindo as normas internas da Funfrap, foram também realizados novos ensaios de caracterização a provetes de macho produzidos com o novo lote da mistura de areia e resina (Tabela 9 e Tabela 10) que confirmaram globalmente os resultados obtidos no primeiro conjunto de ensaios. No entanto, a percentagem de machos rejeitados diminuiu significativamente (1 em 55 machos corpo/cilindro e 3 em 27 machos camisa/teto), o que reflete a maior homogeneidade dos novos machos.

Tabela 9 - Resistência à flexão, permeabilidade e dureza dos provetes de machos corpo/cilindro de bloco de motor 275 produzidos com a formulação inicial e a nova formulação no segundo conjunto de ensaios.

<b>Propriedade</b>	<b>Formulação inicial</b>	<b>Nova formulação</b>
Resistência à Flexão (MPa)	18	14
Dureza (mm)	3,7	4,3
Índice de permeabilidade (cm/min)	270	225

Tabela 10 - Resistência à flexão, permeabilidade e dureza dos provetes de machos camisa/teto de bloco de motor 275 produzidos com a formulação inicial e a nova formulação no segundo conjunto de ensaios.

<b>Propriedade</b>	<b>Formulação inicial</b>	<b>Nova formulação</b>
Resistência à Flexão (MPa)	24	19
Dureza (mm)	2,0	3,5
Índice de permeabilidade (cm/min)	300	255

No caso dos machos corpo/cilindro foram utilizados 54 machos em 27 moldações para produzir 108 blocos de motor, dos quais cerca de 16,7% não passaram nos testes de qualidade. Mais especificamente, cerca de 9,3% das rejeições tinham origem em fraturas dos machos devido ao problema mecânico já referido no falso-molde (Figura 54a), 2,8% em inclusões de areia, 2,8% em quebra/fissura da peça (Figura 54b), 0,9% em arrancamentos e 0,9% em bolhas.

Nesta segunda série de ensaios foram utilizados 24 machos camisa/teto em 6 moldações para produzir 24 blocos de motor, tendo todos passado nos testes de qualidade.

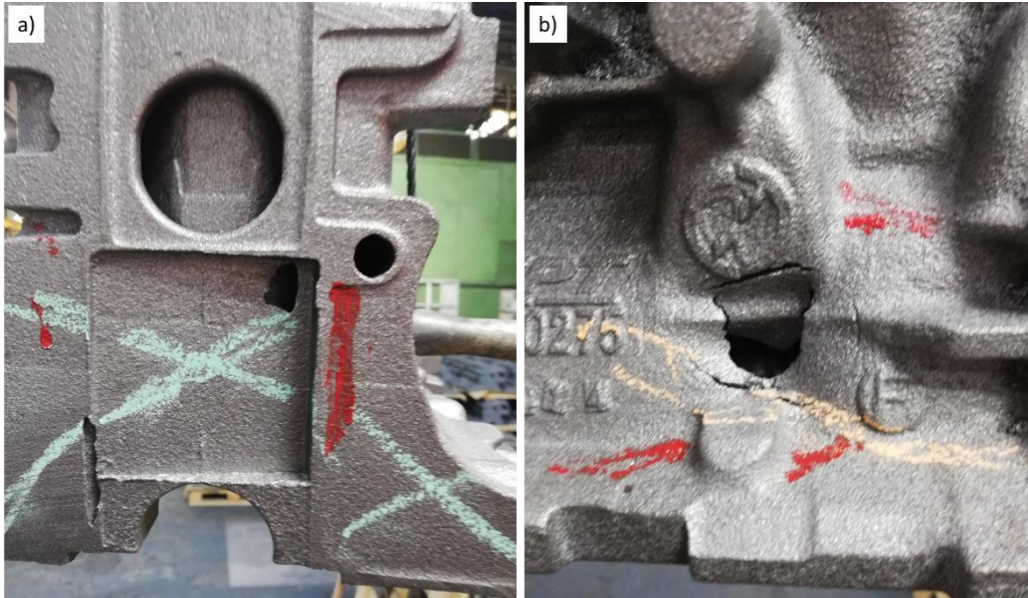


Figura 54 - Defeitos nas peças produzidas: a) defeito devido a macho partido e b) quebra a quente.

#### 3.4. Análise de custos

Na Tabela 11 é apresentada uma análise das vantagens económicas da substituição integral da areia I por areia regenerada B2. Os valores são relativos a um mês, considerando-se 20 dias úteis, e nos cálculos não foi contabilizado o investimento no equipamento de regeneração, sua manutenção e custos com o consumo energético associado.

Como poupança foi contabilizada a redução dos custos com o consumo de areia I (100 toneladas/dia) e com a sua deposição em aterro. Como despesas adicionais foram considerados os custos com a deposição em aterro dos finos gerados pelo processo de regeneração (30% do material submetido a regeneração) e com a aumento do consumo de resina (10%). De referir que na análise foi considerada a deposição em aterros diferentes (com custos diferentes) da areia de moldação e dos finos resultantes do processo de regeneração porque estes materiais apresentam classificações de resíduos diferente segundo o decreto-lei 183/2009.



O balanço entre a poupança e o aumento da despesa associada à substituição integral de areia I por areia regenerada B2 na produção de machos de fundição é bastante positiva, que se traduz numa poupança de 44 000 € mensais.

Tabela 11 - Análise de custos da utilização da formulação selecionada (100% de areia regenerada B2) em substituição da formulação inicial (100% de areia I). Valores mensais em euros.

