



**Joana Raquel Barros  
Fernandes Morgado**

**Regeneração e reutilização de areias de macho em  
fundição**





**Joana Raquel Barros  
Fernandes Morgado**

**Regeneração e reutilização de areias de macho em  
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 Filipe José Alves de Oliveira, equiparado a Investigador Principal, coorientação da Professora Doutora Ana Maria Bastos da Costa Segadães, Professora Associada com Agregação, ambos do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro, e com a supervisão empresarial do Engenheiro João Matos, responsável pelo Departamento de Métodos e Modelagem da *Funfrap* - Fundação Portuguesa S.A..



**o júri**  
presidente

**Professor Doutor Rui Ramos Ferreira e Silva**

Professor Associado do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro

**Doutor Rogério Paulo Alves Lopes**

Diretor Técnico e de Qualidade da empresa DuritCast (Águeda – Portugal)

**Doutor Filipe José Alves de Oliveira**

Equiparado a Investigador Principal do CICECO, Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica, Universidade de Aveiro



## **agradecimentos**

O trabalho descrito neste relatório de estágio não se concretizaria sem a colaboração de diversas pessoas e instituições. Assim, gostaria de agradecer ao Doutor Filipe Oliveira e à Professora Doutora Ana Segadães pela orientação, disponibilidade e apoio prestado ao longo deste estudo.

Agradeço também à empresa *Funfrap*, e em especial ao Engenheiro João Matos, pela oportunidade concebida e pela experiência de um primeiro contacto com o mundo industrial. A toda a equipa dos Métodos e da Qualidade nomeadamente ao José António, João Castro, Rui Reis, Bruno Branco, Paulo Silva, Virgílio Ratola, Luís Saraiva, Eduardo Mortágua e Mário Jorge por toda a partilha de conhecimentos, apoio e simpatia.

Ao Bernardo e aos meus amigos que sempre me ajudaram, ouviram e aconselharam durante os bons e os maus momentos.

Por fim, mas sem dúvida o agradecimento mais importante, a toda a minha família, em especial à minha mãe, não só pelo suporte e incentivo ao longo deste trabalho, mas também ao longo de todo o meu percurso académico.

A todos os que estiveram envolvidos diretamente e indiretamente na concretização deste trabalho, o meu sincero obrigado!





## palavras-chave

Regeneração de areia de macho, caixa fria, resistência à flexão, permeabilidade, dureza.

## resumo

Este documento descreve o trabalho desenvolvido durante o estágio curricular decorrido na *Funfrap* – Fundação Portuguesa S.A., localizada na zona industrial de Cacia, Aveiro. Trata-se de uma unidade industrial do setor metalúrgico que produz componentes de ferro fundido para automóveis através do processo de moldação em areia verde. Este processo gera diariamente elevadas quantidades de resíduos de areia com aglomerantes orgânicos resultante do processo de fabrico de machos que, devido à sua toxicidade, são descartadas para aterros controlados. Atualmente, a legislação força a diminuição da quantidade de areia depositada em aterro, pelo que o custo desta prática tem aumentado nos últimos anos.

Com o objetivo de reutilizar a areia rejeitada, foram estudadas as propriedades tecnológicas da areia de macharia regenerada. O trabalho começou pela caracterização da areia base SP 55 (padrão), que incluiu a distribuição granulométrica, o cálculo do índice de finura, a determinação do coeficiente de angularidade, a determinação da percentagem de humidade, do pH, do valor de acidez, da perda ao fogo e dos carbonatos. Foram também produzidos provetes pelo sistema de caixa fria fenólico-uretânico para ensaios de resistência à flexão, dureza e permeabilidade. Paralelamente procedeu-se à regeneração e caracterização de 9 amostras de areia usada. Os valores obtidos foram comparados com os valores da amostra padrão.

Numa segunda etapa foram produzidos provetes para ensaios de resistência à flexão, dureza e permeabilidade formados por 100% de areia regenerada, primeiro com cada uma das amostras e depois com misturas de várias amostras. Os resultados foram comparados com os valores médios dos provetes da produção e com os valores obtidos com os provetes da amostra padrão.

Com base nos resultados obtidos, desenvolveram-se novas formulações contendo 5% de areia de sucata de macharia regenerada que sobreviveram com sucesso a um ensaio fabril. Desta maneira, parte da areia que originalmente não era utilizada é reincorporada no processo de fabrico. O facto da areia em causa não ser depositada em aterro e, conseqüentemente, existir uma redução dos custos da sua deposição, constitui uma das principais vantagens deste estudo, a par com os benefícios ambientais.



**keywords**

Core sand reclamation, cold box, flexural strength, permeability, hardness.

**abstract**

This document describes the work carried out during the curricular internship at *Funfrap* – Fundação Portuguesa, S.A., located at the industrial park of Cacia, Aveiro. This is an industrial unit in the metallurgical sector that produces automotive iron components using the green sand casting moulding process. This process daily generates high amounts of rejected sand with organic binders originated at the core-making process, which, due to its toxicity, is discarded at controlled landfills. Currently, the legislation enforces the reduction of the amount of sand sent to landfill, hence the costs of this practice have increased in the last years.

Having in mind the reuse of the rejected sand, the technological properties of reclaimed core sand were investigated. The work began with the characterization of the base sand SP 55 (standard), which included the determination of the particle size distribution, the fineness index, the angularity coefficient, the moisture content, pH, the acid demand value, the loss on ignition and the carbonate content. Test-pieces were also prepared by the phenol-urethane cold box process to evaluate the flexural strength, hardness and permeability. In parallel, 9 samples of used core sand were regenerated and characterized. The results were compared to those obtained for the base sand.

In a second stage, test-pieces containing 100% reclaimed core sand were prepared for flexural strength, hardness and permeability testing, first with each of the sand samples and then with mixtures thereof. The results were compared to the average values obtained in the production line and to those obtained for the base sand.

Based on this study, new formulations were developed using 5% of reclaimed scrap sand. This formulation was successfully tested in an industrial trial. In this way, some of the sand that cannot follow the manufacturing process can be recycled. The fact that this sand is not disposed of to landfill and is reused instead, eliminates the corresponding deposition costs, which is one of the most important contributions of this study.



# ÍNDICE GERAL

<b>Índice de Abreviaturas</b> .....	<b>iii</b>
<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>iv</b>
<b>Índice de Tabelas</b> .....	<b>viii</b>
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>1</b>
<b>Introdução</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Enquadramento do trabalho</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2. A empresa</b> .....	<b>4</b>
<b>1.3. Processo produtivo</b> .....	<b>5</b>
1.3.1. Fusão e vazamento .....	6
1.3.2. Macharia .....	6
1.3.3. Moldação .....	8
1.3.4. Acabamentos .....	9
<b>1.4. Ferro fundido</b> .....	<b>10</b>
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>12</b>
<b>Revisão do Estado da Arte</b> .....	<b>12</b>
<b>2.1. Características dos Machos</b> .....	<b>12</b>
<b>2.2. Características da areia</b> .....	<b>15</b>
2.2.1. Tamanho e morfologia dos grãos .....	15
2.2.2. pH e valor de acidez (ADV) .....	18
2.2.3. Carbonato de cálcio .....	18
<b>2.3. Processo caixa fria (cold box)</b> .....	<b>19</b>
<b>2.4. Areia rejeitada</b> .....	<b>22</b>
<b>2.5. Regeneração de areia</b> .....	<b>23</b>
<b>CAPÍTULO III</b> .....	<b>27</b>
<b>Metodologia Experimental</b> .....	<b>27</b>
<b>3.1. Caracterização da areia</b> .....	<b>27</b>
3.1.1. Determinação da distribuição granulométrica .....	27
3.1.2. Determinação do coeficiente de angularidade .....	28
3.1.3. Determinação da percentagem de humidade .....	31
3.1.4. Determinação da perda ao fogo .....	32
3.1.5. Determinação do pH.....	33
3.1.6. Determinação do valor de acidez (ADV, <i>Acid Demand Value</i> ) .....	34
3.1.7. Determinação de carbonatos .....	35
<b>3.2. Caracterização da areia moldada</b> .....	<b>37</b>
3.2.1. Resistência à flexão .....	37
3.2.2. Permeabilidade.....	39
3.2.3. Dureza.....	41

3.3.	Ensaio com areia regenerada .....	42
3.4.	Novas formulações de areia.....	46
3.5.	Ensaio industrial.....	46
3.6.	Análise de custos.....	47
<b>CAPÍTULO IV.....</b>		<b>48</b>
<b>Resultados e Discussão .....</b>		<b>48</b>
4.1.	Areia base SP 55.....	48
4.1.1.	Caracterização da areia base SP 55 .....	48
4.1.2.	Resistência à flexão, permeabilidade e dureza .....	51
4.2.	Areia regenerada .....	52
4.2.1.	Caracterização da areia regenerada.....	52
4.2.1.1.	Distribuição granulométrica .....	53
4.2.1.2.	Índice de Finura AFS .....	56
4.2.1.3.	Coeficiente de angularidade.....	57
4.2.1.4.	pH e ADV.....	58
4.2.1.5.	Carbonatos, humidade e perda ao fogo .....	60
4.2.2.	Provetes de 100% de areia regenerada.....	62
4.2.2.1.	Ensaio mecânico e permeabilidade para provetes de cada amostra .....	62
4.2.2.2.	Ensaio mecânico e permeabilidade para os provetes formados por várias amostras (misturas) .....	66
4.3.	Novas formulações.....	70
4.3.1.	Resistência à flexão .....	70
4.3.2.	Permeabilidade.....	71
4.3.3.	Dureza.....	72
4.4.	Ensaio industrial.....	73
4.5.	Análise de custos.....	76
<b>CAPÍTULO V.....</b>		<b>73</b>
<b>Conclusões.....</b>		<b>73</b>
<b>Trabalhos Futuros.....</b>		<b>73</b>
5.1.	Conclusões.....	78
5.2.	Trabalhos Futuros .....	80
<b>Referências Bibliográficas .....</b>		<b>81</b>
<b>Anexos .....</b>		<b>83</b>
<b>Anexo 1 – Gráfico Superfície Específica Real .....</b>		<b>83</b>
<b>Anexo 2 – Calibração do medidor de pH.....</b>		<b>84</b>
<b>Anexo 3 – Determinação do índice de finura AFS e superfície específica teórica .....</b>		<b>85</b>
<b>Anexo 4 – Lote de ensaio .....</b>		<b>94</b>

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

**ADV** – Acid demand value

**AFS** – American Foundry Society

**APF** – Associação Portuguesa de Fundição

**BET** – Brunauer, Emmett and Teller

**DMEA** – dimetiletilamina

**FCA** – Fiat Chrysler Automobiles

**IATF** – International Automotive Task Force

**WCM** – World Class Manufacturing

**PN** – permeability number

**SEM** – Scanning electron microscopy





## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Tarefas realizadas ao longo do estágio curricular.....	3
<b>Figura 2</b> - Peças produzidas pela <i>Funfrap</i> - Fundação Portuguesa, S.A.: a) cárter - cilindros; .....	4
<b>Figura 3</b> - Fluxograma do processo produtivo da <i>Funfrap</i> - Fundação Portuguesa, S.A.. .....	5
<b>Figura 4</b> - Macharia da <i>Funfrap</i> - Fundação Portuguesa, S.A. ....	7
<b>Figura 5</b> - Resinas da secção da macharia: <i>Isocure 340</i> (laranja) e <i>Isocure 640</i> (amarelo).....	8
<b>Figura 6</b> - Placa modelo em aço.....	9
<b>Figura 7</b> - Variação do teor em carbono e silício nos ferros fundidos (Adaptado de [8]). .....	10
<b>Figura 8</b> - Microestruturas típicas do ferro fundido lamelar (à esquerda) e nodular (à direita) com matriz mista (ferrítica-perlítica). G – grafite; F – ferrite; P - Perlite.11	
<b>Figura 9</b> - Exemplo de machos produzidos pela <i>Funfrap</i> – Fundação Portuguesa, S.A. [2]. .....	13
<b>Figura 10</b> - Dilatação de algumas areias de fundição, adaptado de [11]. .....	14
<b>Figura 11</b> - Grãos de pequena dimensão a ocupar o espaço entre os grãos de maior dimensão [12]. .....	16
<b>Figura 12</b> – Morfologia de grãos de areia: a) arredondada; b) angular; c) sub-angular; d) composto [12]. .....	17
<b>Figura 13</b> - Mecanismo de cura para o sistema fenólico-uretânico / amina (cold-box) [21]. .....	21
<b>Figura 14</b> - Influência da percentagem de humidade na resistência à flexão dos machos [21]. .....	22
<b>Figura 15</b> - Fluxograma de caracterização das areias e provetes. ....	25
<b>Figura 16</b> - Aparelho de lavagem automática "Autoclay DIETERT DITROIT NO. 534-A" (a) e tentativa de determinação de finos (b). ....	26
<b>Figura 17</b> - Estufa Prolab a) e equipamento para ensaio de granulometria com série de peneiros ASTM E 11 e agitador de peneiros RO-TAP (b). ....	28
<b>Figura 18</b> - Aparelho para medir superfície específica real tipo POF (a), abertura da válvula (b), fecho da válvula (c), abertura da válvula para permitir a descida do petróleo (d) e distância entre a marca vermelha superior e inferior (e). ....	30
<b>Figura 19</b> - Aparelho para medição do teor em humidade "Mettler HE53". ....	32
<b>Figura 20</b> - Mufla Nabertherm.....	33
<b>Figura 21</b> - Aparelho Metrohm 632 pH-meter para a medição de pH.....	34
<b>Figura 22</b> - Calcímetro de "Bernard".....	35
<b>Figura 23</b> - Ensaio de flexão (a) e (b) com equipamento Georg Fischer. ....	37

<b>Figura 24</b> - Máquina de sopragem de provetes (a), molde móvel (A), molde fixo (A'), porca de orelhas (B), camisa de sopragem (C), funil (D), alavanca (E), anel (F), placa de proteção (G), cabeça de gaseificação (H) e gaseificador de DMEA (b).....	39
<b>Figura 25</b> – Molde cilíndrico padrão a); Aparelho de compactação Georg Fischer PRA (b).....	40
<b>Figura 26</b> - Permeômetro de carga constante (a), abertura da torneira (b), fecho da torneira (c), e abertura da válvula para passagem do ar (d).....	41
<b>Figura 27</b> - a) Proвете onde foi realizado o ensaio de dureza e b) durômetro PHK Hardness Tester [30].....	42
<b>Figura 28</b> - Partidor de machos “Klein” (a) e (c) e grelha de destorroamento (b). 42	
<b>Figura 29</b> - Sucata de macharia: machos sem tinta (1), cargas descartadas (2) e machos com tinta (3).....	43
Figura 30 - Composição das amostras dos provetes formados por 100% de areia regenerada de sucata de macharia.....	45
<b>Figura 31</b> - Novas formulações com diferentes percentagens de areia regenerada para cada amostra (A.1 e A.2) .....	46
<b>Figura 32</b> - Gráfico da distribuição granulométrica da areia base SP 55.....	48
<b>Figura 33</b> - Provetes de areia base SP 55 para o ensaio de resistência à flexão (a) e resultados dos ensaios de resistência à flexão para a areia base SP 55 (b). .....	51
<b>Figura 34</b> - Distribuição granulométrica das amostras a) machos sem tinta; b) cargas descartadas; c) machos com tinta. ....	54
<b>Figura 35</b> - Distribuição granulométrica das amostras originárias do leito a) A; b) C; c) M.....	55
<b>Figura 36</b> - Gráfico representativo do índice de finura AFS para as amostras de areia regenerada. ....	56
<b>Figura 37</b> - Gráfico representativo do coeficiente de angularidade das amostras de areia regenerada e respetivo desvio em relação à amostra padrão.....	58
<b>Figura 38</b> - Gráfico representativo do pH da amostra padrão e das amostras de areia regenerada .....	59
<b>Figura 39</b> - Gráfico representativo do ADV da amostra padrão e das amostras de areia regenerada. ....	60
<b>Figura 40</b> - Resultados da resistência à flexão de 100% de areia regenerada com resina utilizada na produção.....	62
<b>Figura 41</b> - Gráfico representativo da resistência à flexão no imediato, da amostra padrão, das amostras regeneradas e dos valores médios dos provetes de produção. ....	64
<b>Figura 42</b> - Provetes de 100% de areia regenerada para o ensaio da permeabilidade.....	64

<b>Figura 43</b> - Resultados do número de permeabilidade (PN) de 100% de areia regenerada com resina de série.....	65
<b>Figura 44</b> - Resultados da dureza de 100% de areia regenerada com resina de série. ....	66
<b>Figura 45</b> - Provetes das misturas para o ensaio da permeabilidade.....	66
<b>Figura 46</b> - Resultados do ensaio de resistência à flexão para 100% de areia regenerada proveniente de sucata de macharia (misturas). ....	67
<b>Figura 47</b> - Resultados do ensaio de permeabilidade das misturas das amostras para provetes formados por 100% de areia regenerada. ....	68
<b>Figura 48</b> - Resultados do ensaio de dureza das misturas das amostras para provetes formados por 100% de areia regenerada. ....	69
<b>Figura 49</b> - Resultados dos ensaios de resistência à flexão para as novas formulações.....	70
<b>Figura 50</b> – Resultados do ensaio de permeabilidade para as novas formulações. ....	71
<b>Figura 51</b> - Resultados de dureza para novas formulações. ....	72
<b>Figura 52</b> - Machos formados por 5% de areia regenerada a) camisa de água b) corpo cilindro.....	73
<b>Figura 53</b> – Cárter-cilindro fabricado através de machos formados por 5% de areia regenerada a) vista de frente e b) vista de cima. ....	75



## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Relação entre o coeficiente de angularidade e a morfologia de grão, adaptado de [15]. .....	17
<b>Tabela 2</b> - Sistemas ligantes de resinas do processo caixa-fria (adaptado de [18]). .....	20
<b>Tabela 3</b> - Número do peneiro e abertura com o coeficiente multiplicativo correspondente para o cálculo do índice de finura AFS. ....	28
<b>Tabela 4</b> - Número do peneiro e abertura com o coeficiente multiplicativo correspondente para o cálculo da superfície específica teórica. ....	31
<b>Tabela 5</b> – Descrição das amostras a caracterizar. ....	44
<b>Tabela 6</b> - Cálculo do índice de finura AFS.....	49
<b>Tabela 7</b> - Determinação da superfície específica teórica .....	49
<b>Tabela 8</b> - Resultados obtidos na caracterização da areia base SP 55.....	50
<b>Tabela 9</b> - Resultados de permeabilidade e dureza para a areia base SP 55. ....	52
<b>Tabela 10</b> – Superfície específica teórica e real para as amostras de areia regenerada.....	57
<b>Tabela 11</b> - Resultados dos ensaios de determinação de carbonatos, humidade e perda ao fogo das amostras de areia regenerada e areia base SP 55. ....	61
<b>Tabela 12</b> - Valores dos ensaios realizados aos machos de ensaio e machos de produção (série). ....	75
<b>Tabela 13</b> - Análise mensal de custos para 5% de areia regenerada A.1. ....	76



# **CAPÍTULO I**

---

## **Introdução**





### 1.1. Enquadramento do trabalho

O presente trabalho insere-se no contexto curricular do Mestrado Integrado em Engenharia de Materiais da Universidade de Aveiro e foi desenvolvido na *Funfrap – Fundação Portuguesa, S.A.*, empresa do setor metalúrgico, que se dedica à produção de peças em ligas ferrosas através do vazamento do metal no estado líquido (fundido) para moldes de areia.

A fundição em areia verde (moldação perdida) manuseia uma quantidade colossal de areia que é em grande parte recuperada e reintroduzida no processo de fabrico. No entanto, este processo gera ainda quantidades significativas de areia descartada, aglomerada com resinas orgânicas, tóxicas para o ambiente. Num estudo realizado pela Associação Portuguesa de Fundição (APF) estimou-se que as indústrias de fundição de ferrosos geraram, em 2016, entre 60 000 e 80 000 toneladas de areia verde e entre 5 000 e 8 000 toneladas de areias de machos com aglutinantes orgânicos [1]. As areias de machos descartadas, que são posteriormente depositadas em aterro, surgem ao longo do processo de fabrico de machos. Provêm de leitos retidos nas tremonhas mais tempo do que o permitido devido a algum tipo de avaria ou paragem do processo de fabrico (endurecimento prematuro) e machos com defeitos, pintados ou não, que não podem ser utilizados nas etapas seguintes do processo de fabrico. É importante salientar que tais machos não estiveram em contacto com o metal.

Atualmente, a legislação força a diminuição da quantidade de areia com aglomerantes orgânicos depositada em aterro, para evitar contaminação dos solos, e em consequência os preços dessa deposição têm vindo a aumentar. Desta maneira, são necessárias soluções alternativas que minimizem estes custos e que obriguem ao tratamento da areia até agora descartada, por forma a permitir a sua reciclagem e reintrodução no ciclo de produção.

O estudo realizado teve como principal objetivo o desenvolvimento de novas formulações de areia de macho, formadas por areia de sucata de macharia que não esteve em contacto com ferro fundido, regenerada mecanicamente e areia virgem. Desta maneira, parte da areia que não seguia para o processo de fabrico é reutilizada. Este estudo revela-se particularmente interessante a nível ambiental, uma vez que há diminuição de areia depositada em aterro, mas também em

aspectos produtivos e económicos, visto que os custos da aquisição de areia virgem e os de deposição final em aterro irão diminuir.

A execução prática do trabalho dividiu-se em 9 Tarefas, tal como representado esquematicamente na Figura 1:

- inicialmente fez-se uma pesquisa bibliográfica sobre assuntos relacionados com o tema (Tarefa 1);

- seguidamente fez-se a recolha das amostras (areia base SP 55 e sucata de macharia) e procedeu-se à regeneração das amostras da sucata de macharia (Tarefas 2 e 3);

- na Tarefa 4 efetuaram-se ensaios de caracterização de areia virgem e da areia regenerada;

- a Tarefa 5 teve em conta os resultados dos ensaios da Tarefa 4 para a determinação das novas formulações de areia para o fabrico de machos;

- novas formulações foram posteriormente caracterizadas na Tarefa 6;

- na Tarefa 7 realizou-se o ensaio industrial com a formulação de areia mais favorável;

- na Tarefa 8 fez-se uma análise de custos com o intuito de verificar a possibilidade de colocar em prática o fabrico de machos com a formulação mais favorável;

- por fim, na Tarefa 9 fez-se uma análise geral dos resultados obtidos e extraíram-se as principais conclusões sendo delineados possíveis trabalhos futuros.

Estas tarefas são descritas ao longo deste documento que está dividido em 5 capítulos:

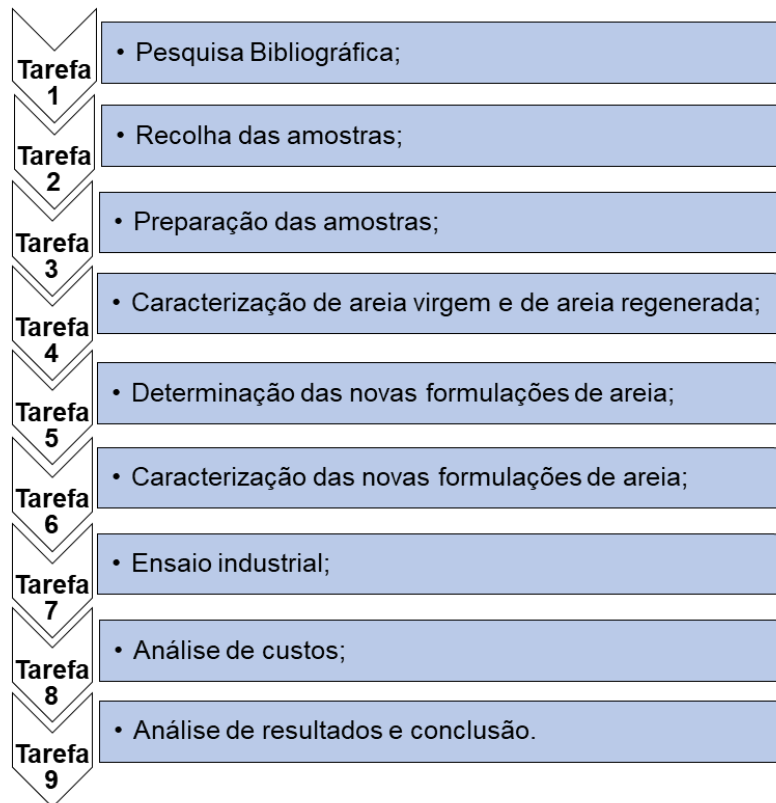
- no Capítulo I apresentam-se o enquadramento e os objetivos bem como a descrição sumária da empresa onde o estágio decorreu, o seu processo produtivo e as peças produzidas;

- o Capítulo II (Estado da Arte) apresenta conteúdos de natureza científica e tecnológica relevantes para o trabalho desenvolvido durante o estágio;

- no Capítulo III (Metodologia Experimental) são descritas as técnicas de ensaio e mencionados os equipamentos utilizados;

- no Capítulo IV (Resultados e Discussão) são apresentados e discutidos os resultados obtidos como se descreveu no capítulo anterior;

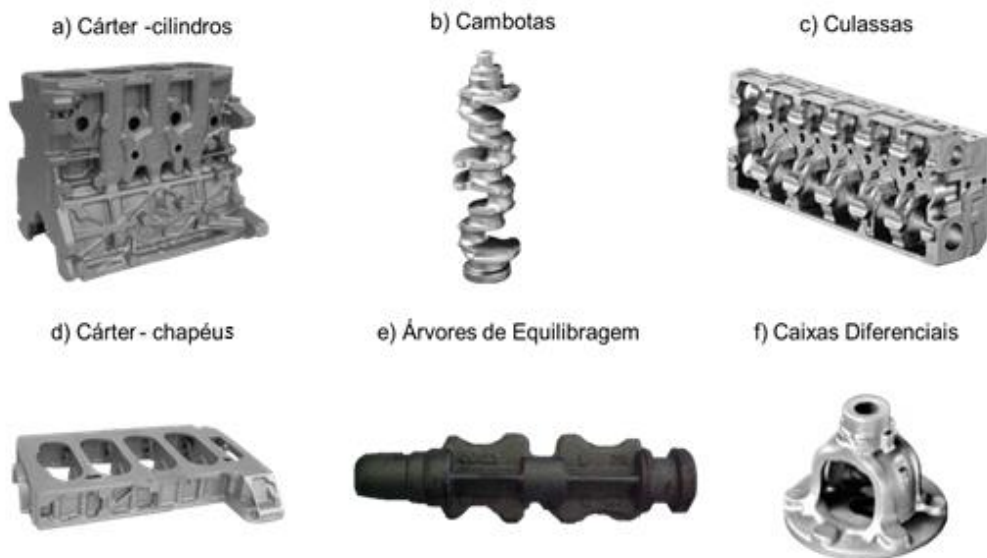
- por fim, no Capítulo V (Conclusões e Trabalhos Futuros) é feita uma análise geral dos resultados obtidos e são ainda mencionados alguns possíveis trabalhos futuros.



**Figura 1** - Tarefas realizadas ao longo do estágio curricular.

## 1.2. A empresa

A *Funfrap* – Fundição Portuguesa, S.A., localizada na zona industrial de Cacia, Aveiro, está inserida na multinacional italiana Teksid que conta com mais 6 fábricas situadas no México, China, Brasil (duas), Polónia e Itália. Fundada em 1984 é especializada no desenvolvimento e produção de vários tipos de componentes de ferro fundido (nodular e lamelar) para o setor automóvel, tais como cárter-cilindros (blocos de motor), cambotas, culassas, cárter-chapéus, caixas diferenciais e árvores de equilibragem (Figura 2). A capacidade de produção máxima é de 45 000 t/ano tendo como principais clientes a FCA, OMR-GM, Renault e PSA [2].



