

Efeito do tipo de aditivos da areia de macharia na qualidade superficial dos fundidos

AUTOR

RUI MIGUEL PEREIRA DE MATOS GOMES
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E
MATERIAIS

ORIENTADOR

CARLOS SILVA RIBEIRO
PROFESSOR DOUTOR, NO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

ORIENTADOR NA FUNFRAP

JOÃO MATOS
MESTRE EM ENGENHARIA METALÚRGICA E MATERIAIS

Candidato Rui Miguel Pereira de Matos Gomes

Código 201705860

Título Efeito do tipo de aditivos da areia de macharia na qualidade superficial dos fundidos

Data 25 de julho de 2022

Hora: 09:00

Local Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala F106

<i>Júri</i>	<i>Presidente</i>	Luís Filipe Malheiros de Freitas Ferreira	DEMM-FEUP
	<i>Arguente</i>	Rui Jorge de Lemos Neto	DeMec - FEUP
	<i>Orientador</i>	Carlos Alberto Silva Ribeiro	DEMM-FEUP

Resumo

A Funfrap - Fundição Portuguesa S.A. é uma unidade industrial do setor de fundição localizada em Cacia, Aveiro e pertence recentemente ao grupo Tupy. A produção dos componentes de ferro fundido para a indústria automóvel é feita através do processo de moldação em areia verde (*All-in-Core*).

Tendo em conta a natureza do processo, a utilização de machos com as devidas propriedades mecânicas é essencial, uma vez que permite evitar arrancamentos de areia durante o seu manuseamento e durante o vazamento, prevenindo assim a criação de defeitos na superfície das peças, garantindo uma boa qualidade superficial das mesmas. A areia utilizada na elaboração dos machos influencia diretamente em diversas propriedades fundamentais dos machos que irão ser cruciais na determinação da tendência de ocorrerem defeitos superficiais.

Com o principal objetivo de estudar a influência do tipo de aditivo e respetivo tamanho de grão da areia de macharia na qualidade superficial dos fundidos, nomeadamente na formação de defeitos, foram realizados ensaios de caracterização como distribuição granulométrica, cálculo do índice AFS, coeficiente de angularidade e humidade, aos aditivos. Após a determinação das proporções areia-aditivo e resina, foram preparadas misturas segundo o protocolo da empresa e foram avaliadas as suas propriedades através de ensaios de resistência à flexão, permeabilidade e perda ao fogo.

Os machos utilizados no ensaio industrial foram produzidos pelo processo de caixa fria. A utilização das misturas estudadas na produção industrial revelou que, contrariamente à literatura, a utilização de um tamanho de grão mais grosso permitiu reduzir a tendência de ocorrência de defeitos como sinterização e *veining*. Apesar disto, comparando as misturas C45 e C55, a redução do tamanho de grão permitiu reduzir a dimensão do defeito ocorrente. Este facto é promissor, porém não elimina a etapa de limpeza e, consequentemente, não permite diminuição de custos do processo.

A utilização da mistura C40 (Castball40) demonstrou a menor percentagem de defeitos e por isso a sua utilização como mistura principal deve ser considerada, uma vez que cumpre, também, com os requisitos de resistência à flexão, possui maior permeabilidade e diminui a quantidade de defeitos ocorrentes nas cavidades, diminuindo consequentemente o tempo gasto pelos operadores na etapa de limpeza das peças e permitindo uma diminuição de custos ao processo.

Palavras-chave: areia de macharia; aditivos; caixa fria; resistência à flexão; permeabilidade; *veining*; sinterização.

Abstract

Funfrap - Fundação Portuguesa S.A. is an industrial unit in the foundry sector located in Cacia, Aveiro and recently belongs to the Tupy group. The production of cast iron components for the automotive industry is done through the all-in-core molding process. Considering the nature of the process, the use of cores with the proper mechanical properties is essential, since it allows to avoid sand pullouts during their handling and during the pouring, thus preventing the creation of defects in the surface of the parts, ensuring a good surface quality. The sands used in the elaboration of cores directly influences several fundamental properties of cores that will be crucial in determining the tendency to occur surface defects.