<b>Poupanças</b>	Redução na aquisição de areia virgem	- 55 000
	Redução da deposição em aterro	- 17 000
<b>Despesas</b>	Deposição de finos em aterro	+ 18 000
	Aumento do consumo de resina	+ 10 000
<b>Balanço</b>		- 44 000

### 3.5. Análise complementar da areia regenerada selecionada

Juntamente com a areia B2, foram fornecidas amostras da areia e de material recolhido pelo sistema de despoeiramento após cada uma das 4 passagens pelo processo de regeneração. Estas amostras foram utilizadas para estudar a alteração das características da areia em cada passagem, cujas alterações nos parâmetros de operação são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Variação (em %) dos parâmetros utilizados nas várias passagens da areia B2 pelo sistema de regeneração.

<b>Parâmetro</b>	<b>1<sup>a</sup> Passagem</b>	<b>2<sup>a</sup> Passagem</b>	<b>3<sup>a</sup> Passagem</b>	<b>4<sup>a</sup> Passagem</b>
Diâmetro do anel do tambor de retenção	0	0	0	0
Comprimento da haste	0	+ 12	- 6	-6
Pressão dos cilindros	0	- 12	0	0
Velocidade de rotação do tambor	0	- 6	+ 6	- 3

### 3.5.1. Caracterização da areia após cada passagem pelo sistema de regeneração

Para o estudo das alterações das características da areia foi determinada a distribuição granulométrica, índice de finura, percentagem de finos, teor em humidade, em argila ativa e em carbono, perda ao fogo, pH e o ADV.

A comparação da distribuição granulométrica da areia (Figura 55) e do índice de finura (Tabela 13) mostra uma tendência para o aumento da fração de partículas menores com o número de passagens pelo sistema de regeneração, tendência esta que é consistente com o aumento dos resíduos resultantes da limpeza das partículas de areia e, provavelmente, fratura destas devido à forças de abrasão e impacto a que estas são sujeitas. Verifica-se também que é a primeira passagem a que origina maior quantidade de finos e que este valor diminui nas passagens posteriores. Esta evolução corresponde a um aumento do grau de limpeza das partículas de areia e, conseqüentemente, a uma diminuição da quantidade de bentonite, grafite em pó (comprovada pela redução detetada no teor em argila ativa e carbono) que, em cada passagem, pode ser extraída pelo sistema de aspiração de finos.

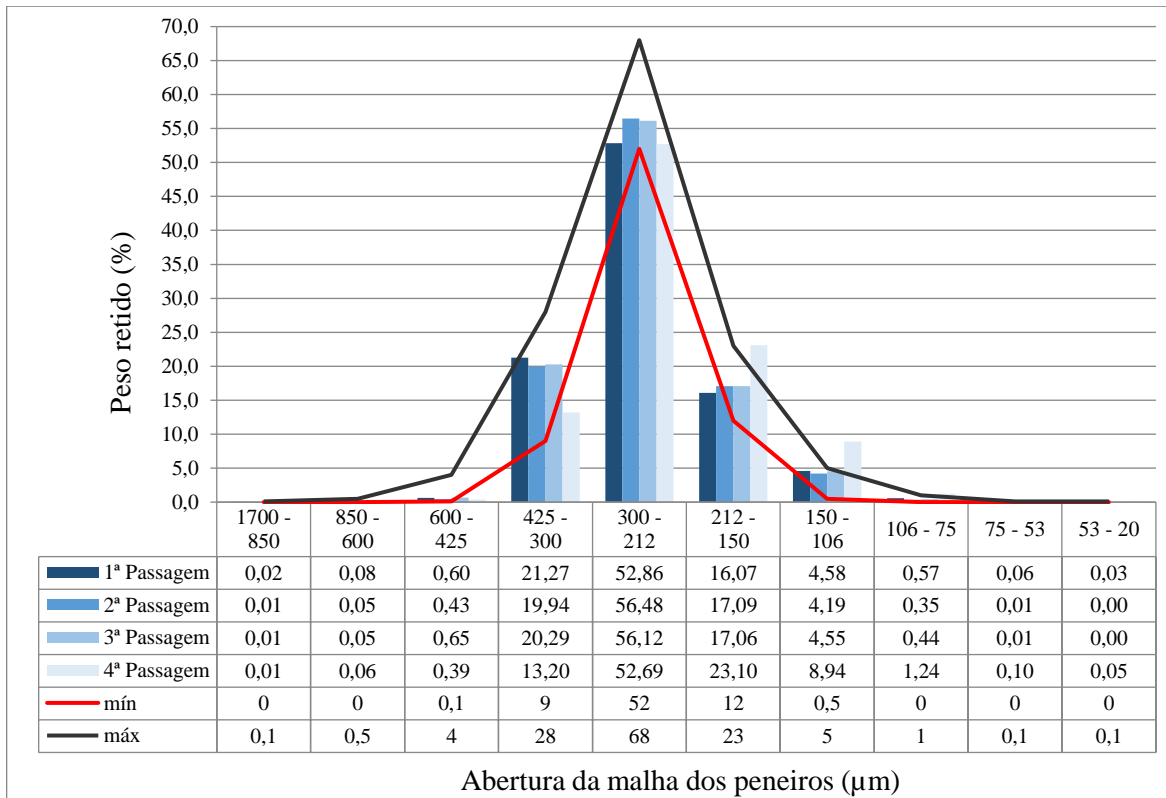


Figura 55 - Distribuição granulométrica da areia B2 após a 1ª, 2ª, 3ª e 4ª passagem pelo sistema de regeneração. Os resultados das análises são apresentados mais detalhadamente na Tabela A2 do anexo.