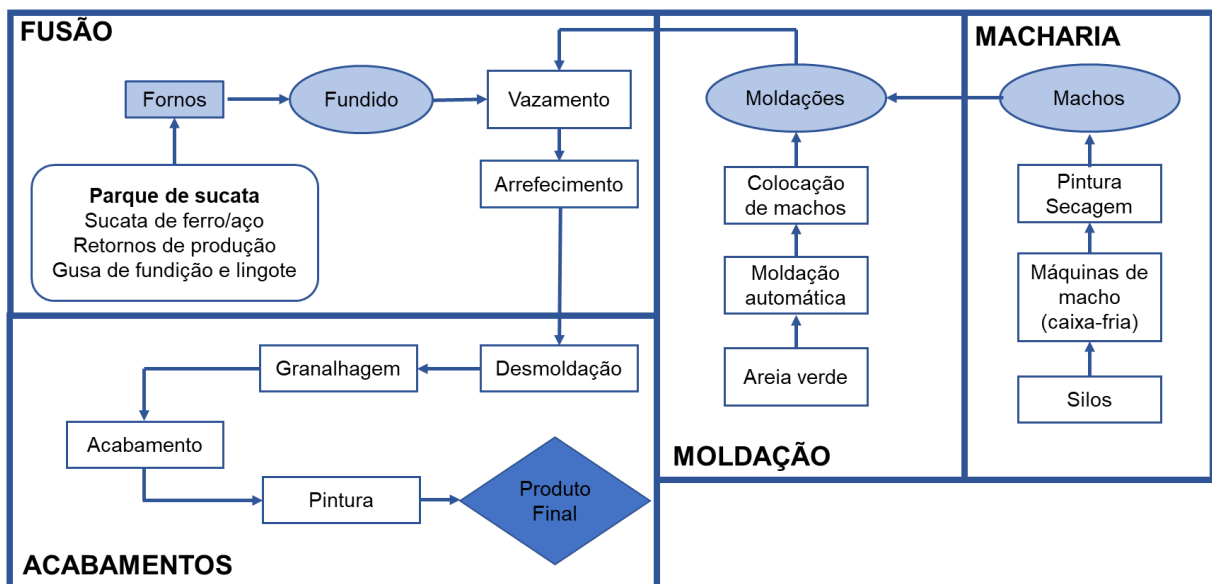
**Figura 2** - Peças produzidas pela *Funfrap* - Fundição Portuguesa, S.A.: a) cárter - cilindros; b) cambotas; c) culassas; d) cárter – chapéus; e) árvores de equilibragem; f) caixas diferenciais.

A *Funfrap* é certificada a nível de Qualidade pela norma IATF desde 2018. A recente norma veio substituir as normas ISO/TS 16949:2009 ao nível do Ambiente (implementada desde 2000), a norma ISO 14001 ao nível da Segurança e Saúde no Trabalho (implementada desde 2002), a norma OSHAS 18001, (implementada desde 2008) e a norma ISO 50001:2011 ao nível de Gestão de Energia (implementada desde 2012), em vigor anteriormente. Para além da certificação pela norma IAFT referida anteriormente, tem incorporada a metodologia WCM (World Class Manufacturing), com o objetivo de uma melhoria contínua através de 10 pilares: ambiente, energia, logística, gestão antecipada de equipamentos e

produtos, controlo de qualidade, manutenção preventiva, manutenção autónoma, melhoria focalizada, análise de custos e segurança.

### 1.3. Processo produtivo

O processo produtivo da empresa (Figura 3) é o de moldação em areia (moldação perdida e modelo permanente) e está dividido em 4 setores: fusão, moldação, macharia e acabamentos. A liga metálica é levada até à fusão e o metal líquido é vazado para moldações em areia verde, com ou sem machos de areia ligada quimicamente, onde arrefece e solidifica. Terminado o processo de solidificação, a moldação é abatida (moldação perdida) para se retirar a peça, e o mesmo modelo (permanente) é utilizado para a produção de novas moldações. Na preparação de areias de moldação, é utilizada parte da areia verde proveniente do abate e areia ligada quimicamente originária dos machos incorporados nas moldações, o que exige um tratamento prévio de acerto de propriedades. No entanto, após algumas utilizações a areia perde as características desejáveis, sendo por isso, compensada por areia nova que entra no circuito [3].



**Figura 3** - Fluxograma do processo produtivo da *Funfrap* - Fundição Portuguesa, S.A..

A indústria de fundição tem um papel central na reciclagem de resíduos de metais, uma vez que estes podem ser refundidos em produtos novos mantendo as características das peças obtidas a partir de matéria-prima primária.

### 1.3.1. Fusão e vazamento

As matérias-primas para a fusão (sucata de ferro/aço, retornos da produção, gusa de fundição e lingote) estão armazenadas no parque de sucatas e são retiradas através de um eletroímã para contentores suspensos que alimentam telas transportadoras vibratórias que, por sua vez, alimentam os fornos de indução com uma carga máxima de 7,3 toneladas cada um, onde o metal é fundido. O metal fundido é vazado dos fornos por basculamento para uma colher com capacidade de 1,5 toneladas na qual se efetua a inoculação com ferro-ligas. Seguidamente, o metal é transferido para o sistema automático de vazamento Mezger, onde é efetuado o enchimento das moldações [4].

Nesta fase o metal líquido deve apresentar a fluidez (vazabilidade) adequada para o enchimento completo das cavidades interiores da moldação. Para uma fluidez adequada é necessário o controlo da composição da liga (ligas com composição próxima do ponto eutético apresentam melhor fluidez) e uma temperatura de vazamento superior à de fusão completa (temperatura de sobreaquecimento), bem como o pré-aquecimento das moldações. A baixa rugosidade dos canais e das superfícies da moldação são fatores relevantes que também melhoram esta propriedade. Pelo contrário, uma baixa permeabilidade da moldação dificulta a permuta de gás/ar provocando um aumento da pressão à entrada do metal nos canais e, conseqüentemente, restringe o influxo de metal [5].

### 1.3.2. Macharia

Na macharia da *Funfrap* (Figura 4), que é considerada a “alma” da fundição, são produzidos os machos, utilizando areia e ligantes orgânicos. Os machos são colocados dentro da moldação, permitindo a formação das cavidades interiores da peça final. Por exemplo, na fabricação de blocos de motor, aqueles originam as condutas de lubrificação e de passagem de água de arrefecimento.

Nesta secção localiza-se 1 silo de armazenamento de areia siliciosa com capacidade de 250 toneladas, 7 misturadores para preparação de areias, 10 máquinas de machos de caixa fria, 6 estufas de secagem de machos, 9 instalações de robot de pintura, montagem e carga/descarga e 1 torre de lavagem e neutralização de dimetiletilamina (DMEA) [4].

São processadas cerca de 100 toneladas de areia siliciosa por dia, que chegam em camiões cisterna e são depositadas no silo de areia nova através de um sistema pneumático. A areia é transportada do fundo do silo através de um elevador para um tapete transportador, de onde segue para outro tapete que alimenta as tremonhas que, por sua vez, alimentam os misturadores.



**Figura 4** - Macharia da *Funfrap* - Fundação Portuguesa, S.A.

Nestes misturadores, à areia siliciosa são adicionadas resinas (Figura 5) e outros aditivos e a mistura alimenta as tremonhas das máquinas de fabricação de machos. Nos misturadores Fortdath, as resinas e os aditivos são colocados manualmente pelo operador que, após preparada a mistura, a coloca num “charriot” e a transporta para a tremonha que pretende alimentar. O misturador Laempe e os restantes são alimentados automaticamente com a areia, resinas e aditivos.

Após a compactação da areia nas máquinas de machos, é utilizado para a consolidação um agente catalisador, a dimetiletilamina (DMEA). Esta chega à *Funfrap* no estado líquido em botijas que são ligadas ao circuito de distribuição da amina. Depois de misturada com o ar e aquecida, atravessa a areia sob a forma de um gás, provocando a polimerização das resinas e o conseqüente endurecimento químico. As emissões provenientes das máquinas de machos durante este processo são encaminhadas para a torre de lavagem e neutralização da DMEA (utiliza-se ácido sulfúrico) [4]. Por fim, ocorre a lavagem por ar comprimido (entrada de ar e saída pelos filtros). A quantidade de amina gaseificada utilizada depende do tipo de macho a fabricar e da máquina.



**Figura 5** - Resinas da secção da macharia: *Isocure 340* (laranja) e *Isocure 640* (amarelo).

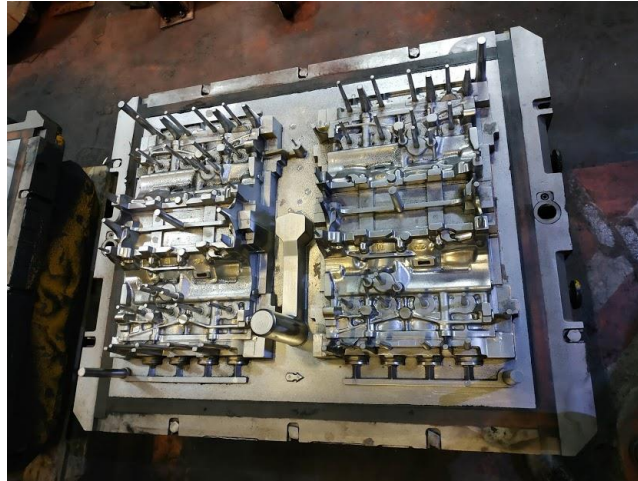
Os machos obtidos são depois pintados com uma tinta de base aquosa que reveste o macho proporcionando-lhe elevada qualidade de acabamento superficial, refratariedade e impermeabilização face ao metal líquido. Desta forma a reação química na interface areia/metal durante o vazamento é dificultada e, conseqüentemente, há diminuição dos defeitos na peça final [6]. Por fim, os machos são levados para as estufas de secagem. O tempo de secagem varia de 40 a 62 minutos a temperaturas de 140 a 200 °C, após o que ficam prontos a serem utilizados na moldação. Pode ainda existir montagem de machos formando-se um conjunto de machos.

### **1.3.3. Moldação**

Nesta secção ocorre a preparação de areia verde, formada por areia siliciosa, bentonite, pó de carvão e água, e o fabrico das moldações. As moldações são fabricadas numa máquina automática de moldar por compactação a alta pressão utilizando placas modelo em aço, ilustradas na Figura 6, e chassis (estrutura que suporta a areia). Posteriormente são colocados os machos e as moldações são fechadas, seguindo para o vazamento. Finalizado o vazamento, as



moldações passam para a zona de arrefecimento e, por fim, para a zona de separação de chassis e abate [4].



**Figura 6** - Placa modelo em aço.

A preparação de areia verde permite a recuperação de grande parte da areia usada após o abate das moldações. Ainda assim, cerca de 100 toneladas de areia por dia são retiradas do circuito e seguem para aterro. A retirada da areia após abate compensa, de certo modo, a introdução de areia virgem na macharia mantendo aproximadamente constante a quantidade de areia em circulação. O principal objetivo da preparação de areia verde é a recuperação das propriedades perdidas durante o vazamento pelo contacto areia-metal. O acerto das propriedades inclui várias operações, como eliminação de partículas de ferro, arrefecimento de areia, pré-humidificação e ajuste da quantidade de bentonite e de pó de carvão. A areia dos machos presentes nas moldações é reutilizada na formação de novas moldações de areia verde sem ser sujeita a qualquer outro tipo de regeneração [4].

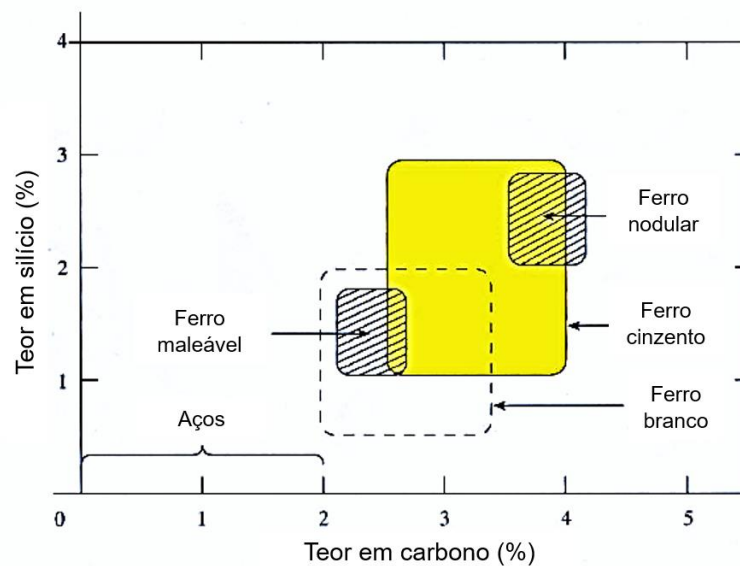
#### **1.3.4. Acabamentos**

Após a solidificação e desmoldação das peças, estas seguem para os acabamentos. Em geral, as peças são sujeitas ao corte dos gitos e limpeza por jato de granalha de aço. Dependendo do tipo de peça a produzir, outras operações podem estar incluídas nos acabamentos, tais como rebarbagem manual ou

mecânica e pintura [4]. Ao longo dos acabamentos é efetuado um controlo de qualidade.

#### 1.4. Ferro fundido

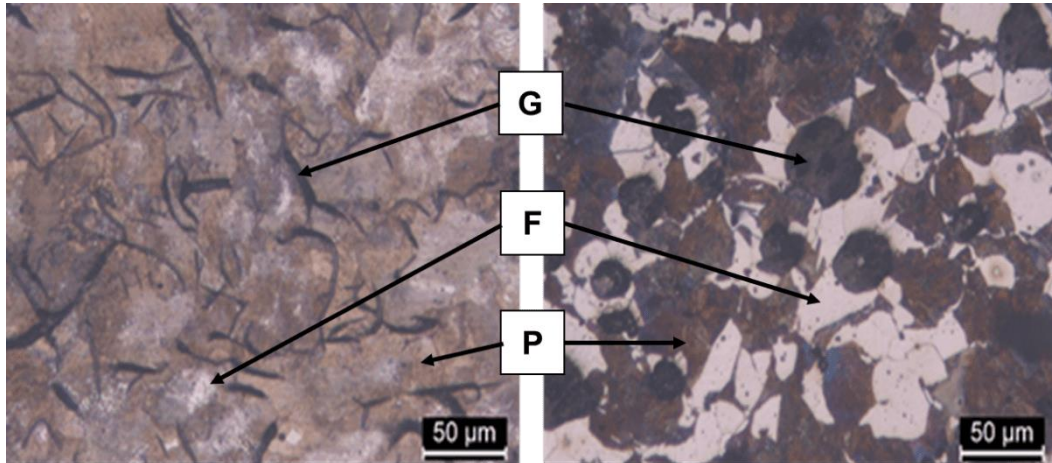
Os ferros fundidos pertencem à grande família das ligas ferrosas de composição química e microestrutura variáveis. O componente principal é o ferro, mas estas ligas contêm também carbono e silício, cujos teores permitem classificá-las em quatro categorias: cinzento (ou lamelar), branco, maleável e nodular (ou dúctil). A Figura 7 representa a variação do teor em carbono e silício nos vários tipos de ferro fundido [7]. O carbono pode aparecer na microestrutura na forma de cementite ( $Fe_3C$ ) ou na forma de grafite. A cementite é um composto metaestável e, sob determinadas condições, dissocia-se em ferro e grafite [7]. A **Figura 8** ilustra as microestruturas típicas do ferro fundido lamelar (à esquerda) e do nodular (à direita), que correspondem a peças produzidas na *Funfrap*.



**Figura 7** - Variação do teor em carbono e silício nos ferros fundidos (Adaptado de [8]).

No ferro fundido lamelar a grafite existe sob a forma de flocos que são normalmente circundados por uma matriz de ferrite ou de perlite. Esta liga apresenta baixa resistência ao choque (tenacidade à fratura) devido à sua microestrutura. As pontas dos flocos de grafite são pontiagudas e direcionadas, podendo atuar como locais de concentração de tensão. No entanto, estas ligas são

muito eficientes no amortecimento de vibrações e têm alta resistência ao desgaste. Além disso, apresentam elevada fluidez no estado líquido e apresentam o mais baixo custo de todos os materiais metálicos [9].



**Figura 8** - Microestruturas típicas do ferro fundido lamelar (à esquerda) e nodular (à direita) com matriz mista (ferrítica-perlítica). G – grafite; F – ferrite; P - Perlite.

A microestrutura característica do ferro fundido nodular, designada por “olho de boi” devido à formação de nódulos de grafite (grafite esferoidal), resulta do processo de nodularização e inoculação. A nodularização ocorre através da adição, após a fusão, de uma liga de magnésio (agente nodularizante) que é responsável pela formação da grafite esferoidal. O processo de inoculação é feito através da adição de ligas de silício e lantânio (inoculantes) que evitam a formação de uma microestrutura com carbonetos. Além disso também aumentam o número de nódulos de grafite, melhorando a homogeneidade, auxiliando na formação de ferrite e conseqüentemente, promovendo a ductilidade [5,6].

A matriz deste tipo de ferros pode ser ferrítica, perlítica ou mista (ferrítica-perlítica), dependendo da velocidade de arrefecimento. Na *Funtrap*, o ferro nodular de matriz perlítica é utilizado na produção de árvores de equilíbrio e cambotas. A matriz mista, obtida por arrefecimento moderado, é característica das caixas diferenciais. No ferro lamelar, a matriz perlítica é característica dos cárter-chapéus, dos cárter-cilindros e das culassas.



## **CAPÍTULO II**

---

### **Revisão do Estado da Arte**



O processo de moldação em areia pode envolver duas categorias de areia, de acordo com o tipo de ligante utilizado para a aglomerar. As areias “verdes” ou ligadas inorganicamente são as mais utilizadas na construção das moldações e são formadas por areia, aglomerante natural (argilas), outros aditivos como pó de carvão (evita que a sílica reaja com o metal líquido criando uma barreira redutora) e água. Neste tipo de areias existe quantidade suficiente de ligante (argila) para endurecer a areia quando misturada com a água. Por outro lado, a areia com ligantes orgânicos contém pouco ou nenhum ligante inorgânico, sendo muitas vezes utilizadas resinas para a aglomeração e processos auto-secativos a frio para o endurecimento da areia. Assim, as areias têm a nomenclatura industrial de orgânicas e inorgânicas de acordo com o tipo de ligante utilizado. As areias que utilizam ligantes como argila, silicato de sódio e gesso são inorgânicas e as areias que usam resinas ou óleos são orgânicas. Devido às elevadas temperaturas durante o processo de solidificação do metal, os orgânicos são destruídos por volatilização, combustão ou decomposição. Por outro lado, os ligantes inorgânicos são mais resistentes a altas temperaturas, podendo ocorrer sinterização, se o ligante for argila, ou vitrificação, se o ligante for silicato de sódio [3]. No caso dos machos, a areia é aglomerada com ligantes orgânicos (resinas sintéticas). Entre as características mais importantes dos machos destacam-se a resistência mecânica, a permeabilidade e o acabamento superficial. Na indústria de metais ferrosos, a areia base, principal constituinte dos machos, deve satisfazer um conjunto de propriedades que varia segundo o processo de fabrico daqueles, nomeadamente a refratariedade, o tamanho e a morfologia de grão, a expansão térmica (dilatação), o pH, o valor de acidez (acid demand value, ADV) e o teor em carbonato de cálcio.

### **2.1. Características dos Machos**

Os machos (Figura 9), como referido anteriormente, são os componentes responsáveis pelas cavidades das peças metálicas e são produzidos na secção da macharia. Nesta secção, é feita a mistura de areia, resinas e aditivos químicos que lhes conferem valores elevados de resistência mecânica e refratariedade. A resistência mecânica é muito importante uma vez que o macho deverá suportar a pressão exercida pelo metal fundido, devendo manter a sua integridade durante o

vazamento. A adição de aglomerantes à areia tem como principal objetivo permitir ligar as partículas compactadas na forma desejada e garantir a resistência mecânica do compacto facilitando, assim, o manuseamento e transporte dos machos. A quantidade de aglomerantes utilizada depende principalmente da granulometria da areia.



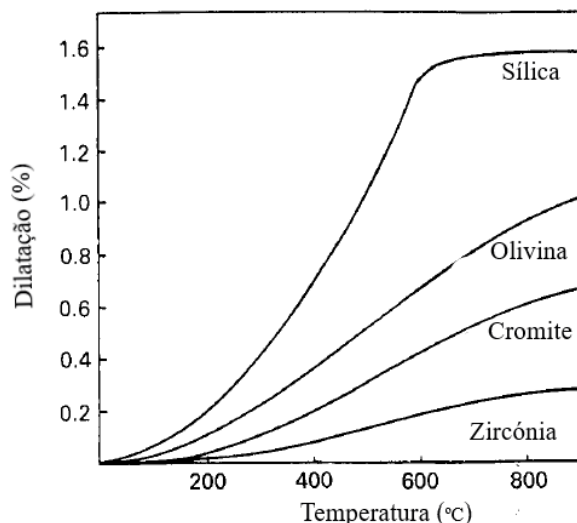
**Figura 9** - Exemplo de machos produzidos pela *Funfrap* – Fundição Portuguesa, S.A. [2].

A refratariedade dos machos (entende-se que refratários são materiais capazes de suportar sem fundir, amolecer ou deformar, temperaturas de pelo menos 1500 °C) é essencialmente conferida pelo tipo de areia usada, cuja seleção é determinada pela temperatura de vazamento da liga em questão. Na indústria de fundição de ferro é comum a utilização de areia à base de quartzo devido à sua elevada refratariedade (o ponto de fusão da sílica pura é cerca de 1710 °C), abundância na crosta terrestre e, conseqüentemente, ao seu baixo custo. Na fundição de ferro fundido são utilizadas areias com elevado grau de pureza uma vez que a presença de impurezas químicas baixa a temperatura inicial de fusão [10].

Além da refratariedade, a expansão térmica (dilatação) é um fator importante para as areias de sílica. No aquecimento, a uma temperatura de cerca de 573 °C verifica-se a transformação alotrópica de quartzo  $\alpha$  em quartzo  $\beta$  que ocorre com um rápido aumento de volume, provocando a expansão dos grãos de areia que poderá resultar em defeitos de fundição. Existem outros tipos de areias que apresentam menores coeficientes de dilatação e melhor refratariedade, no



entanto as areias de sílica são de baixo custo e apresentam propriedades suficientes para a grande maioria das aplicações na fundição. A Figura 10 compara a dilatação de algumas areias usadas em fundição, incluindo as areias de sílica [3].



**Figura 10** - Dilatação de algumas areias de fundição, adaptado de [11].

Outras características dos grãos da areia, nomeadamente a distribuição de tamanhos e a morfologia, condicionam a permeabilidade e o acabamento superficial conferido às peças. A permeabilidade permite a eliminação de ar e de gases provenientes da decomposição de compostos orgânicos durante a exposição à temperatura de vazamento, que são libertados através dos respiros da moldação, mas, principalmente, através dos poros da areia compactada. Porém, uma permeabilidade elevada que facilite a permuta de gás através dos machos, pode levar à penetração do metal fundido na peça e originar um mau acabamento. Pelo contrário, uma baixa permeabilidade permite um bom acabamento superficial, mas pode gerar defeitos nas peças e comprometer a qualidade da peça final, se o ar não for libertado na totalidade [2,5,8]. Idealmente, não deverá haver penetração do metal entre os grãos de areia e as “areias de contacto” entre a peça e a moldação deveriam ser de grão fino de forma a diminuir a rugosidade superficial da peça vazada. Pelo contrário as “areias de enchimento” deveriam ser de grão grosso de modo a melhorar a permeabilidade.

Para a produção de uma peça deve ter-se em consideração um compromisso destas características da areia que produzem resultados antagônicos [3].

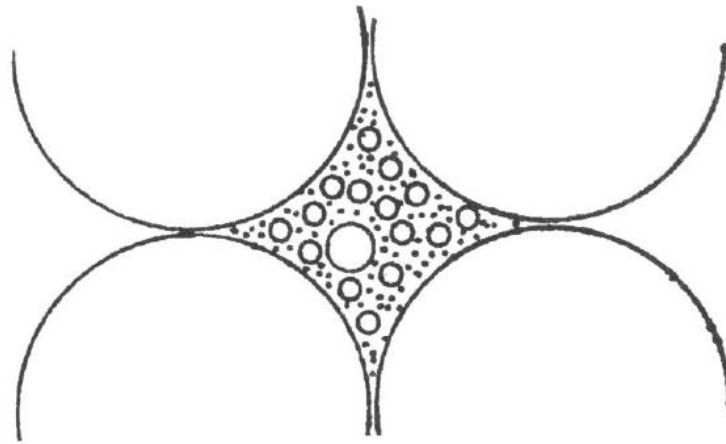
Por último, o macho também deve ter baixa dilatação térmica de forma a evitar alterações dimensionais na peça e deve ainda ser facilmente desintegrável após a solidificação do metal, facilitando deste modo a remoção da areia [7,8].

## **2.2. Características da areia**

### **2.2.1. Tamanho e morfologia dos grãos**

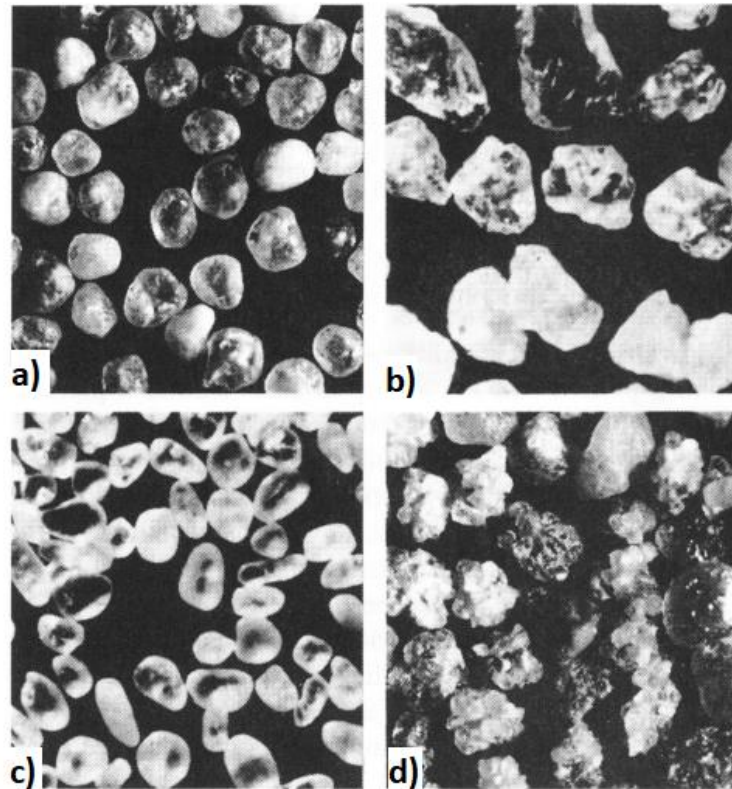
A granulometria de um determinado produto define-se como a medida das dimensões das partículas que o constituem. O índice de finura tal como proposto pela American Foundry Society (AFS) é calculado a partir da granulometria e é proporcional à área de superfície específica. Quanto maior for o índice de finura, mais fina é a areia e vice-versa. Esta propriedade dos grãos de areia influencia a facilidade de escoamento e, portanto, a facilidade para reproduzir o modelo ou encher a caixa de machos, a compactabilidade e, portanto, a permeabilidade da forma compactada (moldação ou macho), a qualidade superficial do fundido e a resistência mecânica da moldação ou macho. Na indústria de fundição de ferro é comum a utilização de areia de sílica com o índice de finura AFS entre 50 e 60 [6].

O espaço entre grãos aumenta à medida que aumenta o tamanho destes. Assim, quanto maior o tamanho de grão, maior será a permeabilidade. Os grãos de maior dimensão também não necessitam de tanta quantidade de aglomerante em comparação com grãos de menor dimensão, uma vez que a superfície específica diminui com o aumento do tamanho de grão. Ou seja, para se atingir a resistência mecânica desejada, as areias de grãos finos necessitam de maior quantidade de aglomerante. A distribuição dos tamanhos de grão é um fator influente tanto na permeabilidade como na quantidade de aglomerante. Numa areia formada por grãos de diferentes tamanhos e com muitos finos, os grãos de menor dimensão preenchem os vazios entre os grãos de maior dimensão, resultando numa baixa permeabilidade comparativamente à areia que contenha todos os grãos do mesmo tamanho, e consegue-se obter resistência mecânica mais elevada com a mesma quantidade de aglomerante (Figura 11) [8,9].