With the main objective of studying the influence of the type of additive and its grain size of core sand on the surface quality of the castings, namely in the formation of defects, characterization tests like particle size distribution, calculation of AFS index, coefficient of angularity and humidity, were performed to the additives studied. After determining the sand-additive and resin proportions, mixtures were prepared according to the company's protocol and their properties were evaluated through tests of bending resistance, permeability, and loss on ignition (LOI).

The cores used in the industrial tests were produced by the cold box process. The use of the mixtures studied in industrial production revealed that, contrary to the literature, the use of a thicker grain size allowed to reduce the tendency of occurrence of penetration defects such as “burn-on” and veining. Despite this, comparing the mixtures C45 and C55, the reduction of grain size allowed to reduce the size of the defect. This is promising, but does not eliminate the cleaning step and, consequently, does not allow reduction of process costs.

The use of the C40 mixture (Castball40 as additive) demonstrated the lowest percentage of defects and therefore its use as the main mixture should be considered, since it also complies with the requirements of bending resistance, has greater permeability, and decreases the number of defects in the cavities, consequently reducing the time spent by operators in the cleaning stage of the parts and allowing a reduction of costs to the process.

Keywords: core sand; additives; cold box; bending resistance; permeability; veining; burn-on.

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer a todos os professores e técnicos do Departamento de Metalurgia e Materiais que contribuíram diretamente na minha aprendizagem e maturidade.

A realização deste estudo não seria possível sem a ajuda do meu Professor orientador, Prof. Dr. Carlos Silva Ribeiro, a quem agradeço especialmente por toda a ajuda, paciência e orientação.

Agradeço também à Funfrap, nomeadamente ao Eng. João Matos que possibilitou esta oportunidade em ganhar experiência e ter o primeiro contacto com a indústria de fundição automóvel. Um obrigado a toda a equipa dos Métodos e da Qualidade que sempre me ajudaram quando precisei, nomeadamente ao Eng. João Castro, Eng. Rui Reis, Eng. Bruno Branco e Sr. Mário Jorge.

Aos meus amigos, feitos na faculdade ou desde pequenino, obrigado por me terem suportado e acompanhado nesta jornada, e por me terem proporcionado os melhores anos da minha vida.

Por fim, mas definitivamente o mais importante, um muito obrigado a toda a minha família, em especial à minha mãe, ao meu pai e ao meu irmão, que me suportaram e ajudaram durante todo este trabalho, nunca me deixando ir abaixo não só durante este trabalho como também durante todo o meu percurso académico.

Índice de figuras

Figura 1- Fluxograma de produção da Funfrap.....	2
Figura 2 - Exemplo de machos produzidos pela Funfrap - Fundação Portuguesa, S.A.	7
Figura 3 - Reação de cura entre os grupos hidroxilos da parte I e os grupos isocianatos da parte II que, na presença de amina gasosa, forma o poliuretano (resina sólida) [11].	8
Figura 4 - Variação da resistência à flexão com a percentagem de humidade na areia [16].	8
Figura 5 - Ilustração dos tipos de morfologia dos grãos [4].	11
Figura 6 - Exemplo de defeito de carbono lustroso [37].....	15
Figura 7 - Exemplos ilustrativos da determinação de: desvio médio aritmético do perfil de rugosidade, Ra; altura total do perfil de rugosidade, Rt; média aritmética das alturas máximas do perfil, Rz [12].	16
Figura 8 - Exemplo de porosidade num fundido [42].	17
Figura 9 - Exemplo de defeitos de veining assinalados a vermelho [43].	18
Figura 10 - Exemplo de defeito de sinterização [46].....	20
Figura 11 - (a) Secção defeituosa assinalada no fundido; (b) Imagem SEM de um defeito encontrado na secção defeituosa; (c) Análise EDS da zona 1 assinalada em (b) [47].	21
Figura 12 - Máquina H25.....	23
Figura 13- Aparelho de lavagem automática "Autoclay Dietert Ditroit NO. 534-A. (b) Estufa PROLAB (c) Série de peneiros ASTM E 11 (d) Agitador de peneiros RO-TAP.	25
Figura 14 - (a) Aparelho de medição de superfície específica real na posição: (b) de aspiração (c) de repouso e (d) de serviço, respetivamente.....	27
Figura 15 - Aparelho de medição de humidade.	27
Figura 16- Batedeira Felino utilizada para a elaboração das misturas estudadas.	29
Figura 17- 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) [1]. Aparelho Georg Fischer PEG de prensa hidráulica com manivela manual e manómetro com ponteiro de arrasto (c).	29
Figura 18- Cápsula de sílica, balança de precisão e mufla, respetivamente.	31
Figura 19 - (a) Aparelho de medição de permeabilidade e respetivo mostrador (b); (c) Molde cilíndrico; (d) Compactador.	33
Figura 20 - Distribuição granulométrica da areia de sílica e respetivos limites superiores e inferiores indicados pela empresa.	34
Figura 21 - Distribuição granulométricas das areias de Castball40, Cromite 45-50 e Cromite 55-60.	35
Figura 22 - Curvas granulométricas: à esquerda, dos aditivos estudados (Castball 40; Cromite 45; Cromite 55); à direita, da areia de sílica. A - Tamanho médio de grão Cromite 55-60; B- Tamanho médio de grão Castball40; C- Tamanho médio de grão Cromite 45-50; D- Tamanho médio de grão areia de sílica	36
Figura 23- Observação dos grãos via lupa da areia de: (a) Castball 40 (b) Cromite 45-50 (c) Cromite 55-60.....	37
Figura 24 - Gráfico comparativo das composições químicas dos aditivos de areia estudados.	