Tabela 13 - Valores de índice de finura e percentagem de finos das areias I, II e B2 após cada passagem de regeneração.

Análise	Areia I	Areia II	Areia B2			
			1 <sup>a</sup> Passagem	2 <sup>a</sup> Passagem	3 <sup>a</sup> Passagem	4 <sup>a</sup> Passagem
Índice de finura	53,80	55,27	54,06	53,80	53,95	59,08
Finos (%)	0,20	9,23	3,86	1,45	0,82	0,22
Humidade (%)	0,01	0,16	0,17	0,04	0,02	0,04
Argila ativa (%)	-	4,46	2,18	0,71	0,41	0,40
Carbono (%)	-	2,22	0,61	0,30	0,22	0,17
Perdas ao fogo (%)	0,18	2,89	1,20	0,50	0,32	0,25
pH	7,20	9,83	10,07	12,28	10,20	10,19
ADV (ml)	0,20	-	28,50	12,40	8,70	7,30

A humidade apresenta o maior valor após a primeira passagem e mantém-se estável nas passagens seguintes. No entanto, validade dos valores obtidos poderá estar afetada por condições de transporte e armazenamento diferentes das várias amostras.

Em todas as passagens a areia B2 apresenta um pH básico, e o ADV diminui continuamente com o número de passagens. A evolução deste último parâmetro é consistente com o aumento do grau de limpeza da areia durante o processo de regeneração.

Com exceção do índice de finura, percentagem de finos e teor em humidade, os restantes parâmetros da Tabela 13 apresentam uma evolução mais significativa até à terceira passagem. Isto sugere que o número de passagens da areia B2 pelo sistema de regeneração poderá ser reduzido de 4 para 3, sem alterar significativamente as características dos machos obtidos. No entanto, esta hipótese requer a confirmação através da realização de testes adicionais utilizando machos produzidos com areia B2 após 3 passagens pelo sistema de regeneração.

### 3.5.2. Caracterização da fração recolhida pelo sistema de despoeiramento em cada passagem pelo sistema de regeneração

Para a caracterização da fração recolhida pelo sistema de despoeiramento em cada passagem pelo sistema de regeneração, foi determinada a distribuição granulométrica (Figura 56) e o teor em argila ativa, em carbono e em humidade (Tabela 14).

Os resultados mostram que, para todas as amostras, mais de 90% do material tem tamanho inferior a 212  $\mu\text{m}$ , sendo a fração granulométrica mais comum a que corresponde a aberturas de malha de peneiro entre 212  $\mu\text{m}$  e 53  $\mu\text{m}$ . De realçar que foi na segunda passagem que se obteve a maior percentagem de partículas com tamanho inferior a 53  $\mu\text{m}$ , e os maiores teores de argila ativa e de carbono, o que sugere que esta passagem é a que mais contribui para a limpeza da areia B2. Porém, a confirmação desta hipótese requer a determinação da quantidade de material recolhida pelo sistema de despoeiramento em cada passagem.

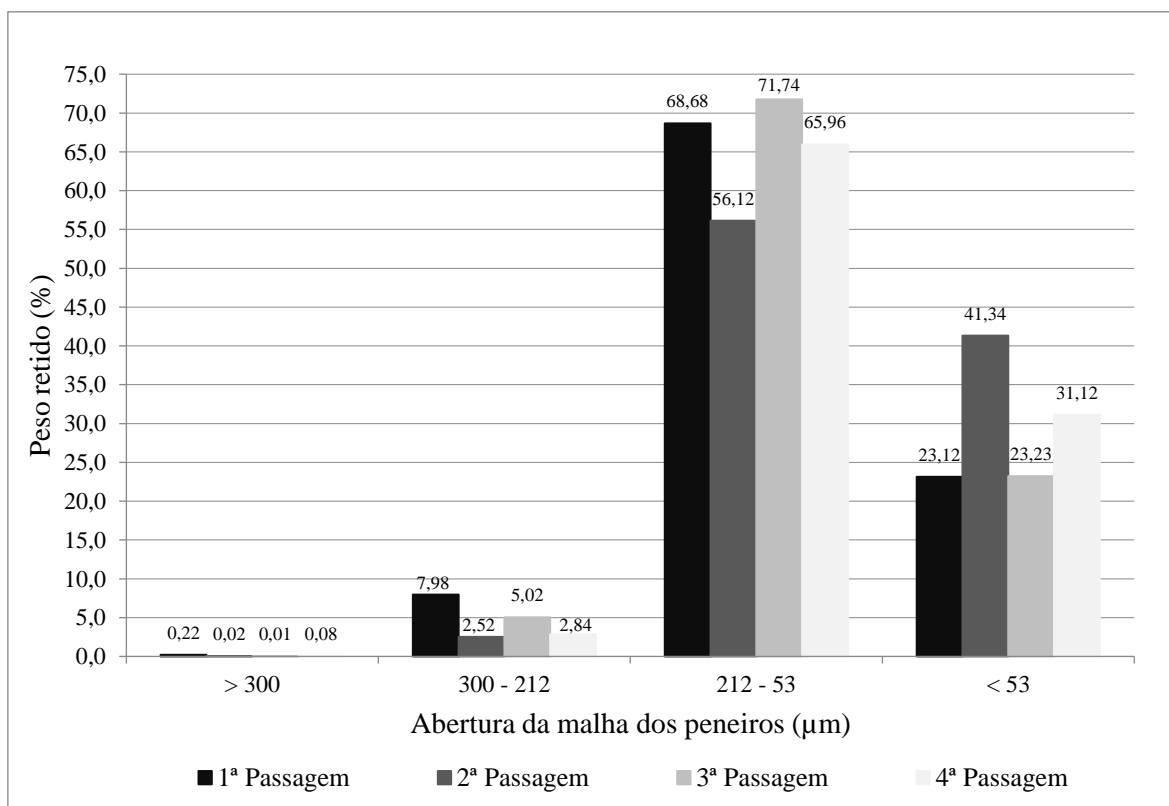


Figura 56 - Distribuição granulométrica da fração fina recolhida pelo sistema de despoeiramento durante as várias passagens de regeneração da areia B2. Os resultados da análise são também apresentados na Tabela A3 do anexo.