**Figura 11** - Grãos de pequena dimensão a ocupar o espaço entre os grãos de maior dimensão [12].

A Figura 12 representa os quatro tipos de forma de grão: arredondada, angular, sub-angular e composto. O tamanho de grão e a sua morfologia determinam a superfície específica, definida como o total da área de superfície dos grãos contidos na massa unitária. As areias de grãos arredondados são as mais utilizadas no fabrico de machos uma vez que, comparativamente aos grãos angulares, os arredondados têm uma menor área de contacto entre grãos e são cobertos por uma camada superficial uniforme de aglomerante, necessitando menor quantidade de aglomerante [11]. Para além disso, os grãos de forma mais angular sofrem maior desgaste, dando origem a finos e a propriedades imprevisíveis dos machos. As propriedades da areia de grãos sub-angulares estão entre as das areias dos grãos descritos anteriormente. Já os grãos compostos, são formados pelo conjunto dos três tipos de grãos.



**Figura 12** – Morfologia de grãos de areia: a) arredondada; b) angular; c) sub-angular; d) composto [12].

A morfologia do grão pode ser avaliada pela visualização através de um microscópio ou medida como coeficiente de angularidade (Tabela 1) que corresponde ao quociente entre a superfície específica real e superfície específica teórica (de grãos esféricos com a mesma dimensão) [14].

**Tabela 1** - Relação entre o coeficiente de angularidade e a morfologia de grão, adaptado de [15].

Morfologia	Coefficiente de angularidade
esfera	1
arredondada	1,2 a 1,4
Angular	>1,4

### **2.2.2. pH e valor de acidez (ADV)**

Nas areias que vão ser quimicamente ligadas e irão contactar com catalisadores ácidos, é necessário ter em conta os álcalis já presentes na areia base antes da adição dos ligantes. Através da medição do pH é possível avaliar a acidez e a alcalinidade da areia (areias de sílica livres de impurezas têm o pH próximo de 7), característica muito importante no processo de produção de machos pois deve ser compatível com o aglomerante utilizado. Como as medições de pH são apenas influenciadas por substâncias solúveis é necessário recorrer ao teste do valor de acidez (acid demand value ou ADV), que permite avaliar também a presença de impurezas insolúveis [11]. O ADV é um parâmetro da areia que deve ser controlado pois afeta a quantidade de catalisador (amina) utilizado durante a conformação de machos. Assim, dependendo da composição química da areia, esta vai necessitar de mais ou menos catalisador. Areias mais alcalinas, ou seja, com ADV superior a 6 ml, tendem a reagir com o catalisador ácido, reduzindo a reação resina-catalisador; além disso as substâncias alcalinas também reduzem a refratariedade da areia. As impurezas afetam tanto o ADV como o pH e, conseqüentemente, a qualidade da areia, dificultando a adesão das resinas aos grãos da areia. Isto leva ao aumento do consumo de resinas, a baixas resistências mecânicas após cura e à redução da vida de bancada. Na areia de fundição regenerada é comum haver alteração nos valores de pH e ADV. As resinas orgânicas e os aditivos que acabam no sistema de areia podem alterar a acidez e a basicidade desta [6,17].

### **2.2.3. Carbonato de cálcio**

A presença de carbonato de cálcio na areia também deve ser controlada. Durante o vazamento pode ocorrer a decomposição deste mineral a temperaturas próximas de 927 °C, originando a libertação de CO<sub>2</sub> e deixando na areia CaO (óxido de cálcio), que altera a acidez ou a basicidade da areia. Quando a areia é reutilizada, este composto é solúvel em água e torna-se um cimento higroscópico reativo que forma ligações fracas e pode interromper a ligação das cadeias poliméricas dos ligantes, levando à perda da resistência mecânica do macho

durante o vazamento. A quantidade de CaO é medida através da quantidade de CaCO<sub>3</sub> equivalente [17].

### **2.3. Processo caixa fria (cold box)**

São vários os sistemas ligantes utilizados na indústria da fundição. A seleção do processo de moldação e do tipo de ligante depende do tamanho e do tipo de machos ou moldações necessárias, do tempo disponível, depois de preparada a mistura da areia com o ligante, para produzir a moldação ou macho sem alteração das propriedades mecânicas (tempo de bancada), do tempo que é necessário para que a moldação ou macho ganhem resistência suficiente para uma desmoldação sem deformação (tempo de cura) e do equipamento, bem como de outros fatores relativos à qualidade final da peça vazada e impacto ambiental. Para um sistema ideal o tempo de cura deve ser o menor possível e, pelo contrário, o tempo de bancada o maior possível, permitindo assim uma elevada produção com o mesmo equipamento.

Os processos de fabrico de machos são geralmente classificados segundo o mecanismo de cura e o tipo de ligante utilizado [18]. Existem três tipos de processos de fabrico de machos: cura a frio, caixa fria e caixa quente. O processo de cura a frio é um processo de reação imediata. A areia, os aglomerantes e o agente de cura são misturados previamente antes de serem calcados sobre os modelos ou nas caixas de machos. Pelo contrário, no processo de caixa fria, a areia e os aglomerantes são misturados em primeiro lugar e somente após serem encalçados é que é introduzido o agente de cura. Ambos os processos se realizam à temperatura ambiente. O processo de caixa quente é semelhante ao de caixa fria mas exige a aplicação de calor para a cura do aglomerante [3].

Designa-se por processo de caixa fria (cold box) qualquer processo de cura de mistura de areias aglomeradas com resinas à temperatura ambiente, através de um agente de cura que pode ser introduzido sobre a forma de um gás ou vapor. Os vários sistemas usados em processos de caixa fria encontram-se na Tabela 2. A velocidade de cura nestes processos é elevada, pois as reações químicas são quase instantâneas. Por esta razão, é essencial a distribuição

uniforme do gás catalisador pela areia através de canais de gaseificação das caixas de macho, de forma a garantir a qualidade final do macho e da peça fundida [10,11].

A presença de água neste tipo de sistemas ligantes considera-se prejudicial pois afeta o endurecimento e a aglomeração química da areia e, conseqüentemente, leva à perda de resistência mecânica do macho. A humidade em areias ligadas através de orgânicos (resinas) deve ser inferior a 1% [20].

**Tabela 2** - Sistemas ligantes de resinas do processo caixa-fria (adaptado de [18]).

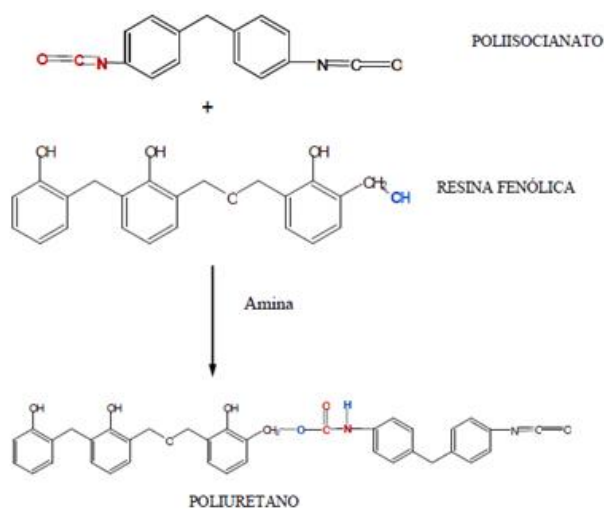
<b>Caixa fria – Cold box</b>					
Fenólico - uretânico/amina	Epóxi – acrílico / SO <sub>2</sub>	Furânico / SO <sub>2</sub>	Fenólico / éster	Fenólico / CO <sub>2</sub>	Silicato / CO <sub>2</sub>
Reação resina fenólica + isocianato (amina “gasada”)	Formação de ácido forte por oxidação (SO <sub>2</sub> “gasado”)	Formação de ácido forte por oxidação (SO <sub>2</sub> “gasado”)	Reação com éster (metil formiato “gasado”)	Reação com CO <sub>2</sub> “gasado”	Desidratação + reação com ácido (CO <sub>2</sub> “gasado”)

O sistema utilizado, atualmente, pela *Funfrap* para a fabricação de machos é o de caixa fria fenólico-uretânico. Este sistema, também conhecido como processo “Ashland” ou “Isocure”, utiliza um sistema de três componentes [3]: a parte I, que é uma resina de fenol-formaldeído dissolvida numa mistura de solventes, a parte II, que é um isocianato polimérico dissolvido numa mistura de solventes, e a parte III, que é um catalisador de Amina – Dimetiletilamina (DMEA).

Primeiramente a areia é misturada com a parte I e com a parte II e posteriormente é moldada e consolidada num molde à temperatura ambiente (20 a 25 °C). A parte III, catalisador de amina, é introduzida sob a forma de um vapor originando a formação de um aglomerante de uretano. O mecanismo de cura correspondente a este processo representa-se na Figura 13 [2,4].

Neste processo, a reação ocorre em meio básico pelo que a utilização de uma areia ácida irá neutralizar o catalisador, anulando o seu efeito durante o mecanismo de cura. Por outro lado, os componentes alcalinos eventualmente presentes aceleram a reação entre as partes 1 e 2. Ambos os casos levam a uma

diminuição da vida de bancada, sendo o ideal a utilização de uma areia com pH neutro.

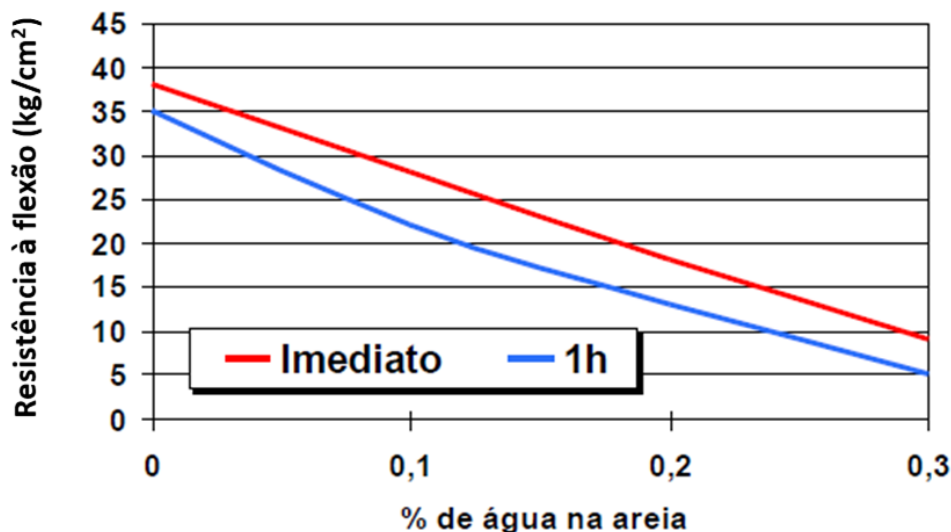


**Figura 13** - Mecanismo de cura para o sistema fenólico-uretânico / amina (cold-box) [21].

A temperatura referida anteriormente deve ser respeitada pois, se for superior a 25 °C não é necessária tanta quantidade de catalisador, mas há redução na eficiência da mistura e aumento do tempo de cura. Pelo contrário, se for inferior a 25 °C é conveniente a adição de maior quantidade de catalisador, resultando no aumento do tempo de cura e emissões atmosféricas.

A humidade é outro dos parâmetros que deve ser controlado neste sistema, uma vez que a água pode reagir com o isocianato, tendo um impacto negativo no tempo de bancada e, conseqüentemente na resistência mecânica dos machos. Na Figura 14 verifica-se o decréscimo da resistência à flexão com o aumento da percentagem de humidade no imediato e uma hora após cura. Com o aumento da temperatura, o valor limite da humidade deve ser inferior e vice-versa. A uma temperatura de 32 °C, o teor em humidade não deve exceder 0,1%. Para uma temperatura de 21 °C, o valor de humidade não deve exceder 0,2% [21]. Este processo apresenta algumas vantagens, nomeadamente o facto de ter grande aplicação no fabrico de séries longas e produção automatizada de machos, elevada precisão dimensional, bom acabamento superficial e possibilidade de produção de machos de geometria complexa [3,4].





**Figura 14** - Influência da porcentagem de umidade na resistência à flexão dos machos [21].

Para além das resinas, muitas vezes são utilizados outros aditivos químicos na produção de machos por possibilitarem o ajuste da resistência à umidade da areia, do tempo de bancada da mistura e a melhoria do acabamento superficial. Ao selecionar um aditivo, é necessário conhecer as interações deste com o restante sistema ligante para que seja possível manter as propriedades mecânicas desejadas [22].

Para este sistema os valores de resistência mecânica podem variar de 2 a 4 MPa [23].

#### 2.4. Areia rejeitada

Na indústria de fundição são gerados resíduos sólidos entre os quais se destacam as areias e os finos provenientes do despoeiramento da areia, por serem os mais preocupantes a nível ambiental. Da produção de machos surgem resíduos (cargas descartadas e machos não vazados com e sem tinta) que têm na sua constituição aglomerantes orgânicos (resinas). Se a quantidade destes for significativa, os resíduos apresentam um nível de toxicidade que os torna perigosos. Estes resíduos são enviados para aterros controlados cujo custo de deposição varia conforme legislação que regula esta prática.

Uma vez que os aterros estão muitas vezes situados a uma distância considerável da fábrica, o transporte de resíduos constitui um ponto negativo para esta prática, pois o custo do transporte soma-se aos custos de deposição em aterro. Perante isto, as empresas procuram medidas que minimizem estes custos. Uma das hipóteses passa pela regeneração da areia de macho atualmente rejeitada com o objetivo de a reincorporar juntamente com areia virgem. Deste modo, haverá uma diminuição da quantidade de areia depositada em aterro, dos custos de transporte e da compra de matéria-prima primária (areia virgem).

A legislação atual relativa aos resíduos conjectura a possibilidade da aplicação dos conceitos “fim do estatuto de resíduo” ou “subproduto” a materiais residuais, de acordo com condições e circunstâncias estabelecidas. As designações são definidas pelo Decreto-Lei n.º 73/2011 que transpõem a diretiva relativa aos resíduos nº 2008/98/CE, do parlamento Europeu e do Conselho [24]. O Decreto-Lei n.º 75/2015, que aprova o Regime de Licenciamento Único de Ambiente, e o Decreto de Lei n.º 73/2015, que aprova o Sistema da Indústria Responsável, permitiram a introdução de resíduos em substituição de matérias-primas naturais no processo tecnológico das indústrias [25].

## **2.5. Regeneração de areia**

O processo de regeneração de resíduos sólidos tem como finalidade a aproximação das propriedades do material regenerado às do material “virgem”, permitindo a sua reutilização. No caso das areias de machos, o tipo de tratamento de regeneração distingue-se segundo o princípio de atuação, considerando-se assim quatro tipos de processos: mecânico, térmico, biológico e físico.

O tratamento ideal para a regeneração de areia ligada quimicamente seria o termomecânico. Este processo de regeneração inicia-se pela desagregação de torrões, removendo parte da camada de resina seguindo-se a regeneração térmica onde ocorre a combustão da resina à volta dos grãos a temperaturas elevadas, permitindo o fabrico de machos constituídos por 100% de areia regenerada. Pelo contrário, a regeneração mecânica é a forma mais económica de regenerar a areia com alto teor em sílica e que ainda tem resina na sua

constituição. Neste trabalho apenas foi realizado tratamento mecânico, visto ser esse o equipamento eventualmente disponível para o efeito na empresa.

No geral, a regeneração de areia de macharia passa por etapas semelhantes às da regeneração de areia verde [26], designadamente:

- 1) Desagregação de torrões (destorroamento);
- 2) Limpeza superficial dos grãos (aglomerantes, aditivos);
- 3) Aspiração de finos (despoeiramento).

O equipamento usado envolve essencialmente uma placa cujo movimento, ao provocar o impacto e atrito de grãos contra grãos ou de grãos contra paredes do equipamento, leva à desagregação da areia. Este processo tem como consequência a alteração da granulometria. Além da produção de finos, a incapacidade de desagregação total é também um fator negativo [27].



## **CAPÍTULO III**

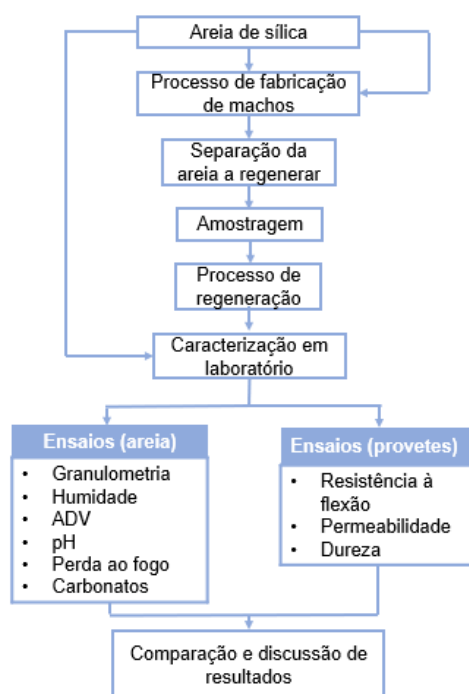
---

## **Metodologia Experimental**



Nas indústrias tradicionais mais antigas e, portanto, mais conservadoras, é comum a utilização, na caracterização de matérias-primas e produtos, de técnicas também mais antigas e, por isso mesmo, mais estabelecidas. Hoje em dia, técnicas clássicas como são as da química húmida ou a microscopia ótica, são cada vez mais substituídas por técnicas mais instrumentadas, como a fluorescência de raios X, para a determinação da quantidade de CaO, ou técnicas de BET (Brunauer, Emmett, Teller) e microscopia electrónica (SEM, scanning electron microscopy) para a determinação da área superficial e morfologia de grão. Por se tratar de um estágio industrial, neste trabalho seguiu-se o procedimento adotado na empresa.

A parte experimental iniciou-se pela caracterização da areia padrão utilizada na *Funfrap*. De seguida procedeu-se à recolha de amostras de areia de sucata de machos, à sua regeneração e à caracterização da areia regenerada. Os valores obtidos nos ensaios de caracterização da areia padrão serviram de comparação com os valores obtidos na caracterização da areia regenerada e das misturas das duas, com o intuito de concluir qual das amostras se aproximava mais das características da areia padrão (base) (Figura 15).



**Figura 15** - Fluxograma de caracterização das areias e provetes.

Segundo os procedimentos experimentais internos da *Funfrap* para o controlo granulométrico, seria necessária a determinação do teor de finos. No entanto, tal não foi possível para as areias regeneradas uma vez que estas apresentavam na sua constituição resinas que impediram a decantação e sifonagem, danificando o equipamento (Figura 16). Desta maneira, a granulometria foi determinada sem a pré-lavagem de finos requerida pelos referidos procedimentos experimentais.



**Figura 16** - Aparelho de lavagem automática "Autoclay DIETERT DITROIT NO. 534-A" (a) e tentativa de determinação de finos (b).

Após a caracterização das areias prepararam-se provetes para ensaios de resistência à flexão, dureza e permeabilidade. Para cada amostra individual foram feitos provetes utilizando a percentagem de resina de série (utilizada na produção para o fabrico de machos).

Com estes ensaios, foi possível obter de imediato uma estimativa das propriedades dos machos formados por 100% areia regenerada. Posteriormente foram preparadas formulações contendo diferentes proporções de areia base e areia regenerada, que foram caracterizados de forma análoga.

Depois de analisados os resultados dos ensaios para as novas formulações foi feito um ensaio industrial com a formulação com características mais favoráveis.



### 3.1. Caracterização da areia

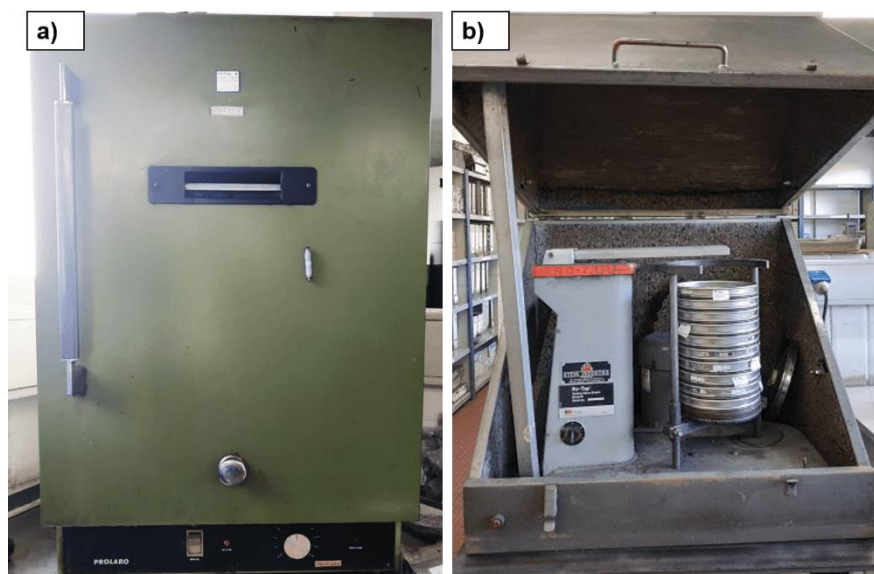
O controlo da areia base é feito mensalmente no Laboratório de Areias e Químico da *Funfrap* utilizando os seguintes ensaios laboratoriais: distribuição granulométrica, coeficiente de angularidade, percentagem de humidade, perda ao fogo, pH, valor de acidez (ADV, Acid Demand Value) e carbonatos. Neste trabalho, estes ensaios foram realizados com a areia base e, em alguns casos, também com as areias regeneradas.

#### 3.1.1. Determinação da distribuição granulométrica

Este método tem por objetivo o controlo granulométrico através do cálculo do índice de finura AFS. Este índice é um número convencional e correspondente ao número de um peneiro fictício que reteria todos os grãos da amostra analisada, se estes tivessem a mesma dimensão média.

A amostra de areia é previamente seca na estufa Prolab (Figura 17a) a 105 °C durante 1 hora. Depois de seca pesam-se 100 g numa balança de precisão VWR. Na Sala de Areias utiliza-se uma série de peneiros ASTM E 11 com aberturas de malha de 3,35 mm, 1,7 mm, 850 µm, 600 µm, 425 µm, 300 µm, 212 µm, 150 µm, 106 µm, 75 µm e 53 µm que são colocados por ordem decrescente de números (o peneiro de abertura de malha mais pequena encontra-se em baixo) no agitador de peneiros RO-TAP (Figura 17b). Após 10 minutos de peneiração pesa-se a quantidade de areia retida em cada peneiro: coloca-se o peneiro na balança de precisão (0,01g) e tara-se. Sem desligar nem tarar a balança, retira-se o peneiro e limpa-se a malha e as paredes com ajuda de um pincel, retirando toda a areia retida no peneiro. Coloca-se novamente o peneiro na balança e regista-se o peso marcado. A diferença verificada entre o valor inicial (100 g) e o total retido, deve ser repartida pelos dois peneiros com maior quantidade retida.

O cálculo do índice de finura AFS efetua-se a partir da multiplicação da quantidade de areia retida em cada peneiro pelo coeficiente multiplicativo característico desse peneiro (Tabela 3). Por fim, divide-se a soma final pela massa inicial de areia.



**Figura 17** - Estufa Prolab a) e equipamento para ensaio de granulometria com série de peneiros ASTM E 11 e agitador de peneiros RO-TAP (b).

**Tabela 3** - Número do peneiro e abertura com o coeficiente multiplicativo correspondente para o cálculo do índice de finura AFS.

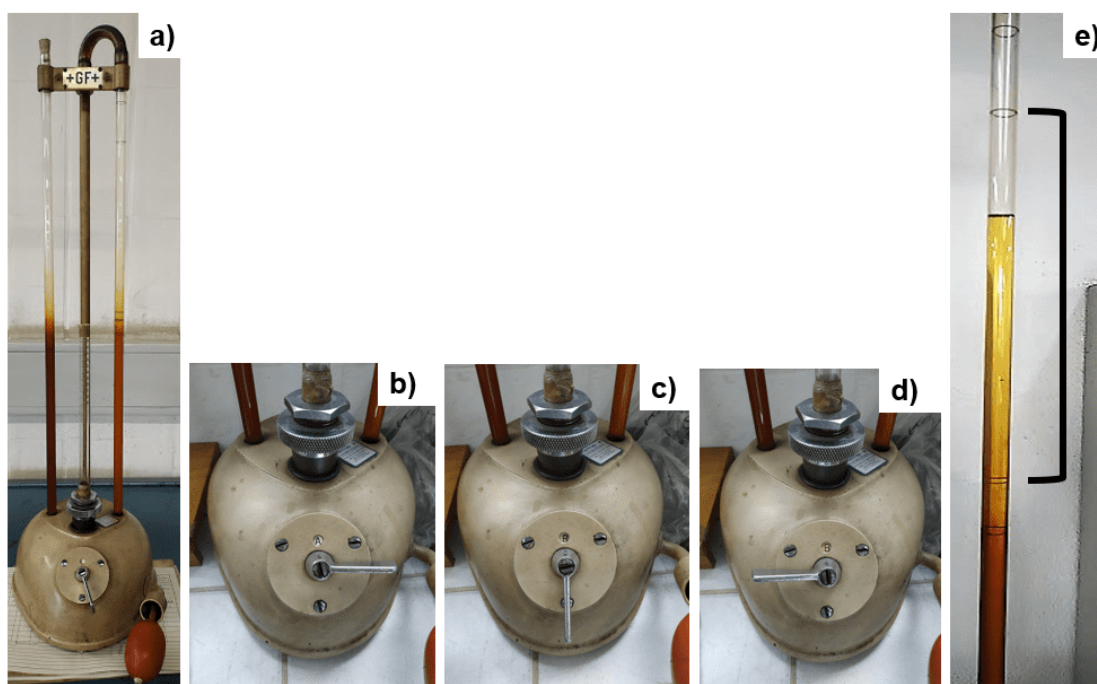
Nº do peneiro ASTM E 11	Abertura (mm)	Coeficiente multiplicativo
6	3,360	3
12	1,700	5
20	0,850	10
30	0,600	20
40	0,425	30
50	0,300	40
70	0,212	50
100	0,150	70
140	0,106	100
200	0,075	140
270	0,053	200
Base	-	300

### 3.1.2. Determinação do coeficiente de angularidade

O coeficiente de angularidade (adimensional) determina-se pela razão entre a superfície específica real (medida) e a superfície específica teórica (calculada) e exprime o quanto a forma real do grão diverge da forma esférica. Os aparelhos que medem a superfície específica foram construídos de modo a

permitir uma avaliação fácil da porosidade da areia através da leitura do volume da amostra e do tempo de escoamento de um líquido (petróleo). A superfície específica teórica calcula-se a partir da análise granulométrica, supondo que todos os grãos são esféricos.

Na medição da superfície específica real, utilizou-se um aparelho Georg Fischer tipo POF (sand surface area testing apparatus), ilustrado na Figura 18a. A medida da superfície específica real é baseada na passagem de ar através de um leito de areia em forma de coluna cilíndrica longa (princípio de *Blaine*). Coloca-se uma amostra de 50 g de areia seca no tubo graduado do aparelho. Para garantir que amostra fica devidamente compactada, bate-se levemente nas paredes do tubo até se verificar que não ocorre mais redução do volume, e lê-se o mesmo na escala do tubo graduado. Com a válvula aberta na posição A (Figura 18b), comprime-se a pera de borracha até o petróleo subir no mínimo até à marca negra superior e, logo de seguida, fecha-se a válvula para a posição R (Figura 18c) para que o nível do petróleo se mantenha nessa posição. Para a medição roda-se a válvula do aparelho para a posição B (Figura 18d) e cronometra-se o tempo que o petróleo demora a descer da marca vermelha superior até à marca vermelha inferior (Figura 18e). Regista-se o tempo e determina-se a superfície específica real, expressa em  $\text{cm}^2/\text{g}$ , através de um gráfico que relaciona o tempo com o volume (Anexo 1). O gráfico que se encontra no Anexo 1 foi fornecido pelo fabricante do equipamento e apenas é aplicável na medição da superfície específica da areia de sílica. É baseado numa areia e petróleo com densidade relativa de 2,65 e 0,811, respetivamente, e ar com uma viscosidade dinâmica de  $18,1 \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ . Para a construção do gráfico foi necessário determinar um fator de correlação entre os três materiais [28].



**Figura 18** - Aparelho para medir superfície específica real tipo POF (a), abertura da válvula (b), fecho da válvula (c), abertura da válvula para permitir a descida do petróleo (d) e distância entre a marca vermelha superior e inferior (e).

Para a determinação da superfície específica teórica recolhe-se a areia contida no tubo graduado e coloca-se no agitador de peneiros (Figura 17b) durante 10 minutos. Após agitação pesa-se a quantidade retida em cada peneiro (tal como descrito para o ensaio da distribuição granulométrica). De seguida, calcula-se a fração retida, através da divisão da quantidade de areia retida em cada peneiro pela quantidade total de amostra (50 g).