.....	38
Figura 25 - Provetes utilizados no ensaio de permeabilidade.	39
Figura 26- Valores obtidos dos ensaios de resistência à flexão das misturas ensaiadas. .	40
Figura 27- Machos obtidos a partir da mistura (a)C40, (b)C45 e (c)C55.....	42
Figura 28- Interior da cavidade da peça obtida através de um macho fabricado pela mistura C45 à esquerda e mistura C55 à direita. Assinalado a vermelho indica-se a presença de defeitos de veining e sinterização.	43
Figura 29- Interior da cavidade da peça obtida através de um macho fabricado pela mistura C45 à esquerda e mistura C55 à direita. Assinalado a vermelho indica-se a presença de defeito de veining.	44
Figura 30- Interior da cavidade da peça obtida através de um macho fabricado pela mistura C45 à esquerda e mistura C55 à direita. Assinalado a vermelho indica-se a presença de defeito de sinterização.	44
Figura 31- Interior da cavidade da peça obtida através de um macho fabricado pela mistura C40. Assinalado a vermelho indica-se a presença de defeito de veining.	45

Índice de tabelas

Tabela 1 - Relação entre o tipo de morfologia de grão com o coeficiente de angularidade, adaptado de [28].	11
Tabela 2 - Número do peneiro ASTM E 11 e correspondentes aberturas (em mm) e coeficiente multiplicativo.	24
Tabela 3 - Número de peneiros ASTM E 11 e respetivas aberturas (em mm) e coeficiente multiplicativos.	26
Tabela 4- Peso dos componentes, em kg, que compõe as misturas de areia C40, C45 e C55.	28
Tabela 5 - Valores obtidos nos ensaios de granulometria, humidade e coeficiente de angularidade. Avaliação da morfologia do grão consoante observação à lupa.	34
Tabela 6- Valores obtidos do ensaio de permeabilidade das misturas ensaiadas. Valor médio de permeabilidade da areia de moldação.	39
Tabela 7 - Valores de perda ao fogo obtidos dos provetes ensaiados.	41
Tabela 8- Massa (gramas), em média, dos machos fabricados com as misturas C40, C45 e C55.	43
Tabela 9- Percentagem de peças analisadas com defeito nas cavidades.	45