Tabela 14 - Teor de humidade, de argila ativa e de carbono da fração fina recolhida pelo sistema de despoejamento durante a as várias passagens de regeneração da areia B2.

Análises	Processo de Regeneração da areia B2			
	1ª Passagem	2ª Passagem	3ª Passagem	4ª Passagem
Humidade (%)	0,45	1,49	0,15	0,11
Argila ativa (%)	3,85	12,15	1,77	1,27
Carbono (%)	3,05	5,44	0,70	0,58

Ainda com base nos resultados da Tabela 14, é possível concluir que apenas uma pequena fração do material recolhido pelo sistema de despoejamento é argila activa e carbono pelo que a utilização deste material no circuito de reutilização da areia para reposição dos teores argila e grafite, implicaria a introdução de uma grande quantidade de partículas finas que poderiam diminuir demasiado a permeabilidade dos machos e conduzirem a um aumento excessivos de resina. No entanto, a incorporação de uma quantidade suficientemente pequena deste material de forma a não afetar significativamente as características dos machos teria vantagem ao nível da redução dos custos e do impacto ambiental associado à deposição em aterro, pelo que merece ser avaliada num estudo futuro.

De referir que, apesar de serem conhecidos os parâmetros de processamento modificados em cada passagem (Tabela 12), a acumulação dos efeitos das várias passagens e a variação simultânea de vários parâmetros em cada passagem impedem a análise da contribuição de cada parâmetro para os resultados obtidos nestas análises complementares.



#### 4. Conclusões

Neste trabalho analisou-se a utilização de areia de moldação regenerada por dois métodos (A e B) para a produção pela Funfrap de machos para fundição. Os resultados obtidos permitiram obter as seguintes conclusões principais:

- ✓ As areias regeneradas pelo método B apresentam características mais próximas da areia virgem do que as regeneradas pelo método A, sendo a areia B2 aquela que apresentou as menores diferenças relativamente à areia virgem na maioria dos parâmetros analisados;
- ✓ os machos produzidos com areia B2 foram os que apresentaram a menor alteração da resistência mecânica, tempo de vida em bancada e permeabilidade, com o aumento da quantidade de areia regenerada;
- ✓ a substituição integral da areia virgem por areia regenerada B2 combinada com a adição de mais 10% de resina permitiu a produção de machos corpo/cilindro e camisa/teto sem degradação excessiva das suas características. No entanto, no caso dos machos RO2, esta substituição originou uma elevada percentagem de rejeição dos machos produzidos e de defeitos nas peças. Para além do impacto ambiental positivo, esta formulação permite uma poupança de aproximadamente 44 000€ mensais (não contabilizando o investimento nos equipamentos de regeneração e custos de operação e manutenção dos mesmos);
- ✓ a análise da areia e do material recolhido pelo sistema de despoeiramento em cada passagem pelo sistema de regeneração B sugere que:
  - o número de passagens da areia pelo processo de regeneração poderá ser reduzido de 4 para 3, sem que isso provoque alterações significativas das características dos machos produzidos com areia B2;
  - a utilização de material fino recolhido pelo sistema de despoeiramento como fonte de argila e grafite é condicionada pela presença de um elevado teor de outras partículas finas que poderão afetar as características das moldações.

A realização deste estágio curricular foi pessoalmente importante porque foi um ótimo primeiro contato com o mundo da fundição e com os desafios inerentes a este tipo de indústria.





## Sugestões para trabalho futuro

Para trabalho futuro sugere-se:

- ✓ A realização de um estudo de otimização do processo de regeneração B através de:
  - uma análise mais aprofundada do efeito de cada parâmetro do processo de regeneração nas características das areias obtidas;
  - avaliação das alterações das características dos machos produzidos com areia após diferente número de passagens pelo sistema de regeneração;
- ✓ avaliar a quantidade máxima de material recolhido pelo sistema de despoeiramento que pode ser introduzido em substituição do aglomerante e grafite em pó sem alterar excessivamente as características das moldações;
- ✓ realizar testes industriais com machos produzidos com diferentes percentagens de areia regenerada B2 em substituição de areia virgem.