A superfície específica teórica de cada fração granulométrica (coeficiente multiplicativo), supondo que os grãos são esféricos, é determinada pelas equações 1 e 2 [29]:

$$S_i = \frac{\pi d_{mi}^2}{\frac{\pi}{6} d_{mi}^3 \rho} = \frac{6}{d_{mi} \rho} \quad \text{Equação 1}$$

$$d_{mi} = \frac{d_i + d_{i-1}}{2} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

- $d_i$  = diâmetro da abertura do peneiro  $i$  (mm)
- $\rho$  = densidade da areia (2,65 g/cm<sup>3</sup>)

Por fim, multiplica-se cada fração pelo coeficiente multiplicativo indicado na Tabela 4. A soma dos produtos anteriormente calculados corresponde à superfície específica teórica expressa em cm<sup>2</sup>/g.

**Tabela 4** - Número do peneiro e abertura com o coeficiente multiplicativo correspondente para o cálculo da superfície específica teórica.

Nº do peneiro ASTM E 11	Abertura (mm)	Coeficiente multiplicativo (cm <sup>2</sup> /g)
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	125,95
140	0,106	177,95
200	0,075	252,51
270	0,053	355,91
Base	-	619,18

### 3.1.3. Determinação da percentagem de humidade

A percentagem de humidade determina-se com a balança de humidade “Mettler HE53” (Figura 19). Primeiramente, liga-se o aparelho e verifica-se o nivelamento. No visor do aparelho as funções a executar aparecem a piscar para ajudar o utilizador. Tara-se, retira-se o conjunto pinça e prato e coloca-se neste a amostra até se verificar um peso compreendido entre 15 e 20 g. Depois, fecha-se a tampa e inicia-se o ensaio (clicando no “Start”). O ensaio termina quando o aparelho emite um “bip” sonoro. Nessa altura regista-se o valor da humidade que aparece no visor.



**Figura 19** - Aparelho para medição do teor em humidade “Mettler HE53”.

#### **3.1.4. Determinação da perda ao fogo**

Define-se como perda ao fogo a quantidade de massa perdida por uma determinada amostra, após ser sujeita a uma determinada temperatura por determinado tempo (calcinação). A perda ao fogo é normalmente expressa em percentagem da massa inicial da amostra.

Inicialmente, pesa-se uma cápsula de sílica (P1) e regista-se o valor. Na mesma cápsula pesam-se entre 10 e 15 g da amostra a estudar, previamente seca a  $105\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  durante 30 minutos (P2), distribuídos de forma uniforme no fundo da cápsula para que a calcinação seja perfeita e homogénea. Introduce-se a cápsula no centro de uma mufla *Nabertherm* (Figura 20) que foi levada previamente a  $900\text{ °C}$ . A cápsula é mantida a essa temperatura durante uma 1 hora. De seguida, retira-se a cápsula da mufla e deixa-se arrefecer num excicador. Por fim, pesa-se a cápsula (P3) e calcula-se a percentagem de perda ao fogo através da equação 3:

$$\text{Perdas ao fogo (\%)} = \frac{P2-P3}{P2-P1} \times 100 \quad \text{Equação 3}$$

O resultado é a média de dois ensaios, indicado com uma casa decimal.



**Figura 20** - Mufla Nabertherm.

### **3.1.5. Determinação do pH**

Este método tem como objetivo a determinação do pH de materiais sólidos. O valor do pH determina-se medindo por via eletrométrica a diferença de potencial entre dois elétrodos, mergulhados na suspensão a estudar. Utilizou-se um aparelho Metrohm 632 pH-meter (Figura 21) que é um voltímetro de elevada resistência, associado a um gerador de célula eletroquímica cuja solução eletrolítica é a solução cujo pH se pretende determinar. O procedimento da calibração do aparelho encontra-se no Anexo 2.

Inicialmente pesam-se 50 g de areia seca a 105 °C num copo de 50 mL e adicionam-se 50 mL de água destilada. A amostra é colocada num banho de ultra-sons durante 10 minutos, agita-se com uma vareta de vidro duas ou três vezes para desagregação da areia e coloca-se num banho termostático a 23 °C ± 2. Seguidamente, coloca-se o copo sobre um agitador magnético já com uma barra magnética revestida no interior do copo. Mergulha-se o elétrodo na suspensão com a membrana porosa submersa (± 3 cm) e, por fim, quando o valor do pH estabilizou no visor do aparelho faz-se o registo.



**Figura 21** - Aparelho Metrohm 632 pH-meter para a medição de pH.

### 3.1.6. Determinação do valor de acidez (ADV, *Acid Demand Value*)

O ADV é proporcional à quantidade de impurezas presentes na areia capazes de reagir com um ácido. Assim, conhecidas as quantidades iniciais de areia e de ácido pode determinar-se, por titulação com uma base, a quantidade de ácido não reagido. Este método de ensaio tem como objetivo a determinação da quantidade de solução de HCL 0,1N, expressa em mL, necessária para neutralizar 50 g de areia. O ADV da areia é dado por (equação 4):

$$ADV = | ADV_{amostra} - ADV_{branco} | \quad \text{Equação 4}$$

Inicialmente prepara-se uma amostra de areia com 50 g num copo de 250 mL e introduz-se uma barra magnética dentro do copo. À areia adicionam-se 50 mL de água desmineralizada com a ajuda de uma proveta e 50 mL de HCL 0,1N com uma pipeta de precisão. A amostra é colocada sobre o agitador magnético durante 5 min. Para evitar que a amostra fique contaminada cobre-se o copo com um vidro relógio e deixa-se repousar durante uma hora. Durante o repouso calibra-se o aparelho (Figura 21) de forma idêntica à descrita no ponto 3.1.5. Após repouso coloca-se a solução sob agitação, mergulha-se o elétrodo o menos profundo possível e titula-se lentamente o HCl não consumido, com solução de

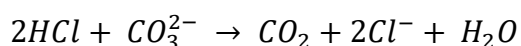


NaOH 0,1 N. Assim que o aparelho regista o valor de pH de 3 anota-se o volume em mL de NaOH utilizado. O número de mL gastos corresponde ao ADV da amostra.

Para determinar o ADV da areia prepara-se também uma amostra de calibração ou testemunho (branco) com todos os ingredientes exceto a areia e faz-se a sua titulação com solução de NaOH 0,1 N até pH = 3 para determinação do seu ADV (número de mL de NaOH 0,1 N gastos). O módulo da diferença entre os ADV da amostra e do branco dará o valor do ADV da areia.

### 3.1.7. Determinação de carbonatos

Este método é realizado para determinar o teor em carbonatos presente nas areias para fundição. Faz uso do calcímetro “Bernard” (Figura 22) e consiste na medição do volume de CO<sub>2</sub> libertado por ataque com ácido clorídrico segundo a reação (equação 5):



Equação 5



Figura 22 - Calcímetro de "Bernard".

Pesam-se 20 g de areia seca a  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5$  num “erlenmeyer” com um tubo lateral e adicionam-se 20 mL de água desmineralizada, medidos numa proveta. Medem-se também 5 mL de HCl a 50% (500 mL de água desmineralizada + 500 mL de HCl concentrado a 37%) numa pipeta e introduz-se no tubo lateral. Posteriormente, coloca-se a tampa do calcímetro no “erlenmeyer” e equilibram-se as pressões no calcímetro, ou seja, ajustam-se os níveis ampola/bureta graduada. Seguidamente, regista-se o volume marcado na bureta ( $V_0$ ) e inclina-se o “erlenmeyer” de modo a introduzir o HCl sobre a mistura água/areia. De forma a garantir que a reação se dá na totalidade, agita-se energicamente o “erlenmeyer” e ajustam-se novamente os níveis ampola/bureta graduada. Por fim, lê-se, sobre a bureta, o volume de  $CO_2$  libertado em mL ( $V$ ) e faz-se em paralelo e nas mesmas condições um testemunho com 0,25 g de  $CaCO_3$ . O resultado é expresso em % de  $CaCO_3$  presente na amostra a estudar (equações 6 e 7):

$$CaCO_3 (\%) = \frac{V - V_0}{V' - V'_0} \times 0,25 \times \frac{100}{P} \quad \text{Equação 6}$$

Para 20 g (P) tem-se que:

$$CaCO_3 (\%) = \frac{V - V_0}{V' - V'_0} \times 1,25 \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

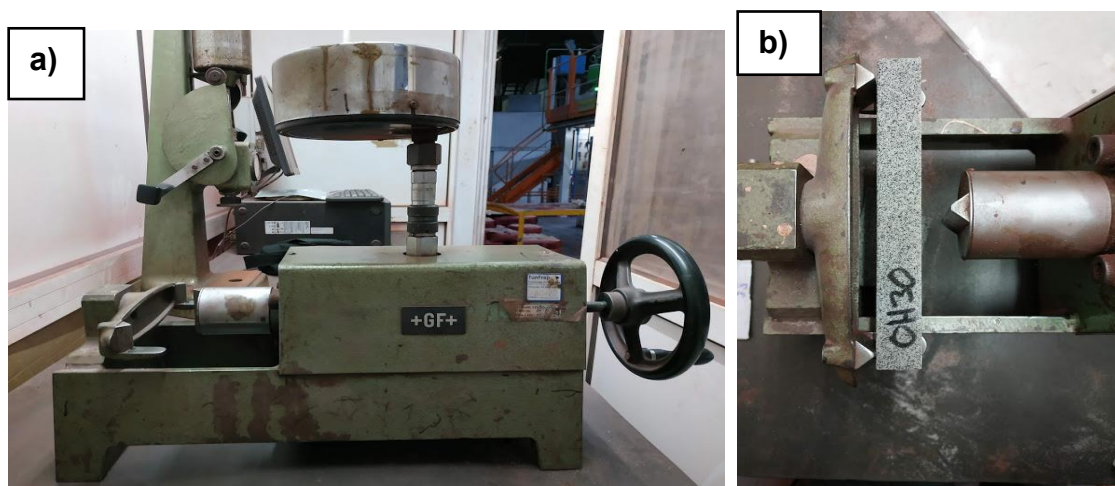
- $V_0$  = volume inicial da amostra marcado na bureta (mL)
- $V$  = volume final de  $CO_2$  libertado pela amostra (mL)
- $V'_0$  = volume inicial do testemunho marcado na bureta (mL)
- $V'$  = volume final de  $CO_2$  libertado pelo testemunho (mL)
- $P$  = peso da amostra (g)

### 3.2. Caracterização da areia moldada

Os provetes para o estudo das propriedades dos machos foram produzidos na secção Macharia e sujeitos a ensaios laboratoriais no Laboratório de Areias e Químico da *Funfrap*. Foram realizados ensaios de resistência à flexão, permeabilidade e dureza para a areia base e para as areias regeneradas.

#### 3.2.1. Resistência à flexão

A resistência à flexão das areias moldadas com resina de caixa fria foi avaliada em termos de evolução da resistência precoce e da resistência tardia. A da resistência precoce foi determinada 3 minutos após a conformação (imediato) e após 30 minutos, 1 h, 2 h e 3 h. A evolução da resistência tardia foi determinada em intervalos de tempo idênticos depois de 24 h de repouso após a conformação (ou seja, 24 h, 24,5 h, 25 h, 26 h e 27 h). Os ensaios de flexão foram realizados num aparelho *Georg Fischer PEG* de prensa hidráulica com manivela manual e um manómetro com ponteiro de arrasto que regista a carga de rotura (Figura 23). A força é aplicada horizontalmente e a leitura da resistência à flexão é feita diretamente na escala de dentro do manómetro e expressa em  $\text{daN/cm}^2$  (0,1 MPa). Para cada condição foram ensaiados dois corpos de prova, sendo o resultado a média aritmética dos valores obtidos para cada corpo de prova.

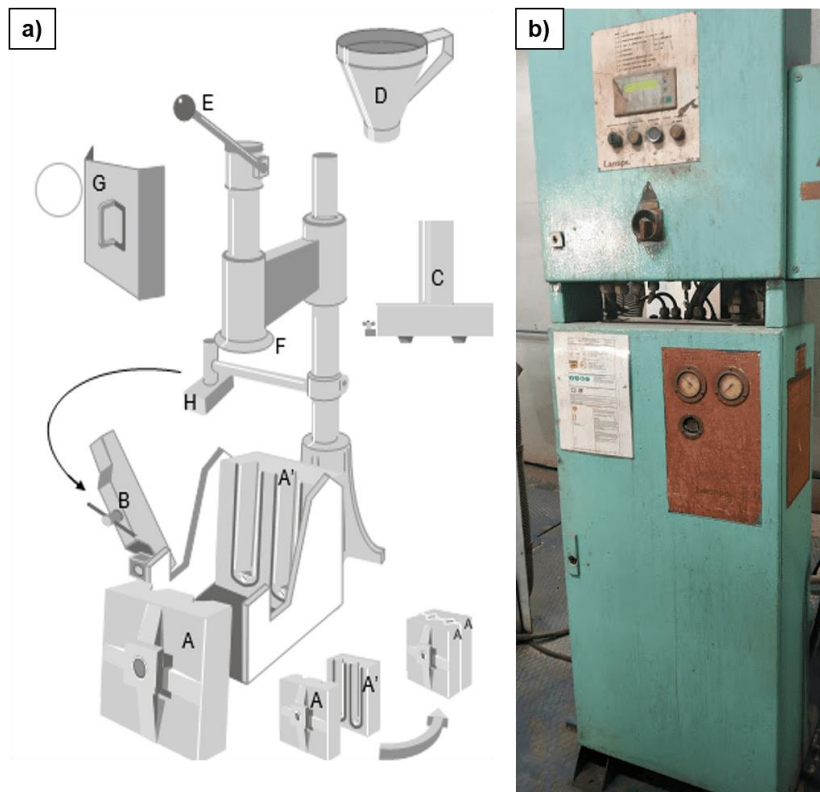


**Figura 23** - Ensaio de flexão (a) e (b) com equipamento Georg Fischer.

Para esse fim, produziram-se provetes de secção quadrada com dimensões  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  e 17,2 cm de comprimento na máquina de sopragem (Figura

24a). Para a preparação de provetes utilizou-se a areia em estudo, de acordo com a mistura que se pretende preparar, e as resinas Isocure 340 e 640 (parte I e parte II) em partes iguais. Num balde, pesaram-se 10 kg de areia e introduziram-se na tina do misturador. De seguida, pesaram-se as quantidades correspondentes de cada resina (Isocure parte I e Isocure parte II). Misturou-se primeiro a areia com a resina Isocure parte I no misturador durante 2 minutos e logo a seguir com a resina Isocure parte II, também durante 2 minutos.

Na máquina de fabrico de provetes uniram-se os dois meios moldes (Figura 24a.A e Figura 24a.A') apertando com força a porca de orelhas (Figura 24a.B). Da mistura de areia com resinas retirou-se uma amostra e encheu-se completamente com essa areia a camisa de sopragem (Figura 24a.C) com a ajuda do funil Figura 24a.D). A camisa é colocada sobre a caixa de provetes metálica (Figura 24A, 2A') de abertura manual e aciona-se ligeiramente a alavanca (Figura 24a.E) de modo a encostar o anel (Figura 24a.F) ao topo da camisa de sopragem. Para garantir a segurança do processo de enchimento, encosta-se a placa de proteção (Figura 24a.G) ao conjunto dos moldes. De modo a permitir a sopragem da areia na caixa sob uma pressão de ar de 6 bar, aciona-se a alavanca para baixo. De seguida, retira-se a camisa e coloca-se a cabeça de gaseificação (Figura 24a.H) sobre os dois meios moldes. Aciona-se a alavanca, novamente, de modo a encostar o anel ao topo da cabeça de gaseificação a fim de evitar fugas da DMEA. Pressiona-se o botão do gaseificador (Figura 24b) e liga-se o cronómetro para os provetes que vão ser ensaiados à flexão 3 minutos após a gasagem. Por fim, retiram-se os provetes. A caixa metálica deve ser sempre limpa com ar comprimido após a retirada dos provetes e usa-se equipamento de proteção individual (EPIs): óculos, luvas, máscara respiratória e abafadores de ruído.

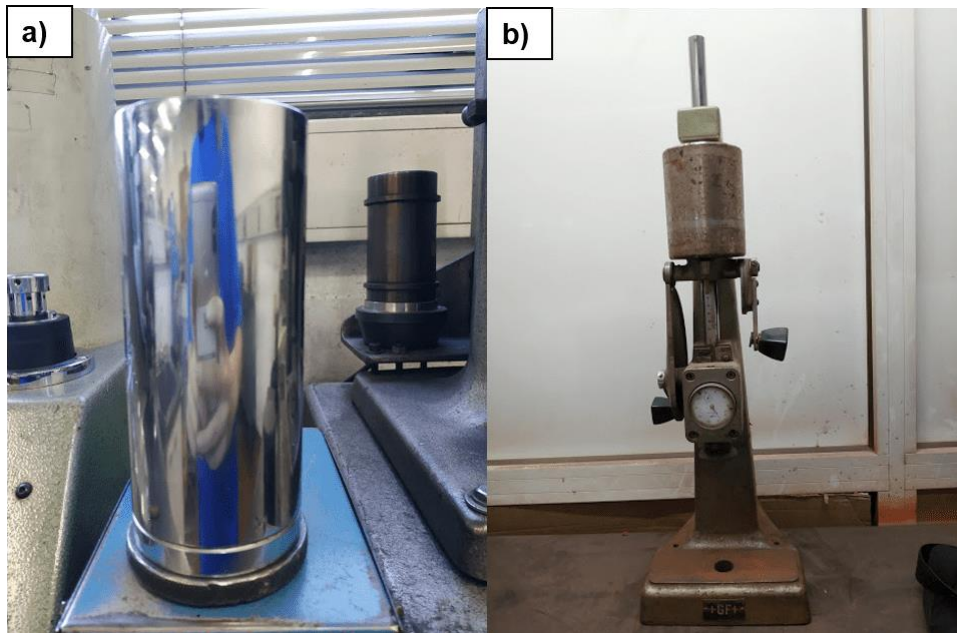


**Figura 24** - Máquina de sopragem de provetes (a), molde móvel (A), molde fixo (A'), porca de orelhas (B), camisa de sopragem (C), funil (D), alavanca (E), anel (F), placa de proteção (G), cabeça de gaseificação (H) e gaseificador de DMEA (b).

### 3.2.2. Permeabilidade

Para a determinação da permeabilidade utilizou-se a mistura de areia e resina tal como preparada para o ensaio de resistência à flexão. A mistura foi pesada e colocada dentro de um molde cilíndrico padrão (Figura 25a) e depois compactada num aparelho de compactação *Georg Fischer PRA* (Figura 25b).

A compactação é efetuada através de 3 pancadas com ajuda da manivela. Após as pancadas verifica-se na escala do compactador se o provete ficou com a altura especificada ( $50 \pm 0,5$  mm). Caso tal não se verifique será necessário variar a massa da mistura até o provete ficar com as medidas indicadas.



**Figura 25** – Molde cilíndrico padrão a); Aparelho de compactação Georg Fischer PRA (b).

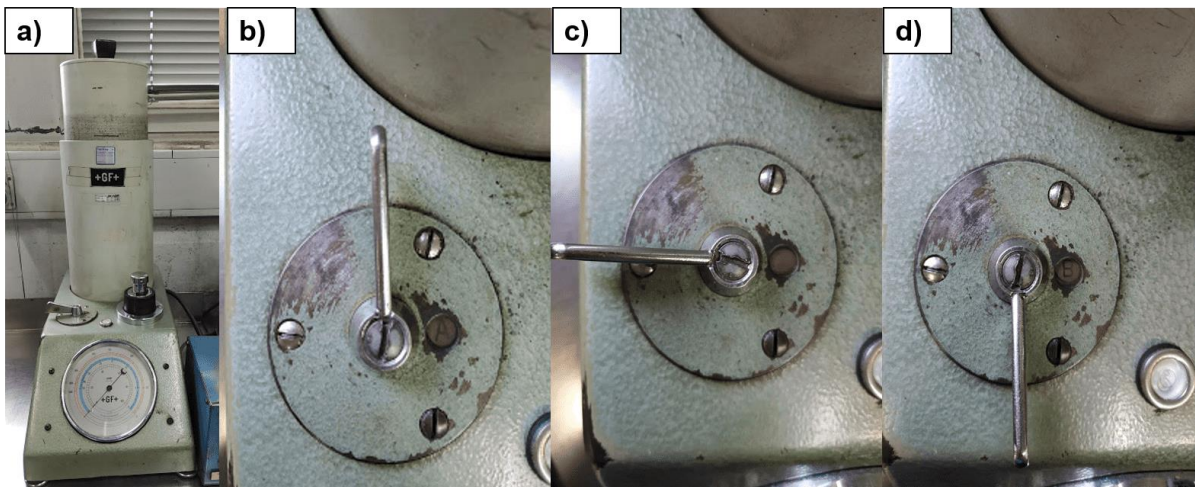
Na determinação da permeabilidade utilizou-se um permeâmetro *Georg Fischer* PDU ilustrado na Figura 26a. O molde com o provete cilíndrico é colocado no anel de borracha que suporta as válvulas de saída do ar. É necessário pressionar o molde no anel de borracha de forma a vedar a ligação molde/anel de borracha. Coloca-se a torneira do aparelho na posição A (Figura 26b) e ao mesmo tempo levanta-se a campânula. Para que a campânula se mantenha fixa roda-se novamente a torneira para a posição E (Figura 26c). De seguida, coloca-se a torneira na posição B (Figura 26d), cronometra-se o tempo (s) que a campânula demora a descer e ao mesmo tempo regista-se o valor da pressão em altura de coluna de água. Por fim coloca-se novamente a torneira na posição B e retira-se o molde. Para ajudar a extração do provete do molde utiliza-se um extrator de amostras.

A fórmula geral que permite calcular a permeabilidade é dada pela equação 8 [28]:

$$PN = \frac{v h}{p A t} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

- PN = número de permeabilidade;
- V = volume de ar que que passa pela amostra (2000 mL);
- h = altura do provete (5 cm);
- S = secção do provete (19,63 cm<sup>2</sup>);
- p = pressão (cm de coluna de água);
- t = tempo (s).

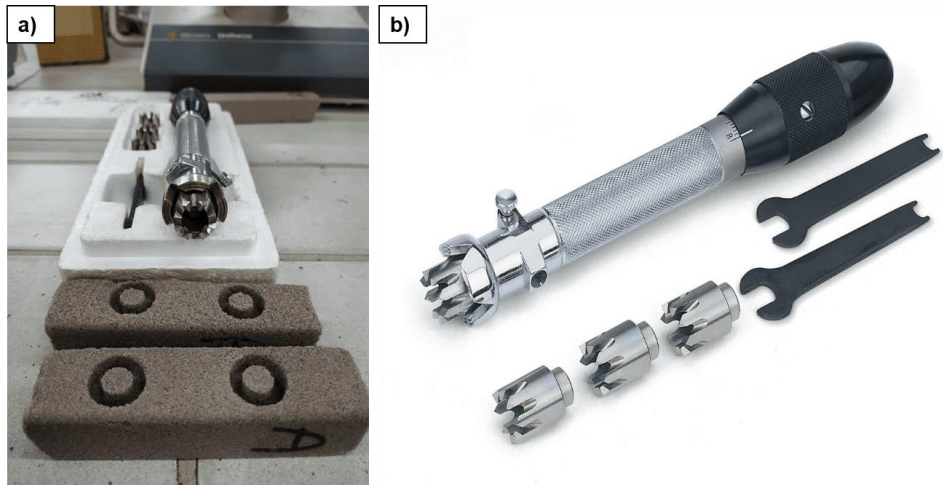


**Figura 26** - Permeâmetro de carga constante (a), abertura da torneira (b), fecho da torneira (c), e abertura da válvula para passagem do ar (d).

As variáveis p e t são determinadas pelo permeâmetro e os outros valores são constantes. O número de permeabilidade é expresso em cm<sup>4</sup>/g.min.

### 3.2.3. Dureza

No ensaio da dureza utilizaram-se os provetes partidos na condição “imediate” (acabados de preparar) após o ensaio da resistência à flexão. Utilizou-se um durómetro *PHK Hardness Tester* (Figura 27) que permite determinar a profundidade de penetração, em mm, movimentando o aparelho 5 vezes em sentidos opostos. Após rotação do aparelho, este é bloqueado pressionando o botão stop. A penetração lê-se na interseção da escala com a periferia do botão de giro.



**Figura 27** - a) Provete onde foi realizado o ensaio de dureza e b) durómetro PHK Hardness Tester [30].

### 3.3. Ensaios com areia regenerada

Para os ensaios com areia regenerada, recolheram-se da sucata de macharia nove amostras representativas, que diferem pela quantidade de resina, pela presença ou ausência de aditivos químicos ou de tinta, e por terem, ou não, sido sujeitas ao endurecimento pela amina. Uma vez que o equipamento responsável pela regeneração da areia não estava em funcionamento (Figura 28), as amostras foram regeneradas manualmente, por simples fricção dos torrões de areia endurecida por forma a libertar os grãos de areia (destorroamento).



**Figura 28** - Partidor de machos “Klein” (a) e (c) e grelha de destorroamento (b).



Assim, selecionaram-se para análise três tipos de sucata (numerados de 1 a 3). A sucata do tipo 1 é constituída por machos sem tinta (Figura 29.1). Estes são machos com defeito rejeitados após injeção da mistura de areia, com resinas e com ou sem aditivos químicos, nas caixas de molde (conformação) e sopragem do gás de amina (endurecimento). As cargas descartadas (Figura 29.2) constituem a sucata de tipo 2 e provêm dos misturadores (responsáveis pela homogeneização da areia com a resina, com ou sem aditivos químicos) tendo permanecido nas tremonhas mais tempo que o permitido não podendo, por essa razão, ser utilizadas no processo produtivo. Apesar de não terem sido expostas ao gás amina, acabam por endurecer naturalmente. Por último, a sucata de tipo 3 é constituída por machos com tinta (Figura 29.3) cujos defeitos são detetados após a secagem na estufa.



**Figura 29** - Sucata de macharia: machos sem tinta (1), cargas descartadas (2) e machos com tinta (3).

Os três tipos de sucatas podem ser provenientes dos três tipos de leitos diferentes utilizados na *Funfrap*. Estes, tal como representado na Tabela 5, foram identificados por uma letra (A, C e M) e diferem nos aditivos e na quantidade de resina que contêm. O leito A não apresenta qualquer aditivo. Pelo contrário, os leitos C e M têm na sua constituição aditivos diferentes (X ou Y, respetivamente). No que diz respeito à quantidade de resina (resina de série), sabe-se que o leito A

é o que apresenta menor percentagem e o leito M o que apresenta maior percentagem. Assim, as amostras foram identificadas por uma letra (A, C ou M) e um número de 1 a 3. Por exemplo: a amostra A.1 é de areia originária de um macho sem tinta que teve origem no leito A (sem aditivos e menor quantidade de resina).

Após identificação das amostras e respetiva regeneração, estas foram caracterizadas através dos mesmos métodos de ensaio usados para a areia base SP 55.

**Tabela 5** – Descrição das amostras a caracterizar.

	1	2	3	% resina	Aditivo químico
A	A.1	A.2	A.3	< 1,6	-
C	C.1	C.2	C.3	< 1,6	X
M	M.1	M.2	M.3	> 1,6	Y
	<b>Macho conformado sem tinta</b>	<b>Cargas descartadas</b>	<b>Macho conformado com tinta</b>		

Os ensaios de resistência à flexão, permeabilidade e dureza iniciaram-se com as nove misturas individuais de 100% de areia regenerada, tal como indicado na Tabela 5. A quantidade de resina usada varia de acordo com o tipo de leito original e é a utilizada na produção (resina de série). No ensaio mecânico de resistência à flexão foram apenas feitos provetes para avaliar a resistência precoce (partir no imediato, meia hora e uma hora após a realização da mistura).

Na segunda fase dos ensaios foram misturadas várias amostras (Figura 30). Nos primeiros três ensaios foi feita uma mistura em partes iguais dos três tipos de sucata de macharia de cada proveniência: no primeiro ensaio foi feita a mistura de areia regenerada de machos sem tinta (A.1 + C.1 + M.1), no segundo foi feita uma mistura de areia de cargas descartadas (A.2 + C.2 + M.2) e no terceiro foi feita uma mistura de areia regenerada de machos com tinta (A.3 + C.3 + M.3).