Índice

Resumo	II
Abstract.....	III
Agradecimentos	IV
Índice de figuras.....	V
Índice de tabelas	VI
1. Introdução	1
1.1. Funfrap S.A - Grupo Tupy.....	1
1.1.1. Processo produtivo.....	1
1.1.2. Ferro fundido	3
1.2. Contextualização do tema.....	4
2. Revisão bibliográfica	5
2.1. Caraterísticas gerais da areia verde	5
2.2. Processo de fundição em areia verde - <i>All-in-core</i>	6
2.3. Machos.....	6
2.3.1. Processo de fabrico de machos - <i>Cold-Box</i>	7
2.3.2. Areia de sílica.....	9
2.3.3. Principais caraterísticas dos aditivos da areia de macharia	9
2.3.3.1. Morfologia, dimensão e distribuição dos grãos.....	10
2.3.3.2. Efeito da morfologia dos grãos	11
2.3.3.3. Refratariedade.....	12
2.3.3.4. Coeficiente de expansão linear e inércia química.....	12
2.3.3.5. Resistência mecânica dos machos	12
2.3.4. Aditivos	13
2.3.4.1. Cromite	13
2.3.4.2. Bauxite	13
2.3.4.3. Castball	14
2.3.4.4. Adição de Fe_2O_3	14
2.4. Qualidade superficial.....	15
2.5. Rugosidade	15
2.6. Defeitos	16
3. Metodologia Experimental.....	22

3.1.	Métodos de ensaio de caracterização das areias utilizadas.....	23
3.1.1.	Ensaio de granulometria [49]	23
3.1.2.	Ensaio de coeficiente de angularidade [50].....	25
3.1.3.	Ensaio de humidade [51].....	27
3.2.	Método de preparação das misturas de areia ensaiadas	28
3.2.1.	Ensaio de resistência à flexão [52]	29
3.2.2.	Ensaio de perda ao fogo [53]	30
3.2.3.	Ensaio de permeabilidade [54].....	32
3.3.	Inspeção visual	33
4.	Apresentação e discussão de resultados.....	34
4.1.	Caracterização das areias.....	34
4.1.1.	Distribuição granulométrica, coeficiente de angularidade e humidade ...	34
4.1.2.	Comparação da composição química das areias.....	37
4.1.3.	Ensaio de permeabilidade	39
4.2.	Ensaio de resistência à flexão, tempo de bancada e perda ao fogo	40
4.3.	Comparação do peso dos machos.....	42
4.4.	Inspeção visual das peças vazadas	43
5.	Conclusões	47
6.	Trabalhos futuros	49
7.	Referências bibliográficas	50
8.	Anexos.....	54

1. Introdução

1.1. Funfrap S.A - Grupo Tupy

A Funfrap - Fundação Portuguesa S.A foi fundada em 1984 e localiza-se em Cacia, Aveiro. Recentemente incorporou o grupo Tupy. Esta empresa é especializada no desenvolvimento e produção de componentes em ferro fundido nodular (EN GS 600/3) e lamelar (EN GL 250) para a indústria automóvel, como blocos de motor, caixas diferenciais, culassas, cárter-cilindros, cárter-chapéus, etc. A Tupy apresenta cinco certificações: a ISO 14001 - Gestão ambiental, ISO-9001- Gestão da qualidade, IATF 16949 - Gestão da qualidade, e ABNT NBR 6943 - Conformidade do produto (certificação brasileira de conexões de ferro fundido maleável, com rosca ABNT NBR NM ISSO 7-1, para tubulações) e ABNT NBR 6925 - Conformidade do produto (certificação brasileira de conexões de ferro fundido maleável, de classes 150 e 300, com rosca NPT para tubulação). Para além disso, a Funfrap apresenta ainda certificações a nível da gestão da saúde e segurança ocupacional (OHSAS 18001) e gestão de energia (ISO 50001), seguindo também a metodologia WCM (*World Class Manufacturing*), que promove a melhoria contínua da empresa 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].

Atualmente a empresa apresenta uma capacidade produtiva de 45 mil toneladas por ano, destinadas ao mercado externo, para clientes como a *Stellantis*, *Renault*, *Iveco* e *Scania*.

1.1.1. Processo produtivo

A metodologia produtiva da Funfrap é a de moldação em areia. A empresa encontra-se dividida em 4 secções, cada uma com a sua função: fusão, moldação, macharia e acabamentos. O processo de produção da Funfrap encontra-se representado na figura 1.