## Referências bibliográficas

- [1] M. C. Zanetti e S. Fiore, “Foundry processes: The recovery of green moulding sands for core operations”, *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 38, n. 3, pp. 243–254, 2003;
- [2] S. Fiore e M. C. Zanetti, “Industrial treatment processes for the recycling of green foundry sands”, *WIT Trans. Ecol. Environ.*, vol. 92, pp. 67–76, 2006;
- [3] C. L. Park, B. G. Kim, e Y. Yu, “The regeneration of waste foundry sand and residue stabilization using coal refuse”, *J. Hazard. Mater.*, vol. 203–204, pp. 176–182, 2012;
- [4] R. Siddiquea, G. Kaur, e A. Rajor, “Waste foundry sand and its leachate characteristics”, *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 54, n. 12, pp. 1027–1036, 2010;
- [5] M. M. Khan, M. Singh, S. M. Mahajani, G. N. Jadhav, e S. Mandre, “Reclamation of used green sand in small scale foundries”, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 255, n. November 2017, pp. 559–569, 2018;
- [6] F. Castro, “Relatório Final”. Centro de Valorização de Resíduos; Universidade do Minho; Associação Portuguesa de Fundição, Guimarães, 2018;
- [7] “Materiais Metálicos, Parte - III,” 2004. Disponível em: <http://www.mar.ist.utl.pt/jgordo/tecnave/TN-C3.pdf>. Consultado em: 26 de novembro de 2018;
- [8] V. Chiaverini, “Aços e Ferros Fundidos”, 7aEdição. São Paulo: Associação Brasileira de Metais (ABM), 2005;
- [9] W. D. Callister, “Materials Science and Engineering: An Introduction”, 7aEdição. 2007;
- [10] J. M. G. de C. Ferreira, “Tecnologia da Fundição”. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999;
- [11] A. R. M. R. da Silva, “Fundição em Areia de Ligas Ferrosas”, (Tese de Mestrado em Engenharia de Materiais), Universidade de Aveiro, Aveiro, 2014;
- [12] H. M. F. M. Amaral, “Soldadura dos ferros fundidos cinzentos, nodulares e bainíticos”, (Tese de Mestrado em Materiais e Processos de Fabrico), Universidade do Porto, Porto, 1898;
- [13] C. F. Walton e T. Opar, “Iron Castings Handbook”. Iron Castings Society, 1981;
- [14] “Fundição”. Apontamentos das aulas teóricas das disciplinas de Fundição I e Fundição II. Ribeiro, C. A. Silva. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade do Porto (2009/2010);

- [15] “Metal Casting”. Apontamentos das aulas teóricas da disciplina de Tecnologia Metalúrgica. Lopes, Augusto Luís Barros; Silva, Rui Ramos Ferreira. Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica, Universidade de Aveiro (2016/2017);
- [16] N. M. P. Neves, “Avaliação das características de ligação do cimento de fosfato de magnésio em moldes de areia para fundição”, (Tese de Mestrado em Engenharia de Materiais), Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008;
- [17] M. T. P. de O. T. Moreira, “Contaminação Ambiental Associada às Areias Residuais de Fundição”, (Tese de Doutoramento em Engenharia Química), Universidade do Porto, Porto, 2004;
- [18] B. A. C. Batista, “Otimização do Sistema de Gitagem para Redução de Bolhas e Metal Frio no Cáster Cilindro 650 da Funfrap”, (Tese de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), Universidade do Porto, Porto, 2013;
- [19] V. M. da C. Santos, “Formação de Bolhas em Blocos Cilindros de Ferro Fundido Cinzento”, (Tese de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), Universidade do Porto, Porto, 2015;
- [20] “Metals Handbook Volume 15: Casting”. Ohio: ASM International, 1988;
- [21] S. Neves, “Análise do funcionamento de um circuito de areias”, (Tese de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), Universidade do Porto, Porto, 2000;
- [22] J. R. Brown, “Foseco Ferrous Foundryman’s Handbook”. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000;
- [23] A. Serghini, “Polyurethan Cold-Box – Chemistry of the process and improvement of the last years”, Hüttenes-Albertus Chem. Werke GmbH, 2007;
- [24] P. M. C. L. de Vilhena, “Resinas de caixa-fria modificadas estruturalmente com propriedades técnicas e meio ambientais melhoradas – Sistema Biodiesel”, (Tese de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), Universidade do Porto, Porto, 2009;
- [25] C. M. T. Vilela, “I Análise crítica ao controlo de qualidade e estabilidade de Aglomerantes à base de poliuretano. II Desenvolvimento e investigação de um aglomerante à base de Polifenóis de Origem Vegetal para produção de rolhas aglomeradas.”, (Tese de Mestrado em Engenharia Química), Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2015;
- [26] M. J. Forrest, “Chemical Characterisation of Polyurethanes”. Rapra Technology,

- 1999;
- [27] AFS - American Foundry Society, “Chemically bonded Cores & Molds - an operator’s manual for the use of chemically bonded, self-setting sand mixtures”, 2000;
- [28] AISA - Auxiliar Industrial, S.A., “Manual de Instrucciones – Caja Fría”, 2007;
- [29] R. Scheunemann, “Regeneração de Areia de Fundição através de Tratamento Químico via Processo Fenton”, (Tese de Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005;
- [30] D. Proszek, C. A. M. Moraes, W. dos P. da Silva, e J. de Castro, “Otimização de processo de regeneração mecânica de areia fenólica usada de fundição”, Contrib. técnica ao 69o Congr. Anu. da ABM – Int. e ao 14o ENEMET - Encontro Nac. Estud. Eng. Met. Mater. e Minas, 2014;
- [31] “The European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (IPPC) - Reference Document on Best Available Techniques in the Smitheries and Foundries Industry. Mai. 2005”. Disponível em: <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference>. Consultado em: 18 de outubro de 2019;
- [32] Associação Brasileira de Fundição (ABIFA) - Comissão de Meio Ambiente. “Manual de Regeneração e Reuso de Areias de Fundição”. São Paulo: Associação Brasileira de Fundição, p.1-49, 1999;
- [33] A. Ghosh, “Modern Sand Reclamation Technologies for Economy , Environment Friendliness and Energy Efficiency”, Wesman Eng. Co. Ltd, pp. 1–5, 2013;
- [34] T. F. Maciel, “Regeneração úmida de areia de fundição: Tratamento em areias a verde”, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017;
- [35] E. N. and J. Baeyens, “A Review of Classic Fenton’s Peroxidation as an Advanced Oxidation Technique”, J. Hazard. Mater., vol. B98, pp. 33–50, 2003;
- [36] “Funfrap - Fundição portuguesa. Teksid Group”. Disponível em: <http://www.teksid.com/en/iron/plants/aveiro>. Consultado em: 23 de novembro de 2018;
- [37] J. F. M. Francisco, “Relatório De Estágio Na Funfrap - Fundição Portuguesa, Sa”, (Tese de Mestrado em Administração e Gestão Pública), Universidade de Aveiro, Aveiro, 2014;
- [38] R. Daňko, “Development of energetic model for dry mechanical reclamation process of used foundry sands”, Int. J. Cast Met. Res., vol. 20, n. 4, pp. 228–232, 2007;