Nos três ensaios seguintes fizeram-se misturas das nove amostras mantendo as proporções entre as areias de cada proveniência. No quarto ensaio misturaram-se 80% de areia regenerada de machos sem tinta, 5% de areia regenerada de cargas descartadas e 15% de areia regenerada de machos com tinta. Os quinto e o sexto ensaios foram semelhantes ao quarto, no entanto a areia regenerada de cargas descartadas (tipo 2) foi excluída e as misturas recalculadas para 90 e 85% de areia de machos sem tinta (quinto e sexto ensaios, respetivamente), resultando a mistura nas proporções apresentadas na Figura 30.

A quantidade de resina utilizada para estas seis misturas foi de 1,60%.

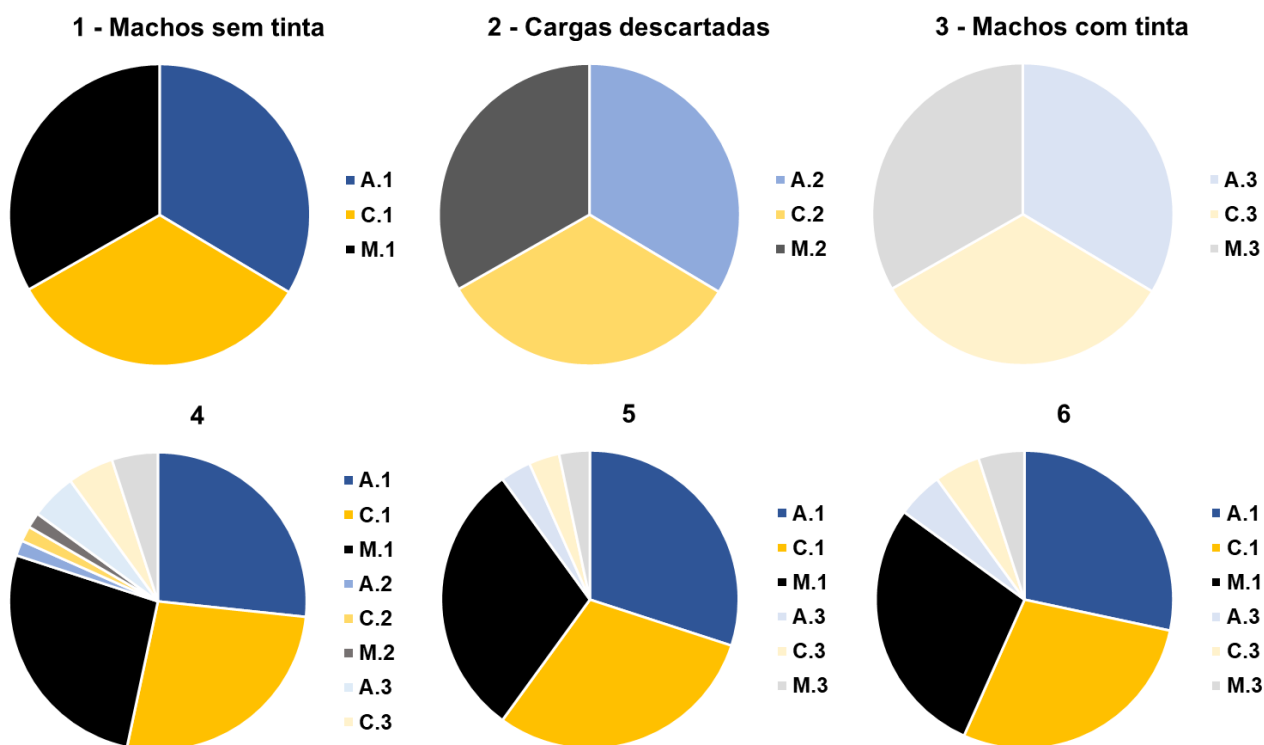
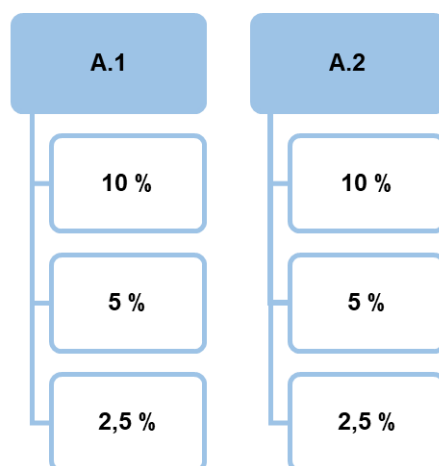


Figura 30 - Composição das amostras dos provetes formados por 100% de areia regenerada de sucata de macharia.

### 3.4. Novas formulações de areia

Como referido anteriormente, a quantidade de sucata de macharia diária é cerca de 5% do total de areia utilizada para o fabrico de machos, sendo maioritariamente (~70%) proveniente dos leitos de tipo A. Perante isso e com base nos resultados obtidos na caracterização dos provetes preparados apenas com as areias regeneradas, abandonou-se o estudo dos leitos C e M, bem como da amostra A.3 (machos com tinta), por apresentar valores de resistência à flexão e dureza muito baixos, e definiram-se novas formulações contendo areia base SP 55 e 10, 5 ou 2.5% de areia regenerada das amostras A.1 e A.2 (Figura 31). Nesta etapa, foram apenas realizados ensaios de permeabilidade, resistência à flexão e dureza.



**Figura 31** - Novas formulações com diferentes percentagens de areia regenerada para cada amostra (A.1 e A.2)

### 3.5. Ensaio industrial

Para o ensaio industrial, dentre todos os machos produzidos na *Funfrap*, foram seleccionados os que apresentam menor percentagem de defeitos devido à sua reduzida complexidade e elevada espessura: corpos cilindros e camisas de água da peça 275 (cárter-cilindro/bloco de motor). Estes são considerados menos críticos e não exigem controlo de processo.

A produção com areia regenerada decorreu da mesma forma que o processo utilizado industrialmente e consistiu no vazamento de 44 blocos de motor dispostos em 11 moldações. Cada moldação origina 4 blocos de motor com

4 cilindros, sendo composta por 4 machos camisas de água e 2 machos corpos cilindros (cada macho corpo cilindro é usado por 2 blocos de motor). Assim, foram produzidos 22 machos corpos cilindros e 44 camisas de água. Para tal utilizou-se o misturador “Fordath” e fizeram-se duas cargas, de 500 kg e 250 kg de areia, respetivamente. Em ambas as misturas utilizou-se 5% da amostra A.1 (macho conformado sem tinta nem aditivos) e 95% de areia base SP 55, e a percentagem de resina igual à utilizada na produção (resina de série). O tempo de mistura da areia com as resinas foi de 5 min e 30 s para os corpos cilindros e de 3 min e 30 s para as camisas de água. Após a preparação da areia, foram feitos testes de resistência à flexão, permeabilidade, perda ao fogo e dureza. A perda ao fogo foi realizada apenas para verificar se as misturas de areia com resina tinham sido efetuadas corretamente, uma vez que o valor da perda ao fogo corresponde ao valor da percentagem de resina. Com os machos produzidos, foi montada uma moldação e vazado um bloco de motor. Este teste tem a designação interna de Lote de Ensaio e as condições de execução encontram-se no Anexo 4.

### **3.6. Análise de custos**

Após o ensaio industrial efetuou-se uma análise de custos, tendo em conta a areia reutilizada, a quantidade e o custo de areia nova, a percentagem de sucata de macharia, o rendimento do equipamento de regeneração e, por fim, o custo de deposição de areia e de finos em aterro. Foi também feita uma estimativa do número de blocos de motor que seria necessário produzir diariamente para consumir a sucata de macharia diária de machos sem tinta originários do leito A.



## **CAPÍTULO IV**

---

## **Resultados e Discussão**

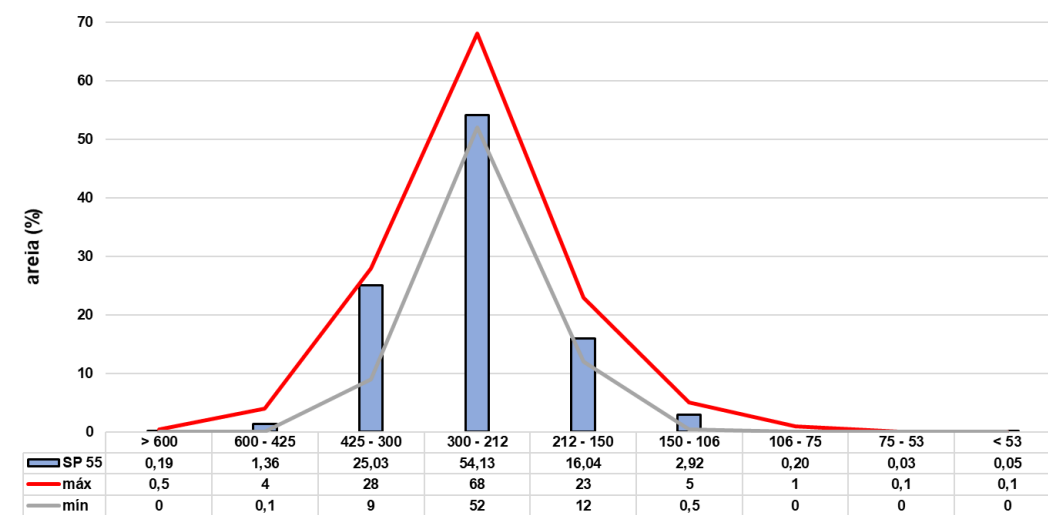




#### 4.1. Areia base SP 55

##### 4.1.1. Caracterização da areia base SP 55

A distribuição da granulometria da areia base SP 55 está representada na Figura 32. A vermelho e a cinzento estão representados, respetivamente, os valores máximos e mínimos, estipulados pela *Funfrap* para cada classe granulométrica, da percentagem de areia que deve ficar retida em cada crivo. Analisando o gráfico, conclui-se que todos os valores se encontram dentro dos limites requeridos pela empresa.



**Figura 32** - Gráfico da distribuição granulométrica da areia base SP 55.

A determinação do índice de finura AFS, calculado através da distribuição granulométrica representada na Figura 32, encontra-se detalha na Tabela 6. Analisando o valor do índice de finura (AFS = 52), verifica-se que este se encontra dentro do intervalo 50 a 57, valor estipulado pela *Funfrap* como sendo o indicado para a areia base SP 55.

Na Tabela 7 representa-se a determinação da superfície específica teórica para a areia base. Esta apresentou um valor de 91,03 cm<sup>2</sup>/g.

A Tabela 8 apresenta os resultados dos restantes ensaios realizados com a areia base SP 55.

**Tabela 6** - Cálculo do índice de finura AFS.

Abertura do crivo (mm)	areia retida (%)	Coefficiente multiplicativo	Produto
≥ 3,360	0,00	3	0
1,700	0,00	5	0
0,850	0,05	10	0
0,600	0,19	20	4
0,425	1,36	30	41
0,300	25,03	40	1001
0,212	54,13	50	2707
0,150	16,04	70	1123
0,106	2,92	100	292
0,075	0,20	140	28
0,053	0,03	200	6
≥ 0,053	0,05	300	15
<b>Total</b>	<b>100,00</b>	<b>-</b>	<b>52</b>

**Tabela 7** - Determinação da superfície específica teórica

Abertura do crivo (mm)	fração areia retida	Coefficiente multiplicativo	Produto (cm <sup>2</sup> /g)
0,850	0,00	17,94	0
0,600	0,00	31,61	0
0,425	0,01	44,75	1
0,300	0,25	63,04	16
0,212	0,54	89,15	48
0,150	0,16	125,91	20
0,106	0,03	177,95	5
0,075	0,00	252,51	1
0,053	0,00	355,91	0
≥ 0,053	0,00	619,18	0
<b>Total</b>	<b>0,99</b>	<b>-</b>	<b>91,03</b>

O coeficiente de angularidade determinou-se através do quociente entre a superfície específica real (118,00 cm<sup>2</sup>/g) e a superfície específica teórica (91,03 cm<sup>2</sup>/g), resultando no valor de 1,30 que corresponde a uma morfologia

arredondada. O teor em humidade (0,01%) foi o ideal, uma vez que a humidade pode retardar o processo de cura [27].

**Tabela 8** - Resultados obtidos na caracterização da areia base SP 55.

Métodos de ensaio	Areia base SP 55
Superfície específica real (cm <sup>2</sup> /g)	118,00
Superfície específica teórica (cm <sup>2</sup> /g)	91,00
Coefficiente de angularidade	1,30
Humidade (%)	0,01
pH	7,2
ADV (mL)	0,2
Perda ao fogo (%)	0,18
Carbonatos (%)	0,01

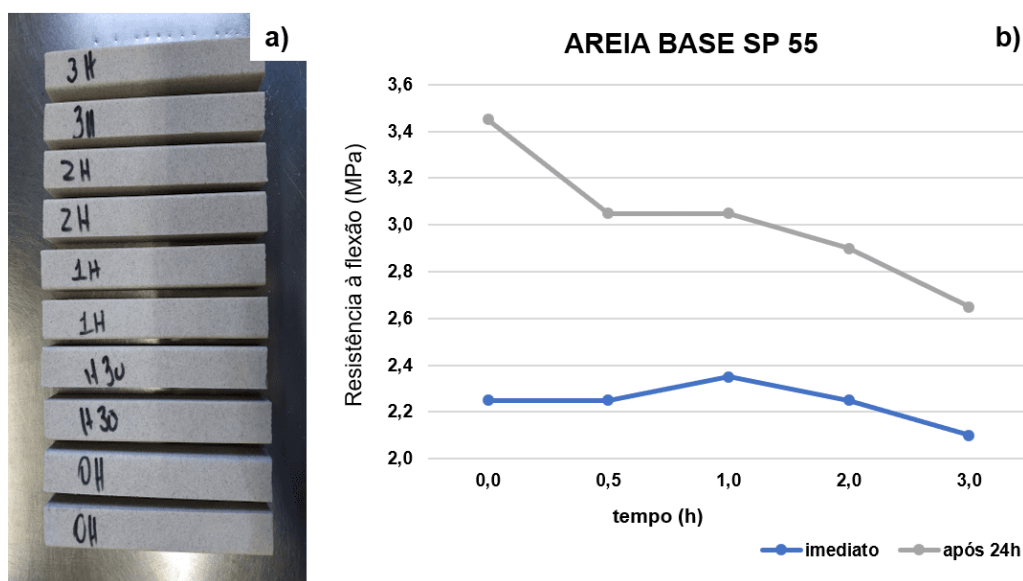
A perda ao fogo permite determinar a percentagem de massa perdida decorrente da volatilização, oxidação e decomposição de substâncias que formam produtos gasosos tais como aditivos carbonosos, aglutinantes orgânicos (resinas) e carbonatos (areias marinhas). Para a areia de sílica SP 55 a perda ao fogo foi de 0,18% o que coincide com as características ideais da areia de sílica virgem utilizada em fundição com teor de pureza de cerca de 98% [14].

Os ensaios de determinação de pH e ADV realizaram-se, não só para avaliar a acidez e basicidade da areia, mas também para determinar o nível de impurezas presente. A principal diferença entre a medição do pH e o ADV é a natureza das impurezas encontradas na areia. Impurezas solúveis em água (e.g. hidróxido de sódio) alteram mais o pH do que o ADV. Areias de sílica com elevado grau de pureza apresentam um valor de pH próximo de 7. Pelo contrário, contaminantes insolúveis em água que reagem com o ácido têm um impacto maior na medição do ADV. O carbonato de cálcio (proveniente do calcário e conchas do mar) é um exemplo de contaminante insolúvel em água, contudo solúvel em ácido clorídrico. Se a areia contém impurezas que reajam com o ácido clorídrico, o número de ADV irá aumentar, ou seja, quanto maior a quantidade destas impurezas na areia, maior será o respetivo ADV [31].

Como referido anteriormente o carbonato de cálcio é uma impureza frequente em areias de sílica. O teor deste contaminante obtido através do calcímetro de “Bernard” foi muito reduzido, o que está de acordo com o valor obtido na medição do ADV.

#### 4.1.2. Resistência à flexão, permeabilidade e dureza

Para o ensaio da resistência à flexão da areia base SP 55 foram produzidos 20 provetes, 10 dos quais foram sujeitos a ensaios mecânicos a partir de 3 minutos após a sua preparação (imediate) para avaliar a resistência precoce (Figura 33a), e a partir de 24 h após armazenamento para avaliar a resistência tardia. Os resultados dos ensaios estão representados na Figura 33b e correspondem às médias aritméticas dos valores obtidos para dois corpos de prova ensaiados em cada condição.



**Figura 33** - Provetes de areia base SP 55 para o ensaio de resistência à flexão (a) e resultados dos ensaios de resistência à flexão para a areia base SP 55 (b).

Nos ensaios realizados logo após a conformação (linha azul) verificou-se algum aumento da resistência à flexão, nomeadamente entre a meia hora e a 1 hora após a produção do provete. A resistência à flexão dos provetes que foram ensaiados após as 24 h de armazenamento (24 h, 24,5 h, 25 h, 26 h e 27 h, linha a cinzento) é superior, embora tenha um comportamento semelhante ao da resistência à flexão no imediato. Os estudos presentes na literatura afirmam que,

de facto, existe um aumento da resistência à flexão com o tempo de armazenamento [13], pelo que a aparente tendência para a diminuição de resistência observada ao longo de cada um dos períodos estudados deverá ser consequência de fatores aleatórios ou amostragem insuficiente.

Os valores de permeabilidade e dureza da areia base SP 55 encontram-se na Tabela 9. Na tabela está também o valor de pressão (altura de coluna de água, cmWC) determinado pelo permeâmetro e o tempo que a campânula deste demora a descer, com base nos quais é calculado o número de permeabilidade PN (descrito na secção 3.2.2).

**Tabela 9** - Resultados de permeabilidade e dureza para a areia base SP 55.

Areia base SP 55	Permeabilidade		Profundidade de penetração (mm)
	tempo (min)	0,6	3,1
	P (cmWC)	30,0	
	PN (cm <sup>4</sup> /g.min)	275,4	

Analisando o conjunto de resultados obtidos na caracterização da areia base SP 55, conclui-se que todos se encontram dentro dos valores estipulados pela empresa. Desta maneira, pode validar-se como areia padrão, que servirá de comparação com os resultados obtidos na caracterização da areia regenerada.

## 4.2. Areia regenerada

### 4.2.1. Caracterização da areia regenerada

Como referido na secção 3.3, a regeneração da areia foi feita manualmente (destorroamento) e o material resultante não foi sujeito a qualquer tipo de tratamento de adequação visando aproximar as suas características às da areia base SP 55. Este facto poderá explicar a dispersão verificada nos resultados de caracterização das areias regeneradas. Para a caracterização foi apenas realizado um ensaio para cada amostra sendo recomendável a repetição dos ensaios para diminuir a dispersão de resultados, bem como a peneiração da areia

e a separação dos finos para, desta forma, haver uma aproximação maior ao processo de regeneração mecânica.

#### **4.2.1.1. Distribuição granulométrica**

As Figura 34 e Figura 35 reúnem os resultados de distribuição granulométrica obtidos para as amostras de areia regenerada. Estes foram divididos em 6 gráficos, dos quais os da Figura 34 se organizam segundo o tipo de sucata de macharia e os da Figura 35 por leitos de origem. Em todos os gráficos, para cada crivo é assinalado por linhas vermelhas o intervalo admissível (entre máximo e mínimo) de percentagem de areia retida. Pela análise da Figura 34, pode concluir-se que praticamente todas as amostras apresentam uma distribuição granulométrica fora dos limites requeridos sendo o gráfico da Figura 34a (machos sem tinta) o que apresentou valores de distribuição granulométrica mais favoráveis. Destes, todos os valores da amostra M.1 se encontram dentro das especificações técnicas. A amostra A.1 não cumpre os critérios no intervalo de 300 a 425  $\mu\text{m}$ , onde a percentagem de areia retida foi superior ao requerido. O gráfico representativo das amostras com tinta (Figura 34c) foi o que apresentou maior número de resultados fora das especificações, com exceção da amostra A.3, talvez por esta amostra não ter aditivos na sua constituição. Neste lote de amostras, os peneiros de malha mais fina contêm maior percentagem de areia devido à presença de tinta.

Tal como no caso anterior, os resultados representados na Figura 35 mostram também uma distribuição granulométrica não conforme. Comparando os 3 gráficos, destacam-se os resultados relativos à areia regenerada do leito A (Figura 35a), por apresentarem valores muito próximos do desejado, nomeadamente as amostras A.1 e A.2. As amostras originárias do leito C apresentaram uma distribuição granulométrica fora das especificações técnicas na maior parte dos peneiros, muito provavelmente devido à presença do aditivo X.

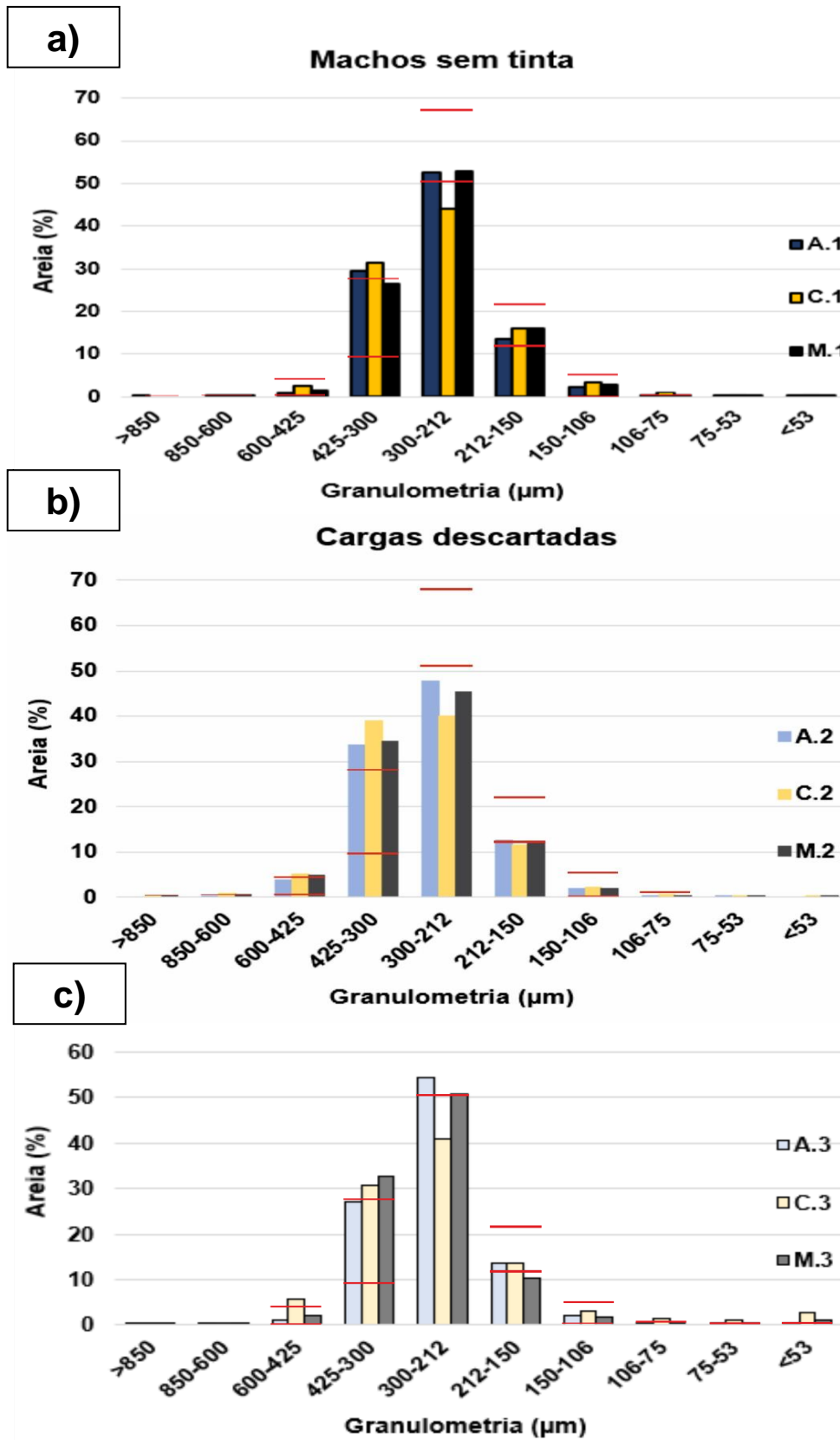


Figura 34 - Distribuição granulométrica das amostras a) machos sem tinta; b) cargas descartadas; c) machos com tinta.

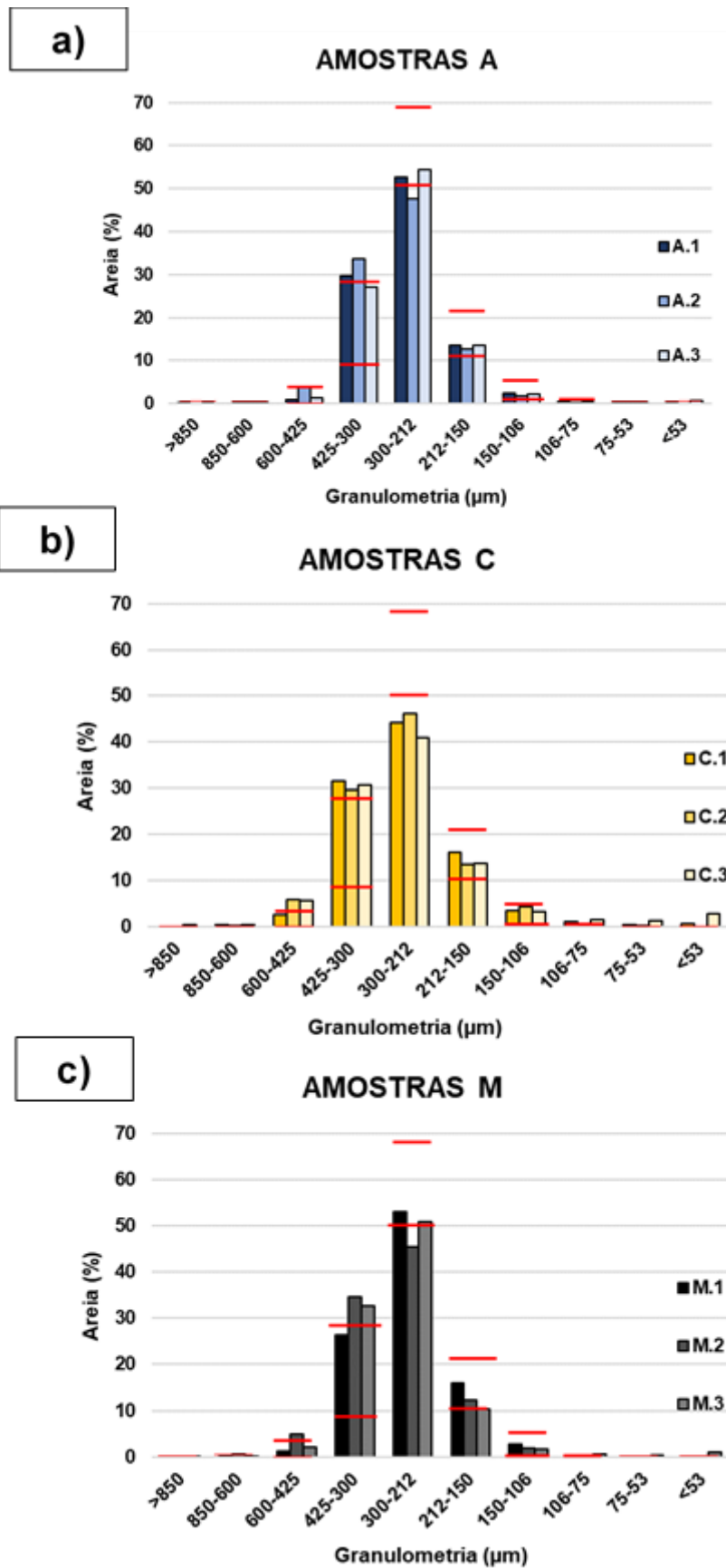


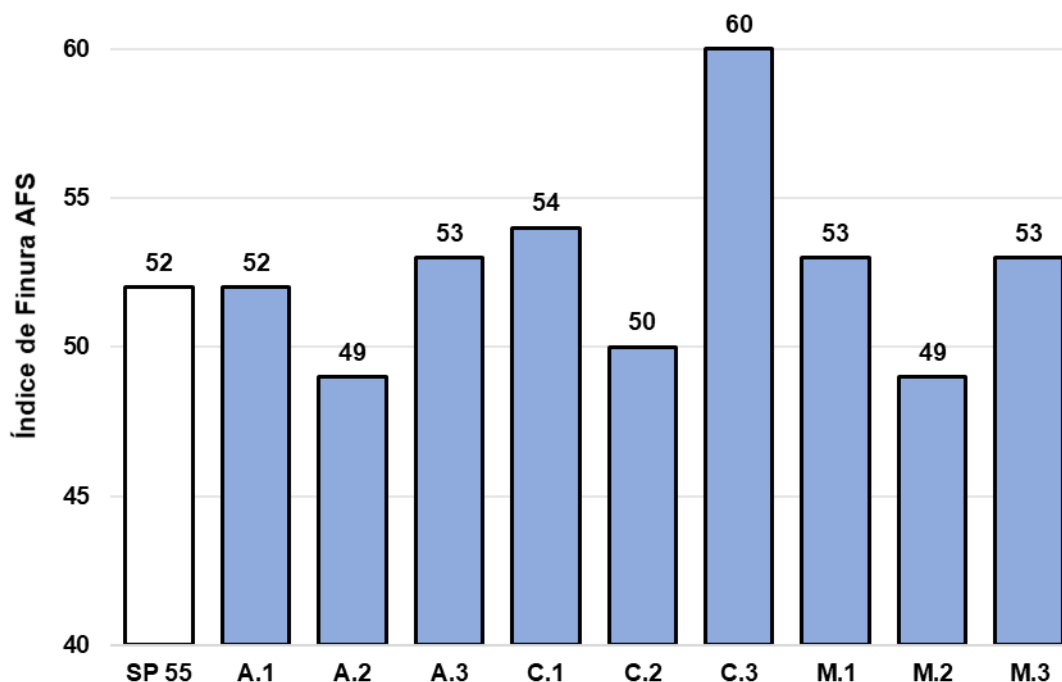
Figura 35 - Distribuição granulométrica das amostras originárias do leito a) A; b) C; c) M.