Primeiramente dá-se o transporte da liga metálica pretendida até à secção de fusão, onde ocorre a fusão e vazamento do metal líquido para as moldações em areia verde, que podem, ou não, conter machos ligados quimicamente. Após o arrefecimento e solidificação do metal líquido, é necessário retirar a peça através do abate da moldação, utilizando o mesmo modelo na produção das moldações seguintes. Para a produção das moldações seguintes, é necessário efetuar tratamentos de acerto de propriedades às areias procedentes do abate e areia ligada quimicamente (proveniente dos machos), uma vez que estas farão parte das mesmas. Ao fim de um determinado número de utilizações, a areia verde, que já fora utilizada, perde algumas propriedades, sendo necessário a introdução de areia nova no circuito. Apesar disto, diariamente procede-se à remoção de areia do circuito que segue para aterro. No que toca ao acerto das propriedades da areia verde, são efetuados inúmeros processos nomeadamente a remoção de partículas de ferro e ajuste de quantidade de bentonite e pó de carvão.

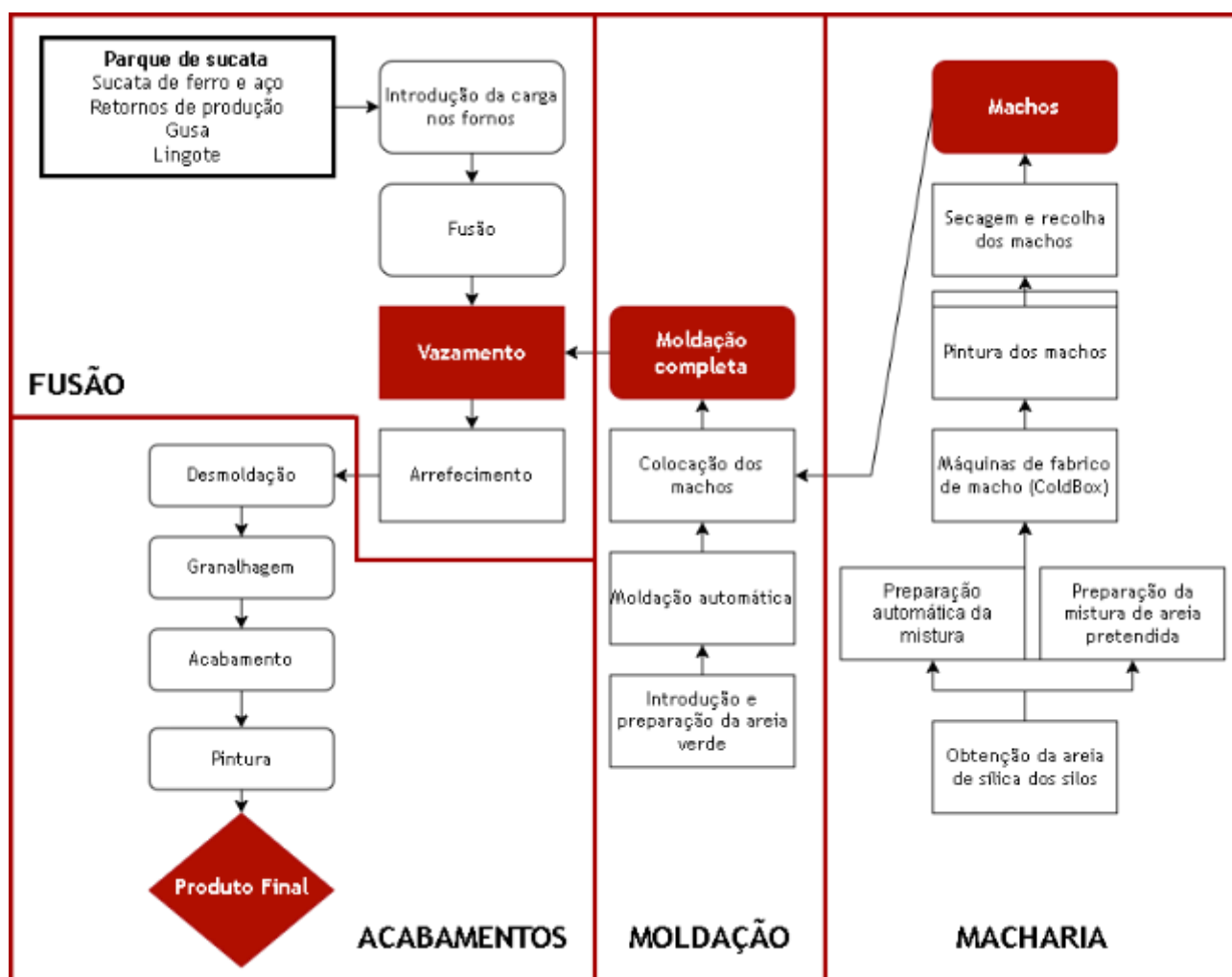


Figura 1- Fluxograma de produção da Funfrap.