- [39] P. Czapla e R. Dańko, “The State of Art of the Mechanical Reclamation of Used Foundry Sands”, Arch. FOUNDRY Eng., vol. 1, n. 3, pp. 15–20, 2013;
- [40] “METTLER TOLEDO”. Disponível em: <https://www.mt.com/int/pt/home.html>. Consultado em: 14 de março de 2019;
- [41] J. Campbell, Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design, Second. Oxford: Elsevier Ltd, 2015.

# Anexos

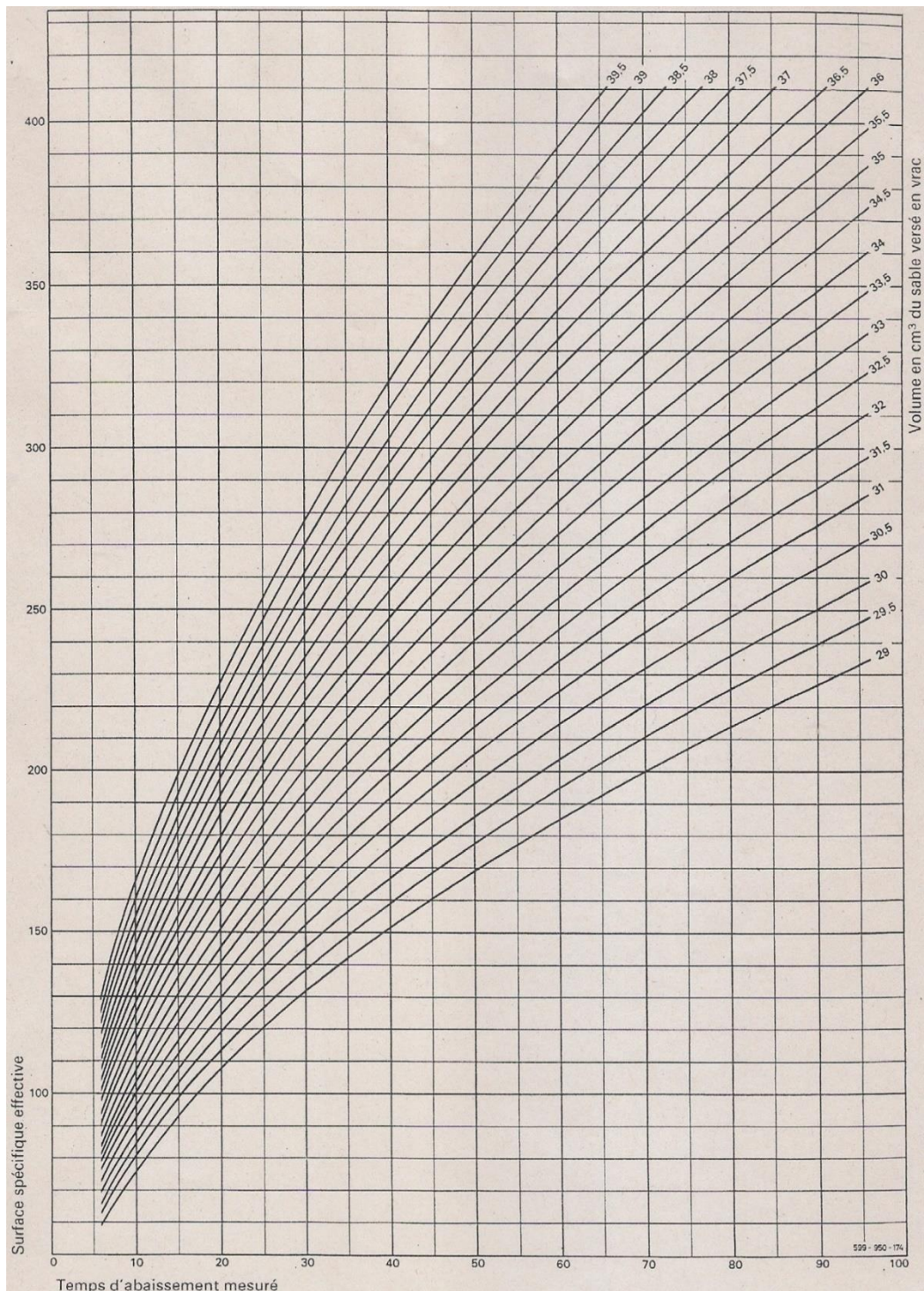


Figura A1 - Figura do gráfico que relaciona o tempo com o volume da areia para determinar a superfície específica real (gráfico pertencente à norma interna, fornecido pelo fabricante do equipamento).

Tabela A1 - Resultados da análise granulométrica das areias I, II, A1, A2, B1 e B2.