#### 4.2.1.2. Índice de Finura AFS

Os cálculos para a determinação do índice de finura AFS das amostras de areia regenerada encontram-se no Anexo 3 e os respectivos resultados estão representados na Figura 36, que inclui também o da amostra de areia base SP 55 (AFS = 52). Através da análise do gráfico é possível concluir que a amostra A.1 apresenta um índice de finura AFS igual à amostra padrão. Verificou-se também que para todas as amostras de areia regenerada exceto a A.2 e a M.2, os valores de índice de finura pertencem ao intervalo recomendado na literatura ( $50 < \text{AFS} < 60$ ) [6]. As amostras com menor índice de finura AFS (grãos mais grosseiros) são a A2 e M.2, ao passo que a amostra com maior índice de finura AFS (grãos mais finos) é a C.3.

Analisando os dados obtidos verifica-se que, embora as distribuições granulométricas das amostras A.1 e da areia de base SP 55 sejam diferentes, estas apresentam o mesmo índice de finura AFS. Por isso, o índice de finura AFS não é representativo da qualidade da areia [15].



**Figura 36** - Gráfico representativo do índice de finura AFS para as amostras de areia regenerada.

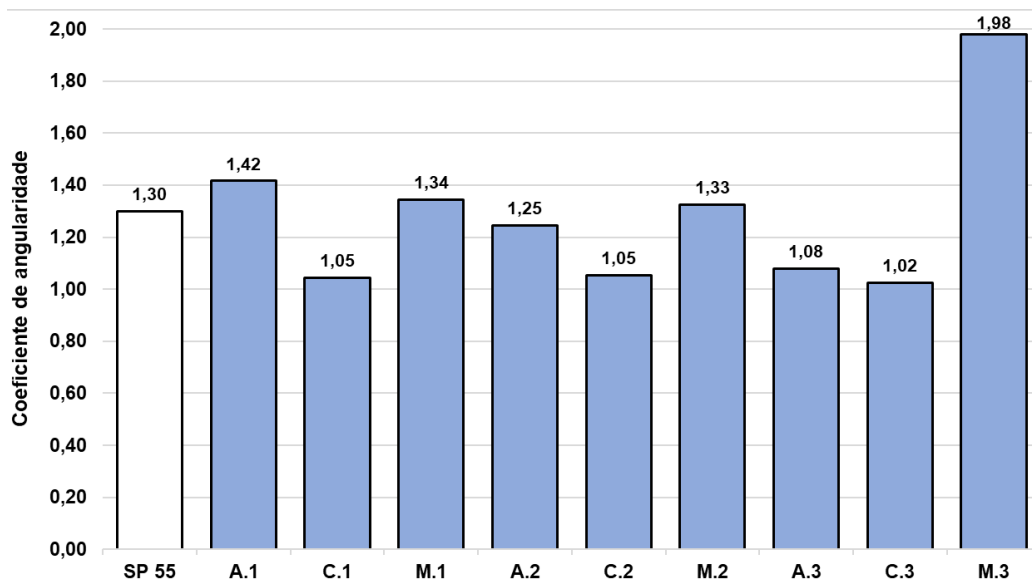
#### 4.2.1.3. Coeficiente de angularidade

Os valores do coeficiente de angularidade calcularam-se através dos valores apresentados na Tabela 10. Apesar de a regeneração da areia ter sido executada manualmente, seria expectável a alteração do coeficiente de angularidade nas amostras regeneradas. As alterações das características granulométricas devem-se à intensidade do esforço mecânico a que os grãos são sujeitos durante o processo de regeneração, que torna as suas extremidades desgastadas e irregulares fazendo aumentar o coeficiente de angularidade. Tal é possível verificar para a amostra A.1 que apresenta um coeficiente de angularidade característico de uma areia angular. De acordo com os resultados (Figura 37), pode observar-se que os valores são diferentes para todas as amostras. Os valores obtidos justificam-se pela presença ou ausência de aditivos na areia que alteram significativamente a distribuição granulométrica, bem como o coeficiente de angularidade. As amostras originárias do leito C apresentam na sua constituição um aditivo cerâmico de morfologia esférica. Por outro lado, o aditivo presente nas amostras originárias do leito M parece não alterar o coeficiente de angularidade.

De acordo com a Tabela 1 as amostras A.1 e M.3 apresentam uma morfologia angular e as restantes uma morfologia arredondada. As amostras M.2, M.1, A.2 e A.1 são as que se aproximam mais da areia base SP 55.

**Tabela 10** – Superfície específica teórica e real para as amostras de areia regenerada.

Amostras	SET (cm <sup>2</sup> /g)	SER (cm <sup>2</sup> /g)
<b>SP 55</b>	91,03	118,00
<b>A.1</b>	89,68	127,00
<b>C.1</b>	93,77	98,00
<b>M.1</b>	91,56	123,00
<b>A.2</b>	85,10	106,00
<b>C.2</b>	85,41	90,00
<b>M.2</b>	84,51	112,00
<b>A.3</b>	92,57	100,00
<b>C.3</b>	106,45	109,00
<b>M.3</b>	92,40	183,00



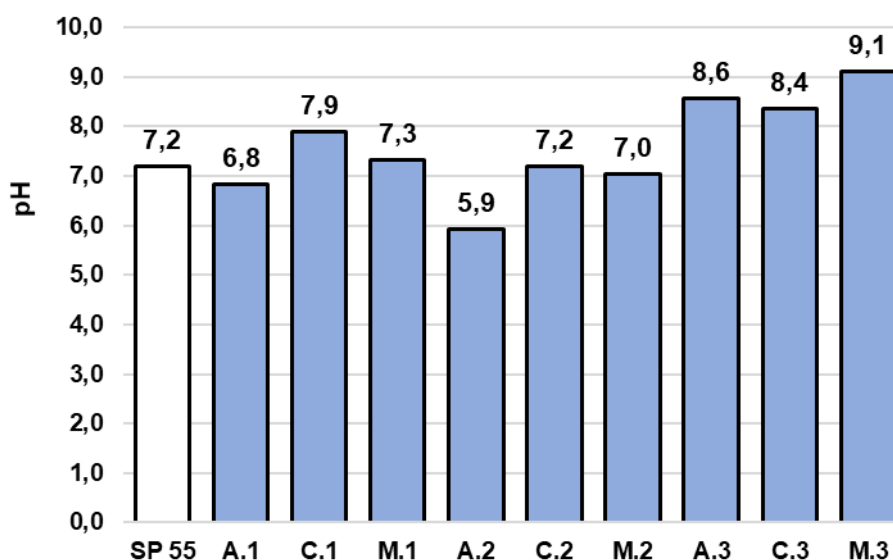
**Figura 37** - Gráfico representativo do coeficiente de angularidade das amostras de areia regenerada e respectivo desvio em relação à amostra padrão.

#### 4.2.1.4. pH e ADV

Os resultados dos ensaios da caracterização da areia regenerada, nomeadamente pH e ADV encontram-se na Figura 38 e Figura 39, respetivamente. Embora a areia base SP 55 apresente um valor de pH 7,2, seria desejável um pH 7,0 (ver ponto 2.3 do Capítulo II). A amostra M.2 foi a única que apresentou um valor de pH neutro. Pelo contrário, as amostras A.1 e A.2 têm um pH inferior a 7,0 (areias ácidas), embora a amostra A.1 se aproxima consideravelmente do pH neutro. Relativamente à amostra A.2, pode ser esperado um maior consumo do catalisador visto que no sistema fenólico-uretânico a reação ocorre em meio básico e este tipo de areia não foi exposto à ação do catalisador. As amostras A.3, C.3 e M.3 têm pH superior a 8 (areias básicas). Visto que todas elas são areias regeneradas de machos com tinta, é possível que a alcalinidade se deva à presença desta na composição da areia.

A Figura 39 representa o valor do ensaio do ADV das amostras de areia regenerada. No ensaio de ADV, as amostras originárias do leito M (M.1, M.2 e M.3) apresentaram valores superiores relativamente às restantes possivelmente devido à presença do aditivo Y (ver ponto 2.2.2 do capítulo II). Embora as amostras originárias do leito C também tenham na sua composição um aditivo, este parece não ter tanta influência no valor do ADV. As amostras de machos com tinta apresentam valores elevados de ADV com exceção da amostra A.3. Esta discrepância de resultados pode dever-se a amostragem menos correta e

esta amostra poderá conter mais ou menos tinta que as restantes. Visto que a tinta está apenas na superfície do macho e só se regenerou parte dos machos, é possível que amostragem tenha sido retirada de partes diferentes deste, fazendo com que as amostras apresentem quantidades de tinta diferentes. Seria espectável um elevado valor de ADV para todas as amostras com tinta uma vez que esta constitui uma provável fonte de partículas finas de carácter alcalino. As amostras A.1 e A.2 foram as que apresentaram valores mais baixos de ADV. No geral, as amostras de areia regenerada apresentam valores superiores de ADV comparativamente à areia base, o que implica valores de material alcalino mais elevados, podendo ser uma desvantagem para o sistema caixa fria fenólico-uretânico.



**Figura 38** - Gráfico representativo do pH da amostra padrão e das amostras de areia regenerada

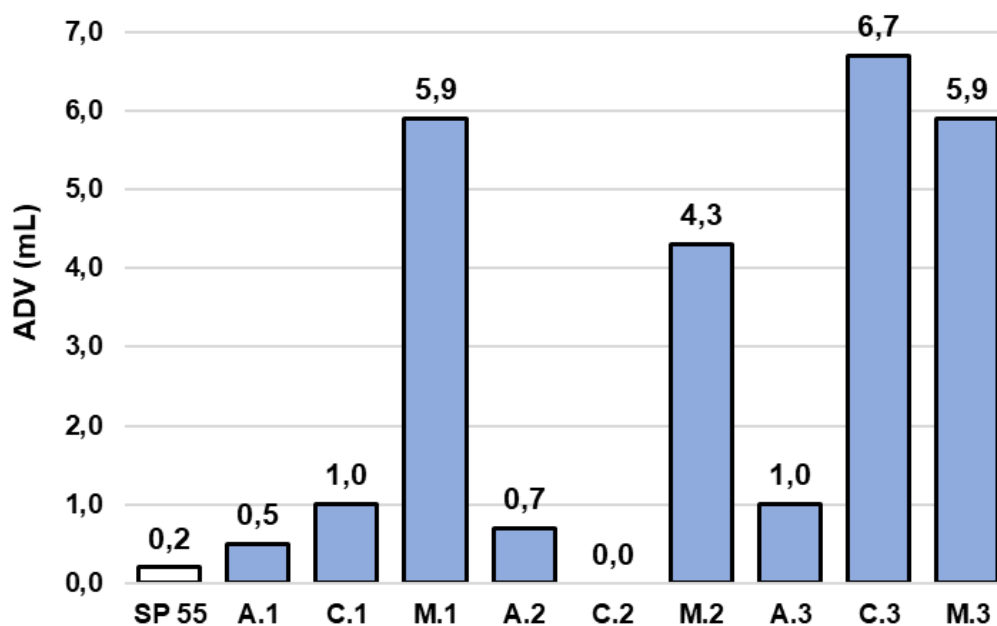


Figura 39 - Gráfico representativo do ADV da amostra padrão e das amostras de areia regenerada.

#### 4.2.1.5. Carbonatos, humidade e perda ao fogo

A Tabela 11 apresenta os resultados dos ensaios da determinação da percentagem de carbonatos, humidade e perda ao fogo. A primeira linha apresenta os resultados da areia padrão, seguindo-se os valores das areias regeneradas organizados por ordem crescente da percentagem de perda ao fogo (menor percentagem para a maior).

A percentagem de carbonatos, em todas as amostras, foi bastante próxima da areia base SP 55. Pelo contrário, na percentagem de humidade, ocorreu uma pequena variação relativamente à amostra padrão. No entanto, todas as amostras apresentam teores de humidade abaixo do limite máximo de especificação (0,2%) [21]. Desta maneira pode afirmar-se que tal parâmetro não terá influência significativa nas propriedades da areia regenerada.

Por fim, no ensaio de perda ao fogo os valores foram muito dispersos. Uma vez que a perda ao fogo está principalmente associada à queima de matéria orgânica, a percentagem determinada corresponde à resina e, eventualmente, à tinta de cada amostra, vindo confirmar a presença deste material orgânico. Os valores de perda ao fogo demonstram que somente a operação de

destorroamento não remove a resina que cobre os grãos, apenas quebra a ligação entre estes. As amostras A.2 e A.1 foram as que apresentaram menor valor de perda ao fogo, devido à menor percentagem de resina originalmente presente na sua constituição.

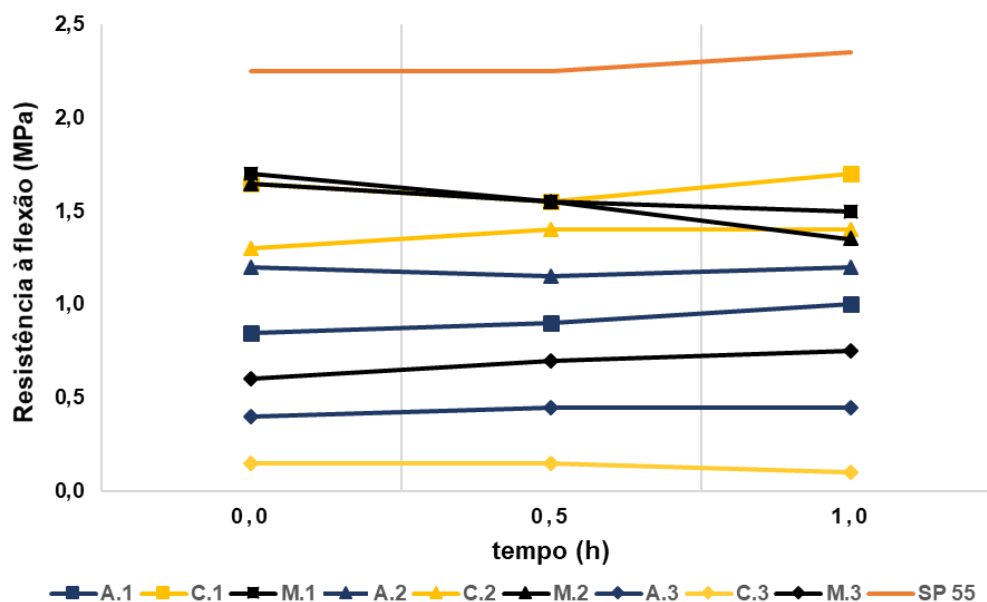
**Tabela 11** - Resultados dos ensaios de determinação de carbonatos, humidade e perda ao fogo das amostras de areia regenerada e areia base SP 55.

<b>Amostras</b>	<b>Carbonatos (%)</b>	<b>Humidade (%)</b>	<b>Perda ao fogo (%)</b>
<b>SP 55</b>	0,01	0,01	0,18
<b>A.2</b>	0,00	0,06	1,26
<b>A.1</b>	0,00	0,05	1,31
<b>A.3</b>	0,03	0,03	1,34
<b>M.1</b>	0,03	0,14	1,59
<b>C.1</b>	0,00	0,06	1,63
<b>M.2</b>	0,03	0,07	1,63
<b>C.2</b>	0,02	0,03	1,75
<b>M.3</b>	0,03	0,06	1,90
<b>C.3</b>	0,03	0,04	2,19

#### 4.2.2. Provetes de 100% de areia regenerada

##### 4.2.2.1. Ensaio mecânicos e permeabilidade para provetes de cada amostra

Os resultados dos ensaios realizados a 63 provetes, preparados com as 9 amostras de areia regenerada e o sistema ligante utilizado na produção, são seguidamente apresentados e analisados. Na Figura 40 são apresentados os resultados obtidos do ensaio de resistência precoce à flexão para os provetes de 100% de areia regenerada, e comparados com os da areia padrão. A resina de série corresponde à percentagem de resina utilizada pela *Funfrap* no processo de fabrico dos machos tal como representado na Tabela 5. É possível observar que os valores variam de 1,7 MPa a 0,1 MPa, verificando-se os valores mais baixos para as amostras com tinta (M.3, A.3 e C.3). A presença de tinta é, portanto, um fator condicionante na resistência mecânica dos machos produzidos com esta areia regenerada, tornando-os pouco resistentes.

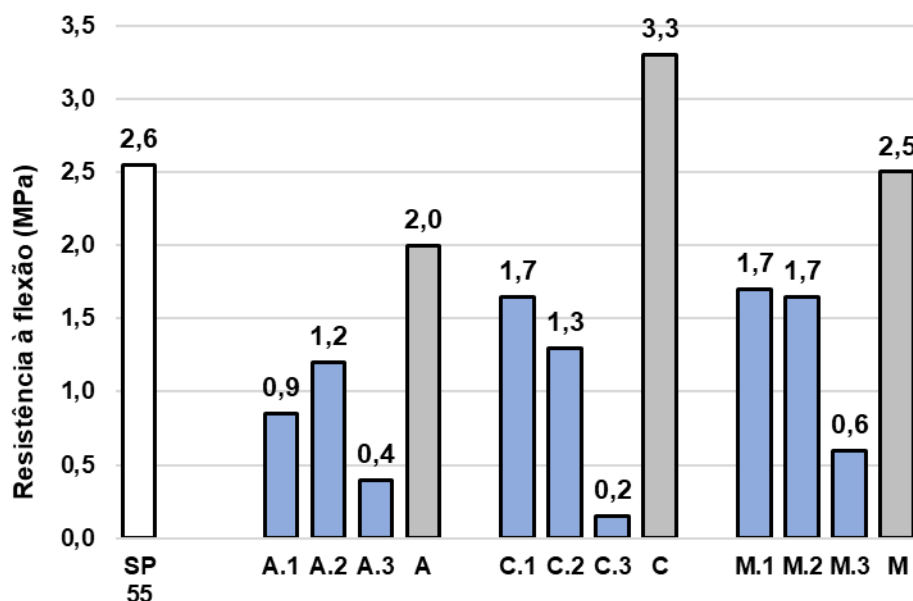


**Figura 40** - Resultados da resistência à flexão de 100% de areia regenerada com resina utilizada na produção.

A variação da percentagem de resina também influencia a resistência mecânica. Nos provetes que utilizam menos resina (A.1 e A.2) verificam-se valores mais baixos de resistência mecânica do que a areia SP 55, tal como previsto [32]. Tal como anteriormente observado para os provetes de areia padrão, a variação de resistência nas primeiras três horas é diminuta, podendo considerar-se que a tendência geral será para aumentar com o tempo.

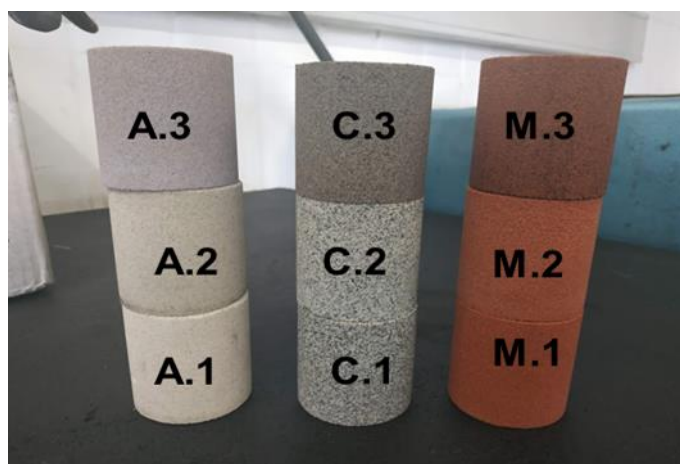
A Figura 41 também compara a resistência inicial à flexão (0,0 h, na Figura 40) dos provetes da amostra padrão (SP55) e dos provetes das amostras regeneradas (A.1, A.2, A.3, C.1, C.2, C.3, M.1, M.2 e M.3) com a média dos valores da resistência à flexão dos provetes da produção (A, C e M). Através da análise do gráfico, verifica-se que as amostras com tinta (A.3, C.3 e M.3) são de facto as menos resistentes mecanicamente por apresentarem valores muito afastados dos valores da amostra padrão e das amostras dos provetes da produção. Relativamente às amostras de areia regenerada originárias do leito C, estas apresentaram também valores muito baixos comparativamente aos valores dos provetes de produção, sugerindo que a presença do aditivo X pode constituir uma barreira no processo de regeneração de areia de macharia. Destacam-se positivamente os provetes das amostras M.1, M.2 e A.2 por apresentarem valores próximos dos valores dos correspondentes provetes da produção, embora apresentem valores distantes dos da areia padrão. No entanto, tal seria de prever uma vez que a quantidade de resina presente nas amostras de areia regenerada originárias do leito A (<1,6%) é inferior à quantidade de resina utilizada para os provetes formados por areia padrão (=1,6%). Nos provetes formados por areia regenerada originária do leito M utilizou-se mais quantidade de resina (>1,6%) comparativamente aos provetes de areia padrão, pelo que seria de esperar valores mais elevados para as amostras M. Apesar disso, os valores de resistência à flexão para os provetes M de produção (2,5 MPa) são próximos dos valores da areia padrão. Desta maneira, é possível prever que a presença do aditivo Y, influencie a resistência à flexão, fazendo diminuir o seu valor.





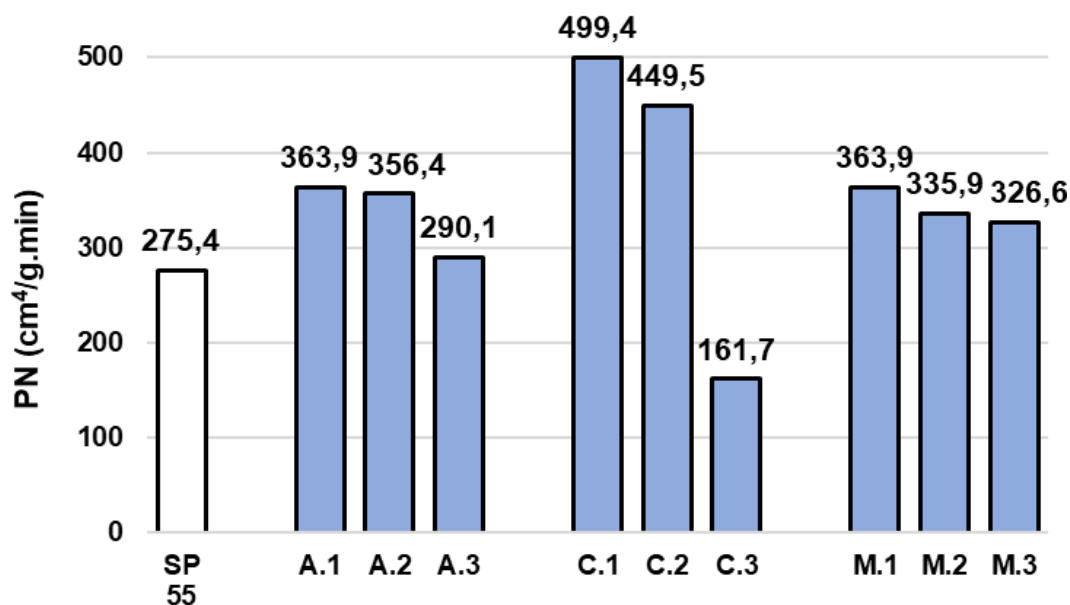
**Figura 41** - Gráfico representativo da resistência à flexão no imediato, da amostra padrão, das amostras regeneradas e dos valores médios dos provetes de produção.

Para os ensaios de permeabilidade foram feitos 9 provetes, Figura 42. Os resultados obtidos, Figura 43, revelam um maior número de permeabilidade para as amostras C.1 e C.2. As amostras originárias do leito C diferem-se das restantes pela presença do aditivo X. Este aditivo é um cerâmico de morfologia esférica que atua como um grão de areia arredondado, deixando espaços vazios e fazendo aumentar a permeabilidade. Contrariamente, nas amostras com tinta (C.3), esta atua como fino e preenche os espaços entre os grãos, afetando a porosidade da areia que, por sua vez, controla a permeabilidade, conduzindo à sua diminuição.



**Figura 42** - Provetes de 100% de areia regenerada para o ensaio da permeabilidade.

As restantes amostras (A.1, A.2, M.1, e M.2) apresentaram valores semelhantes de permeabilidade, mas que tendem a ser ligeiramente superiores aos valores dos provetes de areia virgem, podendo tal justificar-se pela presença de resíduos de resina aderida aos grãos (pior empacotamento), porventura agravada pela presença do aditivo Y para as amostras M.1 e M.2.



**Figura 43** - Resultados do número de permeabilidade (PN) de 100% de areia regenerada com resina de série.

A dureza, representada na Figura 44, é medida pela profundidade de penetração no macho e é tanto maior quanto menor for a profundidade. Saliente-se desde logo que as amostras formadas por areia regenerada de machos com tinta (areia tipo 3) apresentam valores próximos de 7 mm de profundidade de penetração, concluindo-se que a presença de tinta na areia regenerada pode ser um fator condicionante na dureza e, portanto, no fabrico de machos. A tendência geral é para alguma diminuição da dureza, particularmente para as amostras de areia regenerada originária do leito A (A.1 e A.2), o que seria de esperar uma vez que a dureza é tanto menor quanto menor for a quantidade de resina usada [18]. Apenas as amostras C.1 (com aditivo X) e M.2 (com resina > 1,6%) apresentam dureza superior à do provete de areia padrão.

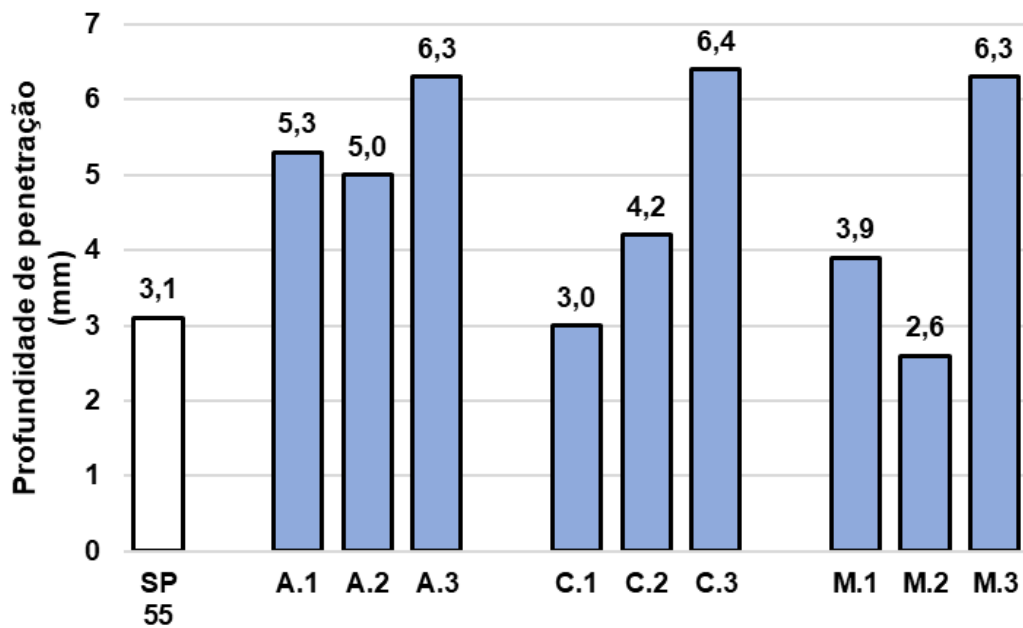


Figura 44 - Resultados da dureza de 100% de areia regenerada com resina de série.