Na secção de fusão o metal é fundido em fornos de indução com carga máxima de 7,3 toneladas cada um, que são alimentados por telas transportadoras vibratórias. Estas telas obtêm as matérias-primas da fusão (sucata de ferro/aço, gusa e retornos de produção) através de contentores suspensos. A colocação das matérias-primas nos contentores dá-se através de um eletroímã no parque de sucatas. O processo de vazamento é iniciado com a passagem do metal líquido por basculamento dos fornos para uma colher, na qual se realiza a inoculação. De seguida, transfere-se o metal líquido para o sistema automático de vazamento *Mezger*, para vazamento das moldações.

Na secção da macharia ocorre a produção dos machos, que serão colocados dentro da moldação, de forma a poderem formar as cavidades interiores da peça desejada. Neste setor estão localizados essencialmente o silo de armazenamento da areia de sílica (250 toneladas), os misturadores para preparação das misturas de areia juntamente com as máquinas que fabricam os machos através do processo de caixa fria e as estufas onde os machos serão secos após serem pintados pelos robots de pintura. Adicionalmente, nesta secção também existem robots de montagem, carga e descarga de machos e uma torre de lavagem e neutralização de amina. Estima-se que sejam processadas 100 toneladas de areia de sílica por dia, sendo normalmente armazenadas no silo de areia nova através de um sistema pneumático. A alimentação dos misturadores de areia é feita pelas tremonhas,

que são alimentadas por um tapete transportador que obtém a areia do fundo do silo por um elevador. Os misturadores são principalmente responsáveis pela mistura da areia de sílica com a resina (parte I e parte II) e outros aditivos como cromite, bauxite, etc. A alimentação das máquinas de fabricação de machos pelo processo de caixa fria é feita manualmente pelo operador, ou seja, primeiramente o operador adiciona as quantidades pretendidas de areia, resina e aditivos ao misturador *Fordath*, que, depois de finalizada a mistura, procede à colocação da mesma num “*charriot*” e a transporta até à tremonha que pretende alimentar. Existem misturadores que efetuam a adição de areia, resina e aditivos automaticamente, nomeadamente o misturador *Laempe*.

O agente de cura utilizado no processo de caixa fria é a dimetiletilamina (DMEA) que se encontra em estado líquido em botijas ligadas ao circuito de distribuição da amina. Apesar de se encontrar no estado líquido, a dimetiletilamina é misturada com o ar e aquecida, sendo utilizada na sua forma gasosa como agente de cura das resinas utilizadas na produção dos machos. Todas as emissões efetuadas pelas máquinas de machos durante a sua utilização são encaminhadas para a torre de lavagem e neutralização, ocorrendo também a lavagem por ar comprimido das principais ferramentas utilizadas.

Após a fabricação dos machos, estes são reencaminhados para os robots de pintura, onde se utiliza uma tinta de base aquosa que é responsável pelo revestimento do macho. As tintas utilizadas têm funções adicionais, como o aumento da refratariedade, impermeabilização face ao metal líquido e melhoramento do acabamento superficial dos fundidos. Finalizada a pintura, os machos procedem para a estufa de secagem que está a 140-200 °C, durante períodos de tempo variáveis (dependentes do macho a secar). Após a secagem os machos são colocados nas moldações ou podem formar conjuntos de machos.

A preparação da areia verde e fabrico das moldações decorre na secção da moldação. É utilizado um circuito automático de moldação por alta pressão com a utilização de chassis e placas modelo em aço. Seguidamente ao processo de compactação, colocam-se os machos nas moldações e fecham-se as mesmas. A colocação dos machos nas moldações é uma etapa extremamente importante no processo produtivo da empresa, uma vez que esta utiliza o método *All-in-core* no processo de fundição em areia verde. Este método é principalmente caracterizado pelo vazamento do metal no seio de machos suportados em areia verde, permitindo obter uma cadência elevada, típica do circuito de areia verde, e um bom acabamento superficial. Decorrido o vazamento na moldação, procede-se à passagem das moldações para a zona de arrefecimento. Estando as condições para o seu manuseamento cumpridas, ocorre a separação da caixa de moldação e abate.