MALHA	Areia I	Areia II	Areia A1	Areia A2	Areia B1	Areia B2
6 (3,35mm)	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
12 (1,7mm)	0	0	0,00	0,00	0,10	0,00
20 (850 $\mu$ )	0	0,01	0,00	0,00	0,04	0,01
30 (600 $\mu$ )	0,01	0,06	0,04	0,01	0,12	0,06
40 (425 $\mu$ )	0,83	0,53	0,33	0,31	0,74	0,39
50 (300 $\mu$ )	20,12	18,83	11,96	13,56	18,86	13,20
70 (212 $\mu$ )	55,75	49,70	43,59	47,23	55,05	52,69
100 (150 $\mu$ )	19,27	17,21	20,57	20,40	16,70	23,10
140 (106 $\mu$ )	3,48	3,08	11,45	10,12	5,14	8,94
200 (75 $\mu$ )	0,25	0,77	6,60	4,94	0,94	1,24
270 (53 $\mu$ )	0,07	0,33	2,30	1,11	0,30	0,10
Fundo (<53 $\mu$ )	0,02	0,25	0,54	0,09	0,39	0,05
TOTAL	99,80	90,77	97,36	97,77	98,38	99,78


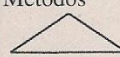
Tabela A2 - Resultados da análise granulométrica das areias I, II e da areia B2 após a 1ª, 2ª, 3ª e 4ª passagem pelo sistema de regeneração.

MALHA	Areia A	Areia II	Processo de Regeneração da areia B2			
			1ª Passagem	2ª Passagem	3ª Passagem	4ª Passagem
20 (850 $\mu$ )	0	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
30 (600 $\mu$ )	0,01	0,06	0,08	0,05	0,05	0,06
40 (425 $\mu$ )	0,83	0,53	0,60	0,43	0,65	0,39
50 (300 $\mu$ )	20,12	18,83	21,27	19,94	20,29	13,20
70 (212 $\mu$ )	55,75	49,7	52,86	56,48	56,12	52,69
100 (150 $\mu$ )	19,27	17,21	16,07	17,09	17,06	23,10
140 (106 $\mu$ )	3,48	3,08	4,58	4,19	4,55	8,94
200 (75 $\mu$ )	0,25	0,77	0,57	0,35	0,44	1,24
270 (53 $\mu$ )	0,07	0,33	0,06	0,01	0,01	0,10
Fundo (<53 $\mu$ )	0,02	0,25	0,03	0,00	0,00	0,05
TOTAL	99,8	90,77	96,14	98,55	99,18	99,78



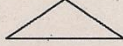
Tabela A3 - Resultados da análise granulométrica da fração recolhida pelo sistema de despoeiramento durante a regeneração da areia B2.

MALHA	Processo de Regeneração da areia B2			
	1ª Passagem	2ª Passagem	3ª Passagem	4ª Passagem
50 (300 $\mu$ )	0,22	0,02	0,01	0,08
70 (212 $\mu$ )	7,98	2,52	5,02	2,84
270 (53 $\mu$ )	68,68	56,12	71,74	65,96
Finos (<53 $\mu$ )	23,12	41,34	23,23	31,12

		<b>LOTE DE ENSAIO N°: LE 6369 DT</b>		<b>Destino:</b> DIRECÇÃO TÉCNICA DIRECÇÃO DA QUALIDADE DIRECÇÃO DA FABRICAÇÃO DIRECÇÃO GERAL	
<b>DESIGNAÇÃO DA PEÇA:</b> <u>Carter Cilindros</u> <span style="float: right;"><u>740</u></span>		<b>FINALIDADE:</b> Ensaiair RO2 com areia regenerada e <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 50px; height: 15px;"></span> 50\50		<b>Chefes de UET:</b> UET Q1 – (Laboratório) UET Q2 – (Metrologia) UET Q3 – (Audit. Produto) CTP MACHARIA CTP MOLDAÇÃO CTP FUSÃO CTP ACABAMENTOS MODELAGEM	
<b>MEIOS A UTILIZAR:</b> <u>Placa molde nº 3</u>		Nº MOLDAÇÕES: <u>10</u> COMPOSTAGEM: SIM <input type="checkbox"/> NÃO <input checked="" type="checkbox"/>			
Modelagem	Bom estado das ferramentas,				
Macharia	- Para o RO2 utilizar o leito de areia com <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 50px; height: 15px;"></span> 2 cargas - 50Kg de areia regenerada na Omega - 50 Kg de <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 50px; height: 15px;"></span> Resina P1= <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 50px; height: 15px;"></span> Resina P2= <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 50px; height: 15px;"></span> Efetuar provetes para flexão imediata e após pintura Efetuar provetes para permeabilidade Perda ao fogo Separar e identificar o lote				
Moldação	- Colocar o RO2 de ensaio em 10 moldações - Marcar as peças 1xx (xx hora de produção)				
Fusão	SÉRIE				
Acabamento	- Separar as peças após granalhadora de pinça				
Qualidade	- Série				
Métodos	- Seguimento do ensaio				
	 Secção responsável da execução				


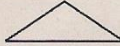
DO0008DT-Ed.11

Figura A2 - Registo dos ensaios industriais dos machos RO2 produzidos com a formulação selecionada.