#### 4.2.2.2. Ensaios mecânicos e permeabilidade para os provetes formados por misturas de amostras

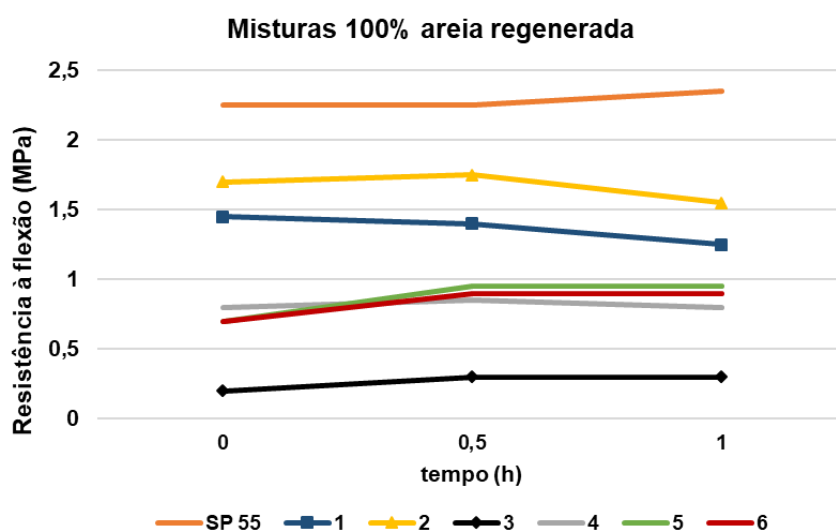
Para as seis misturas de areia regenerada foram feitos 36 provetes para a determinação da resistência à flexão e dureza e 6 para a permeabilidade (Figura 45). Tal como anteriormente, no ensaio da dureza utilizaram-se os provetes partidos no ensaio de resistência à flexão.



Figura 45 - Provetes das misturas para o ensaio da permeabilidade.

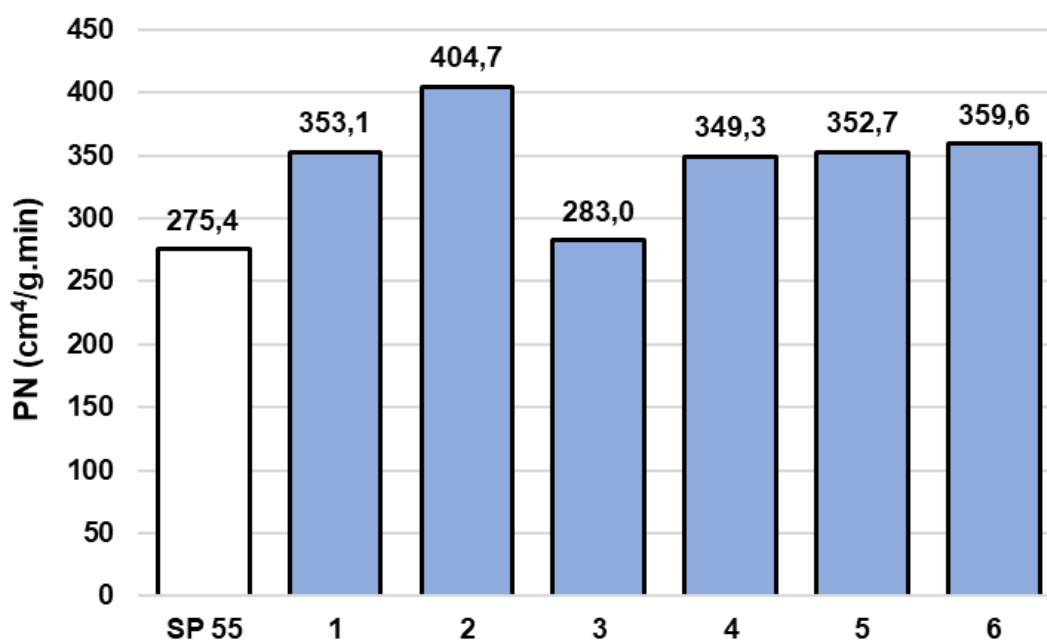
Os resultados de resistência à flexão das misturas de areia regenerada estão representados na Figura 46. Todas as amostras apresentaram valores

significativamente inferiores aos obtidos com a areia padrão. A mistura 2 (mistura de areia regenerada de cargas descartadas) apresentou valores mais elevados de resistência à flexão, seguindo-se a mistura 1 (mistura de areia regenerada de machos sem tinta). Verificou-se novamente que os valores de resistência à flexão mais baixos, variando de 0,2 a 0,95 MPa, foram registados para as misturas que continham areia regenerada de machos com tinta.



**Figura 46** - Resultados do ensaio de resistência à flexão para 100% de areia regenerada proveniente de sucata de macharia (misturas).

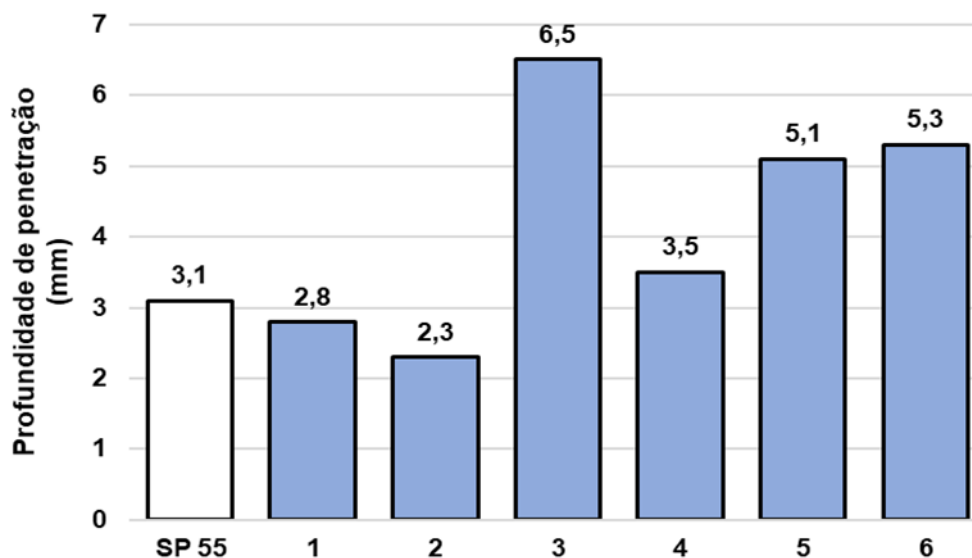
Relativamente aos resultados do ensaio de permeabilidade, representados na Figura 47, a mistura 3 (PN = 283,0 cm<sup>4</sup>/g.min) é a que se aproxima mais do valor da areia SP 55 (PN = 275,4 cm<sup>4</sup>/g.min). Esta corresponde à mistura formada por areia regenerada de machos com tinta (A.3+C.3+M.3) que apresenta valores de resistência à flexão muito baixos (Figura 46). Seria de esperar que esta amostra apresentasse valores de permeabilidade baixos devido à presença de tinta que atua como fino, preenchendo os vazios entre os grãos. As amostras das misturas 1, 4, 5 e 6 apresentam também valores de PN muito próximos da amostra de areia SP 55. A simultaneidade da presença dos diferentes aditivos e da tinta pareceu estabilizar o valor do número de permeabilidade.



**Figura 47** - Resultados do ensaio de permeabilidade das misturas das amostras para provetes formados por 100% de areia regenerada.

De acordo com os resultados da dureza (Figura 48), a mistura 3 (formada apenas por areia regenerada de machos com tinta), que já tinha apresentado o pior desempenho mecânico, é a que apresenta maior profundidade de penetração (menor dureza) e, conseqüentemente, um valor mais distante em relação ao valor de dureza do provete de areia virgem. A mistura 2 (formada por areias que não foram expostas ao gás catalisador) é a que apresenta a maior dureza, provavelmente devido ao excesso de resina ainda ativa. O efeito da presença de tinta pode ser ainda observado na dureza dos provetes nas misturas 5 e 6, que apresentam valores baixos e comparáveis de dureza, ainda que melhores que o da mistura 3 (menor profundidade de penetração). As misturas 4 e 6 têm a mesma proporção de areias com tinta mas a presença, na mistura 4, de areias que não foram expostas ao catalisador compensa o efeito prejudicial da tinta. As misturas 1, 4 e 2 são as que se aproximaram mais dos valores da areia SP 55.

No geral, as misturas que apresentavam tinta na sua constituição apresentam valores de resistência à flexão e dureza muito baixos, concluindo-se que não são as ideais para a regeneração e produção de machos. Pondo de parte as misturas com tinta (3, 4, 5 e 6), a mistura correspondente à número 1 (areia regenerada de machos sem tinta) embora apresente resultados de resistência à flexão ligeiramente inferiores aos da mistura 2, é a que apresenta permeabilidade e dureza mais semelhantes às da areia virgem.



**Figura 48** - Resultados do ensaio de dureza das misturas das amostras para provetes formados por 100% de areia regenerada.

Ao longo da caracterização de areia regenerada e tendo em conta o conjunto de resultados obtidos, as amostras A.1 e A.2 foram as amostras que se destacaram positivamente. Estas apresentaram uma distribuição granulométrica próxima do requerido e o coeficiente de angularidade foi próximo do da areia virgem. Embora tenham apresentado valores de pH ligeiramente abaixo de 7, no que diz respeito ao ADV estas foram as que tiveram um valor mais reduzido, bem como na perda ao fogo. A percentagem de carbonatos foi nula e a percentagem de humidade encontrava-se dentro dos parâmetros definidos pela literatura. Nos ensaios de resistência à flexão e dureza destacaram-se as misturas de areia regenerada provenientes de cargas descartadas (mistura 1) e machos sem tinta (mistura 2) no qual as amostras anteriormente referidas se encontram incluídas. Apenas no ensaio de permeabilidade a mistura 2 apresentou valores mais elevados do que o desejável.

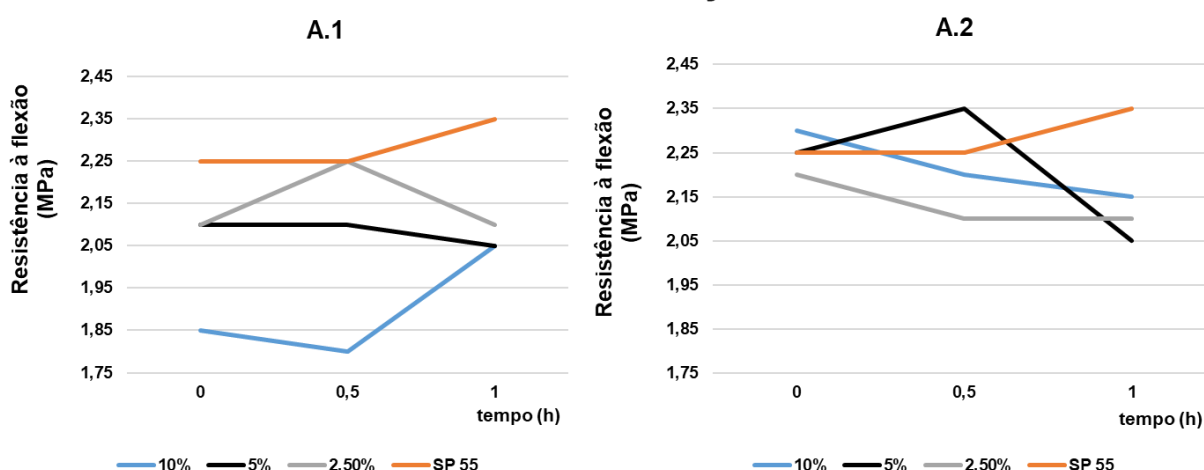
Tendo em conta os resultados apresentados e a sua análise, conclui-se que a introdução de areia regenerada no circuito de preparação de areias de machos requer alguns cuidados mas não altera dramaticamente as propriedades dos machos produzidos. Tal alteração será tanto menor quando mais “diluídas” forem as novas formulações (maior teor em areia virgem). A manutenção de areia virgem nas novas formulações irá garantir que as propriedades das misturas se aproximam das propriedades da areia virgem, nomeadamente no que diz respeito à resistência à flexão.

### 4.3. Novas formulações

Nesta etapa foram definidas novas formulações formadas por areia regenerada de macharia e areia base. Tendo em conta os resultados discutidos anteriormente, elaboraram-se formulações constituídas por 10, 5 e 2,5% de areia A.1 ou A.2 e efetuaram-se novamente ensaios mecânicos de resistência à flexão, permeabilidade e dureza.

#### 4.3.1. Resistência à flexão

Na Figura 49 estão representados os gráficos relativos à resistência precoce à flexão determinada para as diferentes percentagens das duas areias regeneradas A.1 e A.2. Estão também representados nos gráficos os resultados da resistência à flexão da areia base SP 55 mencionados na parte inicial dos Resultados e Discussão com o intuito de ajudar na discussão da escolha da melhor formulação de areia.



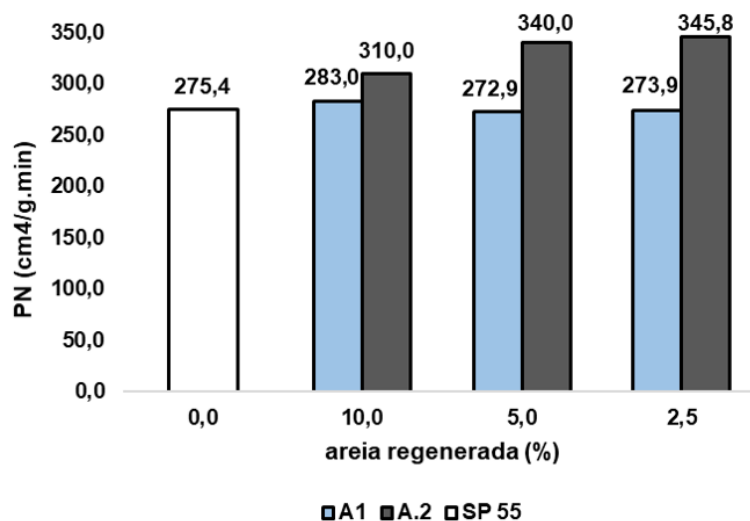
**Figura 49** - Resultados dos ensaios de resistência à flexão para as novas formulações.

Ao longo do tempo, com exceção da areia base e da formulação que utiliza 10% de areia A.1 regenerada, a resistência precoce à flexão não varia significativamente sendo que em algumas formulações tem tendência a diminuir, ao contrário do que seria de prever (conforme indicado no ponto 4.1.2). Comparativamente aos resultados apresentados para 100% de areia regenerada, os valores agora apresentados são mais próximos dos da areia base.

### 4.3.2. Permeabilidade

Para as novas formulações foi também analisada a permeabilidade e feita uma comparação com o valor da areia base SP 55, conforme indicado na Figura 50. Os resultados mostram um aumento significativo de permeabilidade, estando os valores cada vez mais próximos dos da areia base, nomeadamente nas amostras A.1, onde a diferença para a areia padrão não excede os 7 cm<sup>4</sup>/g.min.

A areia regenerada A.2 apresentou um índice de finura AFS maior (areia mais fina) verificando-se um valor maior de permeabilidade para os provetes que contêm esta areia, provavelmente devido a um pior empacotamento de grãos.



**Figura 50** – Resultados do ensaio de permeabilidade para as novas formulações.

Em termos relativos, é notória a diferença entre os provetes compostos por areia da amostra A.1 e os provetes com areia da amostra A.2, apresentando as novas formulações formadas por areia virgem e areia da amostra A.1 valores de variação muito inferiores. Os resultados mais próximos da areia virgem foram os dos provetes formados por 5 ou 2,5% de areia regenerada. No caso das formulações com areia A.2 os resultados mais próximos foram apresentados pelos provetes constituídos por 10% de areia regenerada.



### 4.3.3. Dureza

Para as novas formulações foram também feitos ensaios de dureza. Pelo gráfico da Figura 51, verifica-se que não existem diferenças substanciais nos valores de dureza para as diferentes percentagens de areia regenerada, embora a amostra que utiliza 5% de areia regenerada A.2 e a amostra que utiliza 2,5% de areia regenerada A.1 apresentem valores de profundidade de penetração ligeiramente inferiores às restantes. É de enfatizar também que as novas formulações apresentam valores de profundidade penetração inferiores às amostras de areia base SP 55 (3,1cm).

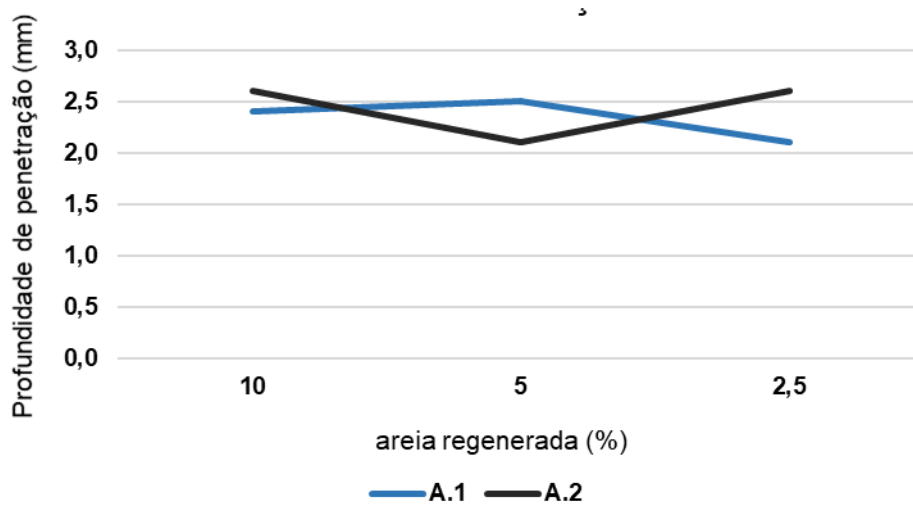
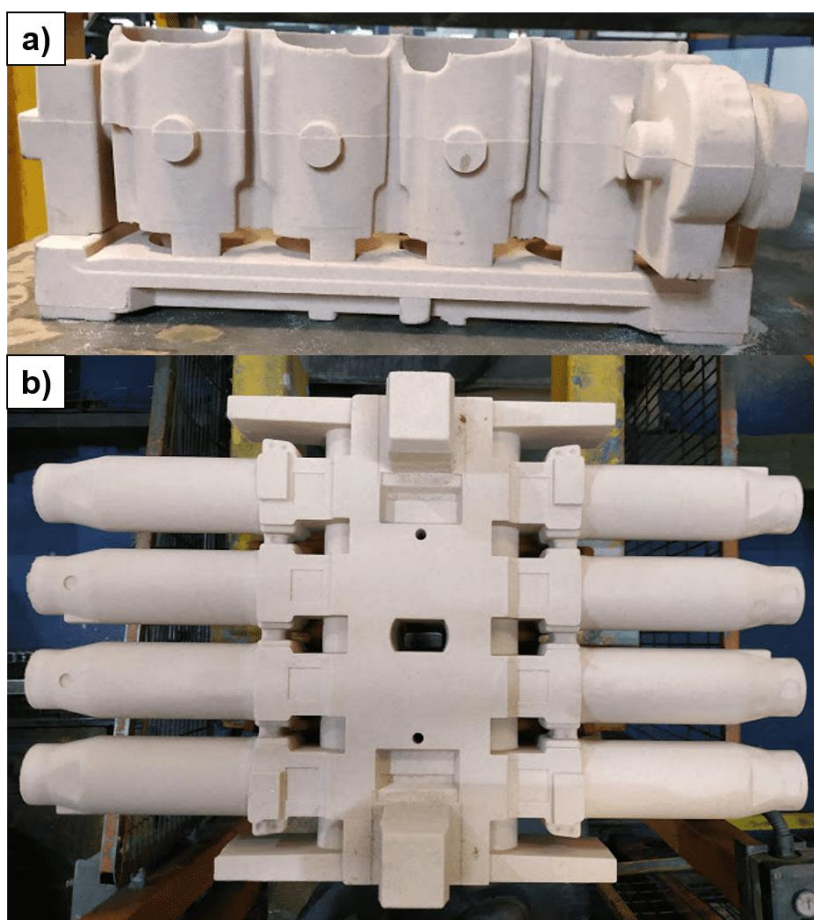


Figura 51 - Resultados de dureza para novas formulações.

#### 4.4. Ensaio industrial

O ensaio industrial consistiu no vazamento de 44 blocos de motor organizados 11 moldações cujos machos foram produzidos com uma formulação com 5% de areia regenerada do tipo A.1 (machos sem tinta). Os machos produzidos encontram-se representados na Figura 52. No total foram produzidos 44 camisas de água (Figura 52a) e 22 machos corpos cilindros, pois cada macho corpo cilindro é usado em simultâneo por dois blocos de motor (Figura 52b).

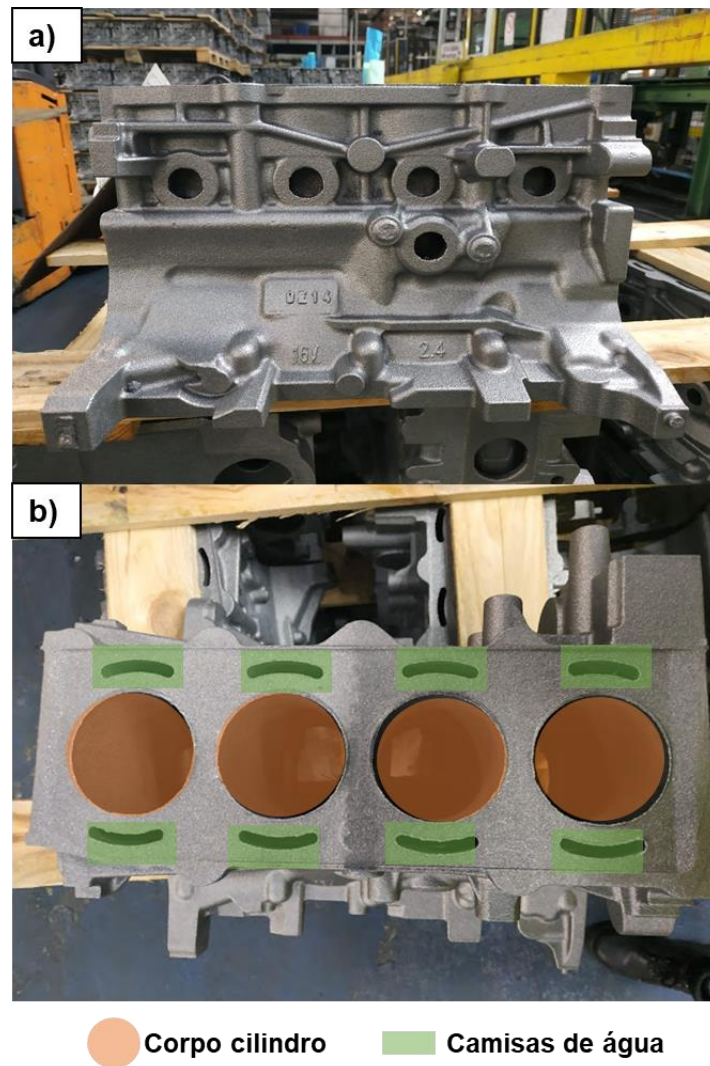


**Figura 52** - Machos formados por 5% de areia regenerada a) camisa de água b) corpo cilindro.

Um dos machos corpos cilindros partiu quando chegou à moldação sendo apenas vazados 42 blocos de motor, dos 44 que estavam previstos. Um dos blocos de motor produzidos encontra-se representado na Figura 53. Através da vista de cima (Figura 53b) é possível observar as cavidades originadas pelos machos produzidos. O sombreado a laranja corresponde à cavidade originada pelo corpo cilindro e o sombreado a verde à cavidade originada pela camisa de

água. As cavidades referidas foram analisadas com ajuda de uma lanterna com o intuito de confirmar a ausência de defeitos, sendo que de todas as peças analisadas nenhuma apresentou defeitos. Por fim, foram determinadas as percentagens de sucata de macho (3,4%) e de peças finais (nula).

Para além do controlo visual foram também realizados ensaios de resistência à flexão, permeabilidade e dureza dos machos produzidos bem como dos machos de série (Tabela 12). Os valores dos ensaios dos machos da produção (machos de série) serviram como termo de comparação para os valores dos machos produzidos. Para as camisas de água o valor obtido foi 19% inferior em relação aos machos de série e para os corpos cilindros foi 25% inferior. É de salientar que, embora os valores de ensaio de resistência à flexão para os machos produzidos tenham sido relativamente mais baixos, tal discrepância não se tornou relevante na medida em que a percentagem de sucata calculada foi nula. No ensaio de permeabilidade não se verificou diferenças significativas, sendo a percentagem de diferença em relação ao ensaio de série nula para os copos cilindros, e houve um aumento de apenas 3% para as camisas de água. Por último, no ensaio de dureza verificou-se um aumento de 8% para os corpos e de 30% para as camisas de água.



**Figura 53** – Cárter-cilindro fabricado através de machos formados por 5% de areia regenerada a) vista de frente e b) vista de cima.

**Tabela 12** - Valores dos ensaios realizados aos machos de ensaio e machos de produção (série).

Macho	Ensaio	Resistência à flexão (MPa)	PN (cm <sup>4</sup> /g.min)	Profundidade de penetração (mm)
<b>Corpos-cilindros</b>	série	1,80	175	3,7
	ensaio	1,35	175	4,0
	percentagem (%)	-25	0	+8
<b>Camisas</b>	série	2,40	165	2,0
	ensaio	1,95	170	2,6
	percentagem (%)	-19	+3	+30

#### 4.5. Análise de custos

A análise de custos foi realizada para 20 dias úteis (um mês) e não teve em consideração os gastos relativos à manutenção e energia despendida pelo equipamento de regeneração de areia. Tendo em conta os ganhos e as perdas previstas, foi calculado o balanço económico para a incorporação de 5% da amostra A.1, com o propósito de certificar que a aplicação dos resultados deste estudo é viável.

Os ganhos passam pela redução dos custos de aquisição de areia virgem, e de não deposição em aterro. Sabe-se que, em média, a percentagem correspondente à sucata de machos sem tinta originários do leito A corresponde, aproximadamente, a 70% do total da sucata de macharia. Uma vez que o total de sucata de macharia diária é de aproximadamente 5% das 100 toneladas de areia introduzidas diariamente, calculou-se a quantidade em massa de machos sem tinta originários do leito A, resultando num valor de 3,5 toneladas/dia (cerca de 70 ton em 20 dias).

Foi também necessário ter em conta as perdas do processo: a produção de finos resultantes do despoeiramento da máquina de regeneração de areia, bem como a prática de despejo de finos em aterro, que acarreta custos, constituindo uma desvantagem deste processo. O rendimento relativo à regeneração de areia varia entre os 85 e 90%, originando assim mais 10 a 15% de finos. Na Tabela 13 podem encontrar-se os valores, em euros, dos ganhos, perdas e do balanço final. O valor determinado para o balanço benefício/custo foi de 4 000€/mês.

**Tabela 13** - Análise mensal de custos para 5% de areia regenerada A.1.

<b>5% de areia regenerada A.1</b>		
<b>Ganhos</b>	Redução da aquisição de areia virgem	5 000 €
	Redução da deposição em aterro	
<b>Perdas</b>	Deposição de finos em aterro	1000 €
<b>Balanço</b>	Diferença entre os custos e as perdas	4 000 €

Sabe-se que para o ensaio fabril de vazamento de 42 blocos de motor com 5% de areia regenerada, foram utilizados 37,5 kg de areia regenerada. Desta maneira e com o objetivo de reutilizar toda a areia da sucata de macharia

proveniente do leito A (3 500 kg/dia) seria possível o fabrico de cerca de 3 920 blocos de motor. A quantidade de areia de sílica virgem utilizada seria de 66 500 kg (95% do total de areia para o fabrico de machos).