Por fim, as peças obtidas são direcionadas para a secção dos acabamentos. Neste setor decorrem geralmente operações como o corte de gitos e a limpeza por jato de granalha de aço. No entanto, existem peças que poderão sofrer outro tipo de processos com rebarbagem manual ou mecânica. O controlo de qualidade é feito primariamente neste setor.

1.1.2. Ferro fundido

Os ferros fundidos pertencem à família das ligas ferrosas de composição química e microestrutura variáveis, apresentando teores em carbono superiores a 2% e podendo conter outros elementos de liga como o silício, manganês, enxofre e fósforo. Os ferros

fundidos podem ser classificados de acordo com a composição química e o seu tipo de fratura: Branco; Cinzento (lamelar); Maleável; Dúctil (nodular)[2]. Durante a solidificação da liga, grande parte do carbono é segregado da solução na forma de grafite ou carboneto de ferro (Fe_3C), dependendo da composição, velocidade de arrefecimento de líquido para sólido e presença de elementos nucleantes de grafite [3].

A Funfrap produz tipicamente ferros fundidos nodulares de matriz perlítica para a produção de árvores de equilibragem e cambotas, e ferro fundido lamelar na produção de cárter-chapéus, cárter-cilindros e culassas [1].

1.2. Contextualização do tema

A produção de fundidos de elevada qualidade implica a obtenção de superfícies lisas isentas de defeitos. Existem inúmeros defeitos que podem comprometer a superfície de um fundido, sendo que alguns implicam a perda total (sucata) do mesmo, uma vez que os custos para reparar o defeito são superiores ao lucro possível a obter com a peça. No entanto, existem outros defeitos que permitem uma recuperação económica do fundido, mas com despesas anuais substanciais de limpeza. Independentemente da fonte, os defeitos de fundição representam uma perda para a indústria. Por esta razão torna-se essencial uma avaliação da metodologia utilizada de forma a poder melhorar e/ou otimizar o rendimento do processo produtivo da empresa.

A qualidade superficial das peças é fortemente influenciada pelo índice de finura da areia (AFS), a sua distribuição granulométrica e a forma dos seus grãos [3,4,5]. Consoante o tipo de areia a ser utilizada, a quantidade de resina varia, e a tendência de ocorrerem determinados defeitos pode também aumentar ou diminuir consoante a areia e aditivos a utilizar. Tendo em conta a metodologia utilizada pela empresa na produção dos seus componentes - *All-in-core* - a utilização de machos com as devidas propriedades mecânicas é essencial, uma vez que permite evitar arrancamentos de areia durante o seu manuseamento e durante vazamento, prevenindo assim a criação de defeitos na superfície das peças e garantindo um bom acabamento superficial das mesmas. Adicionalmente, a natureza do processo empregue na Funfrap requer uma elevada produção na macharia, que se traduz num aumento de custos comparativamente ao processo convencional de areia verde.

Pretende-se realizar o estudo sobre o efeito da utilização de aditivos na areia de macharia nomeadamente na sanidade das cavidades das peças. Preservando certos parâmetros do processo de produção de machos que foram determinados previamente pela empresa (nomeadamente a proporção de areia base-aditivo, quantidade de resina, tempo de cura, etc.) e variando-se apenas o índice de finura AFS dos aditivos, avaliar a influência dos aditivos utilizados (correlacionado com o seu índice AFS) na sanidade das cavidades da peça avaliando a presença de defeitos.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Caraterísticas gerais da areia verde

O processo de fundição em areia verde é o processo mais conhecido e diversificado no que toca à produção de peças vazadas e é utilizado em 85% das fundições [5]. Este processo usa uma mistura de areia de sílica, que proporciona a estrutura da moldação, 2-10% em peso de pó de carvão para aumentar a refratariedade da areia, e 3-10% de argila que funciona como agente ligante. São adicionadas quantidades de água entre os 3-4% em peso para promover a capacidade ligante da argila e assim dar uma boa coesão à moldação.