Fundação Portuguesa <b>funfrap</b>	<b>LOTE DE ENSAIO N°: LE 6392 DT</b>		<b>Destino:</b> DIRECÇÃO TÉCNICA DIRECÇÃO DA QUALIDADE DIRECÇÃO DA FABRICAÇÃO DIRECÇÃO GERAL
	DESIGNAÇÃO DA PEÇA: <u>Carter Cilindros</u> <span style="float: right;">275</span>		<b>Chefes de UET:</b> UET Q1 – (Laboratório) UET Q2 – (Metrologia) UET Q3 – (Audit. Produto) CTP MACHARIA CTP MOLDAÇÃO CTP FUSÃO CTP ACABAMENTOS MODELAGEM
	FINALIDADE: Ensaiai cilindros com areia regenerada <input type="checkbox"/> de resina		
	MEIOS A UTILIZAR: <u>Placa molde n° 3</u> N° MOLDAÇÕES: <u>10</u> COMPOSTAGEM: SIM <input type="checkbox"/> NÃO <input checked="" type="checkbox"/>		
Modelagem	Bom estado das ferramentas,		
Macharia	- Para os cilindros utilizar o leito de areia, 2 cargas - 250Kg de areia regenerada na Omega Resina P1= <input type="text"/> Resina P2= <input type="text"/> Efetuar provetes para flexão imediata Efetuar provetes para permeabilidade Perda ao fogo Separar e identificar o lote		
Moldação	- Colocar os machos de ensaio em 10 moldações - Marcar as peças 1xx (xx hora de produção)		
Fusão	SÉRIE		
Acabamento	- Separar as peças após granalhadora de pinça		
Qualidade	- Série		
Métodos	- Seguimento do ensaio		
 Secção responsável da execução			

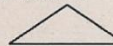
DO0008DT-Ed. 11

Figura A3 - Registo do primeiro conjunto de ensaios industriais dos machos corpo/cilindro produzidos a formulação seleccionada.

		<b>LOTE DE ENSAIO Nº: LE 6393 DT</b>		<b>Destino:</b> DIRECÇÃO TÉCNICA DIRECÇÃO DA QUALIDADE DIRECÇÃO DA FABRICAÇÃO DIRECÇÃO GERAL	
DESIGNAÇÃO DA PEÇA: <u>Carter Cilindros</u> <u>275</u>		<b>FINALIDADE:</b> Ensaiar camisas com areia regenerada <input type="checkbox"/> de resina		<b>Chefes de UET:</b> UET Q1 – (Laboratório) UET Q2 – (Metrologia) UET Q3 – (Audit. Produto) CTP MACHARIA CTP MOLDAÇÃO CTP FUSÃO CTP ACABAMENTOS MODELAGEM	
<b>MEIOS A UTILIZAR:</b> <u>Placa molde nº 3</u>		Nº MOLDAÇÕES: <u>10</u> COMPOSTAGEM: SIM <input type="checkbox"/> NÃO <input checked="" type="checkbox"/>			
Modelagem	Bom estado das ferramentas,				
Macharia	- Para as camisas utilizar o leito de areia, 2 cargas - 100Kg de areia regenerada na Omega Resina P1= <input type="checkbox"/> Resina P2= <input type="checkbox"/> Efetuar provetes para flexão imediata Efetuar provetes para permeabilidade Perda ao fogo Separar e identificar o lote				
Moldação	- Colocar os machos de ensaio em 10 moldações - Marcar as peças 1xx (xx hora de produção)				
Fusão	SÉRIE				
Acabamento	- Separar as peças após granalhadora de pinça				
Qualidade	- Série				
Métodos	- Seguimento do ensaio				
	 Secção responsável da execução				

DO0008DT-Ed.11

Figura A4 - Registo do primeiro conjunto de ensaios industriais dos machos camisa/teto produzidos a formulação selecionada.

Fundição Portuguesa <b>funfrap</b>	<b>LOTE DE ENSAIO N°: LE 6406 DT</b>		<b>Destino:</b> DIRECÇÃO TÉCNICA DIRECÇÃO DA QUALIDADE DIRECÇÃO DA FABRICAÇÃO DIRECÇÃO GERAL <b>Chefes de UET:</b> UET Q1 - (Laboratório) UET Q2 - (Metrologia) UET Q3 - (Audit. Produto) CTP MACHARIA CTP MOLDAÇÃO CTP FUSÃO CTP ACABAMENTOS MODELAGEM
	DESIGNAÇÃO DA PEÇA: <u>Carter Cilindros</u> <span style="float: right;">275</span>		
	FINALIDADE: Ensaiair areia regenerada nas camisas com <input type="text"/> de resina e nos cilindros com <input type="text"/> de resina		
	MEIOS A UTILIZAR: <u>Placa molde n° 3</u> N° MOLDAÇÕES: <u>20</u> COMPOSTAGEM: SIM <input type="checkbox"/> NÃO <input checked="" type="checkbox"/>		
Modelagem	Bom estado das ferramentas,		
Macharia	- Para as camisas utilizar o leito de areia, 3 cargas		
	- 100Kg de areia regenerada na Omega		
	Resina P1= <input type="text"/>		
	Resina P2= <input type="text"/>		
	Efetuar provetes para flexão imediata		
	Efetuar provetes para permeabilidade		
	Perda ao fogo		
	Separar e identificar o lote		
	- Para os cilindros utilizar o seguinte leito de areia, 2 cargas		
	500Kg de areia regenerada na Omega		
Resina P1= <input type="text"/>			
Resina P2= <input type="text"/>			
Moldação	- Colocar os machos de ensaio em moldações		
	- Marcar as peças 1xx (xx hora de produção)		
Fusão	SÉRIE		
Acabamento	- Separar as peças após granalhadora de pinça		
	- Série		
Qualidade	- Seguimento do ensaio		
Métodos			
	 Secção responsável da execução		

DO0008DT-Ed.11

Figura A5 - Registo do segundo conjunto de ensaios industriais dos machos corpo/cilindro e camisa/teto produzidos a formulação seleccionada.