## **CAPÍTULO V**

---

### **Conclusões Trabalhos Futuros**





### 5.1. Conclusões

O estágio curricular foi particularmente valioso como primeiro contacto com a indústria e principalmente com o setor de fundição. A aprendizagem adquirida ao longo do tempo permitiu desenvolver múltiplas capacidades, tais como, sentido de responsabilidade, destreza laboratorial em ensaios de caracterização, e familiarização industrial (contacto direto com a produção de peças para o setor automóvel e conhecimento das inúmeras variáveis envolvidas neste processo).

A realização deste trabalho permitiu concluir que é possível a regeneração e a reintrodução de areia de sucata de macharia regenerada no processo de fabrico de machos. A utilização de 5% de areia regenerada no processo caixa fria fenólico-uretânico, de clara importância ambiental, mostrou-se uma alternativa viável do ponto de vista económico.

Para chegar a esta conclusão foi necessário caracterizar as areias regeneradas e compará-las com a areia padrão, para o que foram realizados ensaios de distribuição granulométrica, coeficiente de angularidade, pH, valor de acidez, perda ao fogo, carbonatos e humidade. Numa segunda fase do trabalho foram realizados vários ensaios de resistência à flexão, dureza e permeabilidade para os provetes formados por 100% de areia regenerada. Os estudos iniciais da caracterização da areia permitiram a seleção de duas amostras de areia regenerada (A.1 e A.2) que apresentavam características mais próximas da areia padrão:

- ✓ Distribuição granulométrica pouco discrepante;
- ✓ Índice de finura AFS igual ao do padrão (amostras A.1) e pouco discrepante (amostra A.2);
- ✓ ADV reduzido;
- ✓ Carbonatos inexistentes;
- ✓ Humidade dentro dos valores descritos pela literatura;
- ✓ Menor percentagem de perda ao fogo;
- ✓ Ausência de aditivos;
- ✓ Ausência de tinta.

Pelos resultados dos ensaios aos provetes formados por 100% de areia regenerada, foi possível verificar que a presença de tinta na sucata de macharia é, de facto, um problema para a incorporação deste resíduo. Esta atua como um componente fino tendo influência direta nas características principais de um macho, que são a resistência à flexão, a permeabilidade e a dureza. No ensaio da resistência à flexão das misturas das amostras de areia regenerada destacaram-se as misturas 1 (areia regenerada de machos sem tinta) e 2 (areia regenerada de cargas descartadas) no qual se incluem as amostras A.1 e A.2, respetivamente.

Tendo em conta o conjunto dos valores obtidos para a resistência à flexão, a permeabilidade e a dureza, procedeu-se à elaboração de novas formulações à base de areia de sílica virgem com a incorporação de 10, 5 e 2,5% de areia regenerada das amostras selecionadas A.1 e A.2.

Após a realização de ensaios de caracterização da resistência à flexão, da permeabilidade e da dureza, concluiu-se que a incorporação de 5% de areia regenerada do tipo A.1 para a produção de machos seria o valor mais adequado. É de salientar que não só a utilização de valores superiores a 5% exigiria um maior controlo do processo, como também excederia a quantidade de sucata desse tipo gerada diariamente. No ensaio industrial com a incorporação desta percentagem, apenas um macho partiu antes de chegar à moldação sendo o valor da sucata de machos aproximadamente nulo (3,4%), pelo que os controlos desta prática podem ser semelhantes aos controlos já existentes. Através da reutilização dos cerca de 70% daquela sucata de macharia, foi possível reduzir os custos de deposição em aterro bem como os de aquisição de matéria-prima (areia de sílica) resultando num balanço económico de 4 000 €/20 dias.

Fez-se também uma estimativa da quantidade de blocos de motor que poderiam ser produzidos com a areia regenerada de sucata de macharia diária originária do leito A (3 500 kg), o que corresponde ao consumo total da sucata gerada: tendo em conta a quantidade de areia regenerada utilizada no ensaio industrial para o fabrico de 42 blocos de motor, obtém-se o valor de 3 920.

## 5.2. Trabalhos Futuros

Embora o tratamento mecânico da areia de sucata de macharia não permita a remoção completa do filme de resina que aglutina os grãos, a regeneração mecânica no equipamento disponível na *Funfrap* incluía uma etapa essencial de despoeiramento, permitindo a eliminação de impurezas finas como os fragmentos dos filmes de tinta e da própria resina. A remoção desta fração mais fina é essencial para o ajuste da granulometria da areia regenerada aproximando-a das características da areia padrão. Neste estudo foi feita, manualmente, uma aproximação grosseira da regeneração mecânica, pelo que não foi possível a realização de algumas etapas fundamentais, nomeadamente, a regeneração mecânica no equipamento “Klein” e a determinação do teor de finos da areia regenerada.

Além da remoção de finos, os resultados obtidos neste trabalho de estágio também não contemplaram o ajuste granulométrico da areia regenerada, no sentido de aproximar as suas características das da areia padrão.

Finalmente, o tratamento termomecânico seria o ideal para a regeneração da areia, uma vez que iria permitir não só o destorroamento, mas também a remoção total, por combustão, da resina existente. É previsível que uma regeneração adequada, seja mecânica, seja térmica, permita tratar a generalidade da sucata gerada sem necessidade de coleta seletiva, o que se traduzirá em percentagens de incorporação no fabrico de machos superior aos 5% agora apresentados.



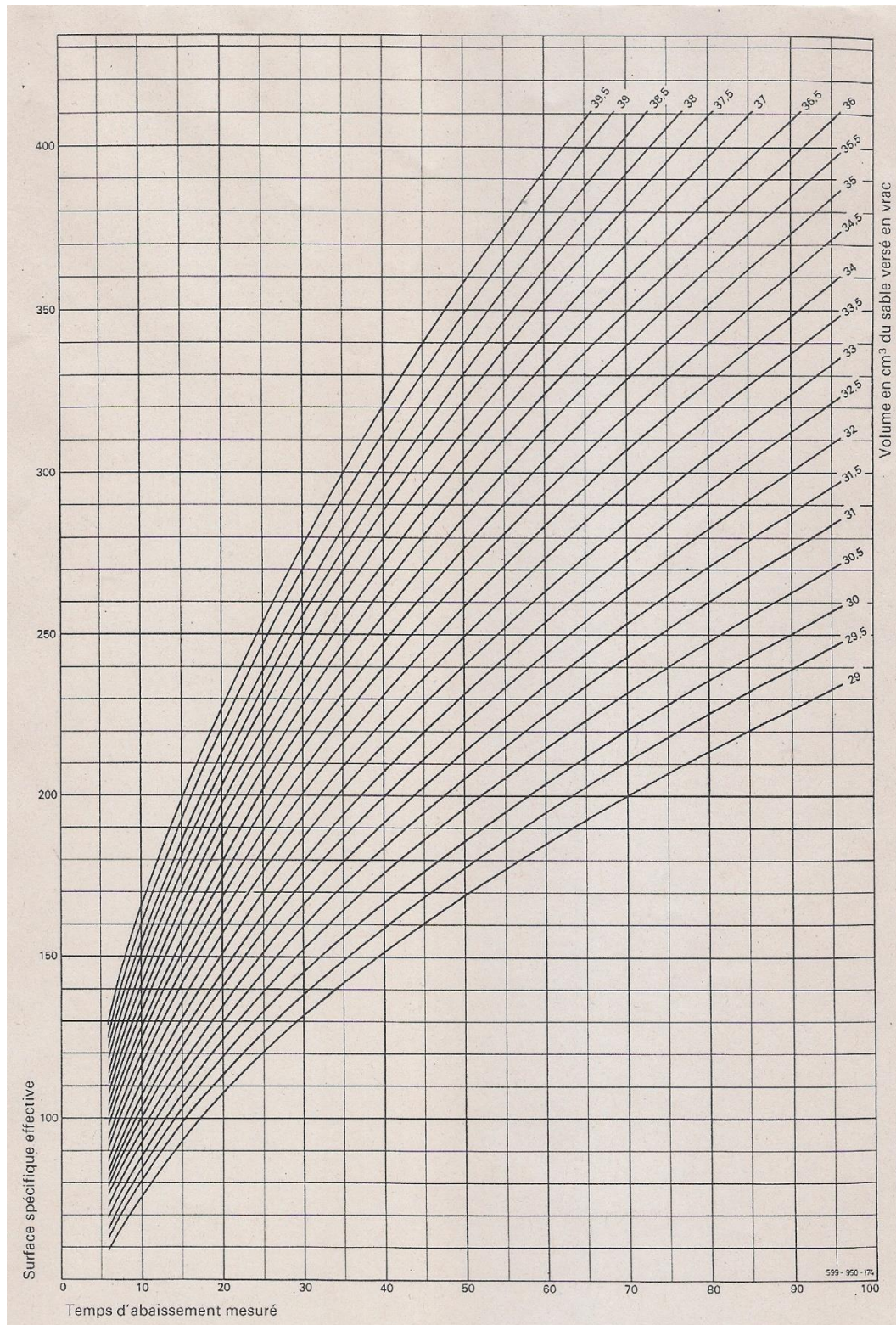
## Referências Bibliográficas

- [1] F. Castro, “Relatório Final: APF - Associação Portuguesa de Fundição,” 2018. [Online]. Disponível em: <http://apf.com.pt>. [Acedido no dia 12 de janeiro de 2019].
- [2] FUNFRAP and Grupo TEKSID, “Development and production of castings in grey cast iron, nodular iron, Ni-resist and CGI for the automotive industry.” [Online]. Disponível em: <http://www.teksid.com/it/iron/stabilimenti/aveiro>. [Acedido no dia 18 de outubro de 2018].
- [3] J. M. G. de C. Ferreira, *Tecnologia de Fundição*. Fundação Calouste Gulbeinken, 1999.
- [4] A. G. Henriques, “Licença Ambiental Funfrap.” pp. 31–35, 2009.
- [5] J. M. G. Carvalho Ferreira, “*Tecnologia da Fundição*.” Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.
- [6] J. R. Brown, *Foseco Ferrous Foundryman’s Handbook*. Elsevier Science, 2000.
- [7] D. M. Stefanescu, *ASM Handbook: Casting. Volume 15*, vol. 15. 1988.
- [8] A. Lopes e R. Silva, “Documentos teóricos da disciplina Tecnologia Metalúrgica.” Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica, Universidade de Aveiro, 2017.
- [9] W. D. Callister, *Materials Science and Engineering*, vol. 344, no. 11. 2001.
- [10] A. M. Segadães, *Refratários*. Fundação João Jacinto de Magalhães, 1997.
- [11] P. Beeley, *Foundry Technology*. Butterworth-Heinemann, 2001.
- [12] Stephen D. Chastain, *Metal Casting: A Sand Casting Manual for the Small Foundry Vol. 1*. Chastain Publishing, 2004.
- [13] B. J. Stauder, H. Kerber, and P. Schumacher, “Foundry sand core property assessment by 3-point bending test evaluation,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 237, pp. 188–196, 2016.
- [14] A. D. Sarkar, *Mould & Core Material For The Steel Foundry*. ELSEVIER, 1967.
- [15] R. J. M. de S. Rocha, “Fundição por baixa pressão em areia de ligas de alumínio,” Dissertação de candidatura ao grau de Mestre em Engenharia Mecânica apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2015.
- [16] S. Fiore and M. C. Zanetti, “Industrial treatment processes for the recycling of green foundry sands,” *WIT Trans. Ecol. Environ.*, vol. 92, pp. 67–76, 2006.
- [17] D. Hoyt, “Back to the Basics of Silica Sand,” *Modern Casting*. pp. 24–26, 1987.
- [18] H. Khandelwal and B. Ravi, “Effect of binder composition on the shrinkage of chemically bonded sand cores,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 30, no. 12, pp.

- 1465–1470, 2015.
- [19] R. E. Miguel, J. A. Ippolito, A. B. Leytem, A. A. Porta, R. B. Banda Noriega, and R. S. Dungan, “Analysis of total metals in waste molding and core sands from ferrous and non-ferrous foundries,” *J. Environ. Manage.*, vol. 110, pp. 77–81, 2012.
- [20] R. Siddiquea, G. Kaur, and A. Rajor, “Waste foundry sand and its leachate characteristics,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 54, no. 12, pp. 1027–1036, 2010.
- [21] P. M. C. L. Vilhena, “Resinas de caixa-fria modificadas estruturalmente com propriedades técnicas e meio ambientais melhoradas – Sistema Biodiesel,” Dissertação de candidatura ao grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [22] G. Crandell, L. Stahl, V. LaFay, C. Glowacki, and S. Knight, “Core Additives: Effects on Core Strength, Casting Quality and Air Emissions,” *Cast. Emiss. Reduct. Progr.*, no. October 2004, pp. 1–29, 2005.
- [23] H. Kahraman *et al.*, “Analyzing of Cold Box Binder System and Determination of Its Effects on Cast Parts,” *Tmmob Metall. Mater. Eng.*, pp. 1091–1094, 2018.
- [24] *Decreto-Lei n.º 73/2011 do Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território*. Diário da República: Série I de 2011-06-17, 2011.
- [25] *Decreto-Lei n.º 75/2015 do Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território*. 2011.
- [26] R. Scheunemann, “Regeneração de areia de fundição através de tratamento químico via processo fenton,” Dissertação de candidatura ao grau de Mestre em Engenharia Química apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2005.
- [27] M. Lucarz, “Thermal reclamation of the used moulding sands,” *Metal*. 54, vol. 54, no. 1, pp. 109–112, 2015.
- [28] Ridsdale & Co Ltd, *Foundry sand testing equipment operating instructions (AFS)*. England.
- [29] C. L. Mariotto, “Caracterização de Areias Silicosas para Emprego em Moldagem,” *Met. ABM*, vol. 38, pp. 143–148, 1982.
- [30] S. Group, “TEST INSTRUMENTS for Molding and Core Sands.” [Online]. Disponível em: <http://www.simpsongroup.com/media/usa/2015/07/Simpson-Analytics-Product-Catalog-CH.pdf>. [Acedido no dia 15 de maio de 2019].
- [31] A. Chemicals, “Understanding ADV and pH Testing for Mold, Core Sand,” 2017. [Online]. Disponível em: <https://www.foundrymag.com/pH-ADV>. [Acedido no dia 16 de junho de 2019]
- [32] H. Khandelwal and B. Ravi, “Effect of molding parameters on chemically bonded sand mold properties,” *J. Manuf. Process.*, vol. 22, pp. 127–133, 2016.

Anexos

Anexo 1 – Gráfico Superfície Específica Real



## **Anexo 2 – Calibração do medidor de pH**

Para a calibração do aparelho utilizaram-se duas soluções tampão de pH 7 e 10. Mergulhou-se o eletrodo na solução tampão de pH 7 e leu-se o valor indicado no aparelho. Retirou-se o eletrodo do suporte e lavou-se com água desmineralizada. Efetuaram-se as mesmas operações para a solução tampão de pH 10. Se os valores teóricos correspondentes às soluções tampão não coincidirem com os valores indicados pelo aparelho, modificou-se a regulação conforme o modo operatório do aparelho, de forma que os valores lidos coincidam com os valores teóricos.

Composição das soluções tampão:

- Solução Tampão pH 7
  - a) 1,1876 g de  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  em 100 mL de água destilada;
  - b) 2,1008 g de  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  (ácido cítrico) em 20 mL de NaOH 1N, e completar a 100 mL com água destilada.
  
- Solução Tampão pH 10
  - a) 1,91 g de  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$  (borax) em 1000 mL de água destilada;
  - b) NaOH 0,1N.

Mistura: 59,5 mL de solução a) + 40,5 mL de solução b).



### Anexo 3 – Determinação do índice de finura AFS e superfície específica teórica

- A.1

Índice de finura AFS - A.1			
Abertura do crivo (mm)	areia retida (%)	Coeficiente	Produto
≥ 3,360	0,00	3	0
1,7	0,00	5	0
0,85	0,02	10	0
0,6	0,18	20	4
0,425	0,97	30	29
0,3	29,65	40	1186
0,212	52,59	50	2630
0,15	13,56	70	949
0,106	2,37	100	237
0,075	0,39	140	55
0,053	0,13	200	26
≥ 0,053	0,14	300	42
<b>Total</b>	<b>100,00</b>	<b>-</b>	<b>52</b>

Superfície específica teórica - A.1			
Abertura do crivo (mm)	fração areia retida	Coeficiente	Produto
0,85	0,00	17,94	0,00
0,6	0,00	31,61	0,06
0,425	0,01	44,75	0,43
0,3	0,30	63,04	18,69
0,212	0,53	89,15	46,89
0,15	0,14	125,91	17,08
0,106	0,02	177,95	4,22
0,075	0,00	252,51	0,98
0,053	0,00	355,91	0,46
≥ 0,053	0,00	619,18	0,87
<b>Total</b>	<b>1,00</b>	<b>-</b>	<b>89,68</b>

• A.2

<b>Índice de finura AFS - A.2</b>			
<b>Abertura do crivo (mm)</b>	<b>areia retida (%)</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Produto</b>
≥ 3,360	0,00	3	0
1,7	0,00	5	0
0,85	0,00	10	0
0,6	0,06	20	1
0,425	3,87	30	116
0,3	33,75	40	1350
0,212	47,70	50	2385
0,15	12,64	70	885
0,106	1,85	100	185
0,075	0,12	140	17
0,053	0,01	200	2
≥ 0,053	0,00	300	0
<b>Total</b>	<b>100,00</b>	<b>-</b>	<b>49</b>

<b>Superfície específica teórica - A.2</b>			
<b>Abertura do crivo (mm)</b>	<b>fração areia retida</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Produto</b>
0,85	0,00	17,94	0,00
0,6	0,00	31,61	0,02
0,425	0,04	44,75	1,73
0,3	0,34	63,04	21,28
0,212	0,48	89,15	42,53
0,15	0,13	125,91	15,92
0,106	0,02	177,95	3,29
0,075	0,00	252,51	0,30
0,053	0,00	355,91	0,04
≥ 0,053	0,00	619,18	0,00
<b>Total</b>	<b>1,00</b>	<b>-</b>	<b>85,10</b>

• A.3

<b>Índice de finura AFS - A.3</b>			
<b>Abertura do crivo (mm)</b>	<b>areia retida (%)</b>	<b>Coeficiente</b>	<b>Produto</b>
≥ 3,360	0,00	3	0
1,7	0,00	5	0
0,85	0,03	10	0
0,6	0,14	20	3
0,425	1,27	30	38
0,3	27,19	40	1088
0,212	54,50	50	2725
0,15	13,51	70	945
0,106	2,19	100	219
0,075	0,38	140	53
0,053	0,20	200	40
≥ 0,053	0,59	300	177
<b>Total</b>	<b>100,00</b>	<b>-</b>	<b>53</b>

<b>Superfície específica teórica - A.3</b>			
<b>Abertura do crivo (mm)</b>	<b>fração areia retida</b>	<b>Coeficiente</b>	<b>Produto</b>
0,85	0,00	17,94	0,01
0,6	0,00	31,61	0,04
0,425	0,01	44,75	0,57
0,3	0,27	63,04	17,14
0,212	0,55	89,15	48,59
0,15	0,14	125,91	17,01
0,106	0,02	177,95	3,90
0,075	0,00	252,51	0,96
0,053	0,00	355,91	0,71
≥ 0,053	0,01	619,18	3,65
<b>Total</b>	<b>1,00</b>	<b>-</b>	<b>92,57</b>

• C.1

<b>Índice de finura AFS - C.1</b>			
<b>Abertura do crivo (mm)</b>	<b>areia retida (%)</b>	<b>Coeficiente</b>	<b>Produto</b>
≥ 3,360	0,00	3	0
1,7	0,00	5	0
0,85	0,00	10	0
0,6	0,25	20	5
0,425	2,51	30	75
0,3	31,58	40	1263
0,212	44,21	50	2210
0,15	16,14	70	1130
0,106	3,50	100	350
0,075	0,95	140	133
0,053	0,39	200	78
≥ 0,053	0,47	300	141
<b>Total</b>	<b>100,00</b>	<b>-</b>	<b>54</b>

<b>Superfície específica teórica - C.1</b>			
<b>Abertura do crivo (mm)</b>	<b>fração areia retida</b>	<b>Coeficiente</b>	<b>Produto</b>
0,85	0,00	17,94	0,00
0,6	0,00	31,61	0,08
0,425	0,03	44,75	1,12
0,3	0,32	63,04	19,91
0,212	0,44	89,15	39,41
0,15	0,16	125,91	20,32
0,106	0,03	177,95	6,23
0,075	0,01	252,51	2,40
0,053	0,00	355,91	1,39
≥ 0,053	0,00	619,18	2,91
<b>Total</b>	<b>1,00</b>	<b>-</b>	<b>93,77</b>

• C.2

<b>Índice de finura AFS - C.2</b>			
<b>Abertura do crivo (mm)</b>	<b>areia retida (%)</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Produto</b>
≥ 3,360	0,00	3	0
1,7	0,00	5	0
0,85	0,01	10	0
0,6	0,82	20	16
0,425	5,21	30	156
0,3	39,01	40	1560
0,212	40,02	50	2001
0,15	11,49	70	804
0,106	2,32	100	232
0,075	0,64	140	90
0,053	0,26	200	52
≥ 0,053	0,23	300	69
<b>Total</b>	<b>100,00</b>	<b>-</b>	<b>50</b>

<b>Superfície específica teórica - C.2</b>			
<b>Abertura do crivo (mm)</b>	<b>fração areia retida</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Produto</b>
0,85	0,00	17,94	0,00
0,6	0,01	31,61	0,26
0,425	0,05	44,75	2,33
0,3	0,39	63,04	24,59
0,212	0,40	89,15	35,68
0,15	0,11	125,91	14,46
0,106	0,02	177,95	4,13
0,075	0,01	252,51	1,62
0,053	0,00	355,91	0,93
≥ 0,053	0,00	619,18	1,42
<b>Total</b>	<b>1,00</b>	<b>-</b>	<b>85,41</b>

• C.3

<b>Índice de finura AFS - C.3</b>			
<b>Abertura do crivo (mm)</b>	<b>areia retida (%)</b>	<b>Coeficiente</b>	<b>Produto</b>
≥ 3,360	0,00	3	0
1,7	0,00	5	0
0,85	0,32	10	3
0,6	0,35	20	7
0,425	5,64	30	169
0,3	30,66	40	1226
0,212	40,90	50	2045
0,15	13,63	70	954
0,106	3,09	100	309
0,075	1,39	140	194
0,053	1,19	200	238
≥ 0,053	2,84	300	851
<b>Total</b>	<b>100,00</b>	<b>-</b>	<b>60</b>

<b>Superfície específica teórica - C.3</b>			
<b>Abertura do crivo (mm)</b>	<b>fração areia retida</b>	<b>Coeficiente</b>	<b>Produto</b>
0,85	0,00	17,94	0,06
0,6	0,00	31,61	0,11
0,425	0,06	44,75	2,52
0,3	0,31	63,04	19,33
0,212	0,41	89,15	36,46
0,15	0,14	125,91	17,16
0,106	0,03	177,95	5,50
0,075	0,01	252,51	3,51
0,053	0,01	355,91	4,23
≥ 0,053	0,03	619,18	17,57
<b>Total</b>	<b>1,00</b>	<b>-</b>	<b>106,45</b>

• M.1

<b>Índice de finura AFS - M.1</b>			
<b>Abertura do crivo (mm)</b>	<b>areia retida (%)</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Produto</b>
≥ 3,360	0,00	3	0
1,7	0,00	5	0
0,85	0,00	10	0
0,6	0,09	20	2
0,425	1,33	30	40
0,3	26,39	40	1056
0,212	52,84	50	2642
0,15	15,94	70	1116
0,106	2,78	100	278
0,075	0,38	140	53
0,053	0,14	200	28
≥ 0,053	0,12	300	36
<b>Total</b>	<b>100,00</b>	<b>-</b>	<b>52</b>

<b>Superfície específica teórica - M.1</b>			
<b>Abertura do crivo (mm)</b>	<b>fração areia retida</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Produto</b>
0,85	0,00	17,94	0,00
0,6	0,00	31,61	0,03
0,425	0,01	44,75	0,59
0,3	0,26	63,04	16,64
0,212	0,53	89,15	47,10
0,15	0,16	125,91	20,07
0,106	0,03	177,95	4,94
0,075	0,00	252,51	0,96
0,053	0,00	355,91	0,50
≥ 0,053	0,00	619,18	0,74
<b>Total</b>	<b>1,00</b>	<b>-</b>	<b>91,57</b>

• M.2

<b>Índice de finura AFS - M.2</b>			
<b>Abertura do crivo (mm)</b>	<b>areia retida (%)</b>	<b>Coeficiente</b>	<b>Produto</b>
≥ 3,360	0,00	3	0
1,7	0,00	5	0
0,85	0,06	10	1
0,6	0,60	20	12
0,425	4,86	30	146
0,3	34,57	40	1383
0,212	45,45	50	2272
0,15	12,31	70	862
0,106	1,88	100	188
0,075	0,16	140	22
0,053	0,06	200	12
≥ 0,053	0,06	300	18
<b>Total</b>	<b>100,00</b>	<b>-</b>	<b>49</b>

<b>Superfície específica teórica - M.2</b>			
<b>Abertura do crivo (mm)</b>	<b>fração areia retida</b>	<b>Coeficiente</b>	<b>Produto</b>
0,85	0,00	17,94	0,01
0,6	0,01	31,61	0,19
0,425	0,05	44,75	2,17
0,3	0,35	63,04	21,79
0,212	0,45	89,15	40,52
0,15	0,12	125,91	15,50
0,106	0,02	177,95	3,34
0,075	0,00	252,51	0,40
0,053	0,00	355,91	0,21
≥ 0,053	0,00	619,18	0,37
<b>Total</b>	<b>1,00</b>	<b>-</b>	<b>84,51</b>




• M.3

<b>Índice de finura AFS - M.3</b>			
<b>Abertura do crivo (mm)</b>	<b>areia retida (%)</b>	<b>Coeficiente</b>	<b>Produto</b>
≥ 3,360	0,00	3	0
1,7	0,00	5	0
0,85	0,07	10	1
0,6	0,21	20	4
0,425	1,99	30	60
0,3	32,69	40	1308
0,212	50,93	50	2546
0,15	10,40	70	728
0,106	1,64	100	164
0,075	0,62	140	87
0,053	0,43	200	86
≥ 0,053	1,02	300	306
<b>Total</b>	<b>100,00</b>	<b>-</b>	<b>53</b>

<b>Superfície específica teórica - M.3</b>			
<b>Abertura do crivo (mm)</b>	<b>fração areia retida</b>	<b>Coeficiente</b>	<b>Produto</b>
0,85	0,00	17,94	0,01
0,6	0,00	31,61	0,07
0,425	0,02	44,75	0,89
0,3	0,33	63,04	20,61
0,212	0,51	89,15	45,40
0,15	0,10	125,91	13,10
0,106	0,02	177,95	2,92
0,075	0,01	252,51	1,56
0,053	0,00	355,91	1,53
≥ 0,053	0,01	619,18	6,31
<b>Total</b>	<b>1,00</b>	<b>-</b>	<b>92,40</b>

Anexo 4 – Lote de ensaio

		<b>LOTE DE ENSAIO N°:LE 6413 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: Ensaiar areia de macho reciclada nas camisas e nos cilindros			
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 as camisas utilizar o leito de areia,				
	- 250Kg de areia				
	- 12.5 Kg de areia de macho reciclada				
	Resina P1=      Kg				
	Resina P2=      Kg				
	Efetuar provetes para flexão imediata				
	Efetuar provetes para permeabilidade				
	Dureza				
	Perda ao fogo				
Moldação	- 500Kg de areia				
	- 25kg de areia de macho reciclada				
	Resina P1=      Kg				
	Resina P2=      Kg				
	Efetuar provetes para flexão imediata				
	Efetuar provetes para permeabilidade				
	Dureza				
	Perda ao fogo				
	Separar e identificar o lote				
Fusão	SÉRIE				
Acabamento	- Separar as peças após granalhadora de pinça				
Qualidade	- Série				
Métodos	- Seguimento do ensaio				
	DV S/16				
	Secção responsável da execução				

DO0008DT-Ed.1.1