A areia verde na indústria da fundição é caraterizada pelas seguintes propriedades [6]:

- Distribuição de tamanho de partículas constante, de forma a obter uma superfície lisa e uniforme da peça vazada. Esta propriedade é medida usando o índice de finura (AFS), que aumenta com o aumento da quantidade de partículas finas.
- Refratariedade: A refratariedade é definida como a habilidade de uma dada areia de resistir a altas temperaturas sem ceder ou fundir, facilitando a obtenção de um fundido de qualidade. Tendo em conta que a areia de moldação deve ser quimicamente e fisicamente estável quando em contacto com o metal líquido, a refratariedade é das caraterísticas mais importantes a ter em conta na escolha da mistura apropriada. Esta é principalmente dependente da quantidade de SiO_2 (i.e quantidade de quartzo, morfologia e tamanho das partículas). O aumento da quantidade de SiO_2 promove o aumento da refratariedade da areia de moldação e macho. A refratariedade é medida consoante a temperatura de sinterização e não pelo ponto de fusão.
- Permeabilidade: Esta é a propriedade que carateriza a capacidade de passagem de substâncias gasosas através da moldação, que são produzidas durante o vazamento do metal líquido. É relacionada com a existência de canais muito pequenos entre as partículas de areia, provenientes do tamanho de partículas constante e presença de um agente ligante. A permeabilidade é dependente do tamanho e morfologia do grão, da humidade e da percentagem de argila da moldação. É possível aumentar a permeabilidade de uma moldação através da criação de respiros na mesma.
- Coesão: Permite que a moldação preserve a forma obtida através de uma compressão e é devido ao agente ligante. O aumento da capacidade de aglomeração da areia promove o aumento da resistência à compressão em verde, a seco e a quente, da areia de moldação ou macho.
- Resistência a seco: Assim que o metal líquido é vazado na moldação, a humidade na camada de areia adjacente ao metal líquido é evaporada e essa camada necessita de ter resistência suficiente para suportar a pressão metaloestática, garantir a forma e dimensões do molde ao evitar a erosão das paredes do mesmo durante o vazamento.
- Colapsibilidade (Capacidade de abate): Esta propriedade nas moldações ou cavidades moldantes é caraterizada pela facilidade de desagregação da areia de moldação após vazamento, solidificação ou arrefecimento do fundido.

Para além dos requisitos acima referidos, a areia de moldação não deve aderir ao fundido, não deve reagir quimicamente com o metal, deve ser de baixo custo e obtida facilmente. Adicionalmente deve ser reutilizável por razões económicas e ambientais e os seus coeficientes de expansão devem ser suficientemente baixos [7].

2.2. Processo de fundição em areia verde - *All-in-core*

O processo de fundição em areia verde convencional tem como base o vazamento do metal líquido diretamente no interior da moldação composta por areia verde e respetivo ligante. O metal líquido irá solidificar no seio da cavidade moldante pretendida. No que toca ao processo *All-in-Core*, o metal líquido é vazado para o interior da cavidade moldante que é composta por múltiplos machos suportados em areia verde. O metal líquido, ao ser vazado, irá entrar em contacto maioritariamente com a areia e respetiva resina que compõe o conjunto de machos. Este processo apresenta a mesma cadência de produção que o processo convencional e permite produzir peças com melhor qualidade superficial, variações dimensionais de calibre inferior e espessuras de parede mais finas que consequentemente permitem a redução de peso nas peças.

Os constituintes da areia e a qualidade e quantidade de resina utilizada na produção dos machos apresentam influência direta nas suas propriedades que por sua vez ditam a qualidade final da peça fundida em termos de acabamento superficial e presença de defeitos. O índice de finura da areia e a sua distribuição granulométrica apresentam forte influência na qualidade superficial do fundido, sendo que quanto menor o tamanho de grão da areia de macho, menos rugosa é a superfície da peça vazada.

Apesar das inúmeras vantagens do processo *All-in-Core* é essencial ter em conta que, comparativamente ao processo convencional, é necessária a produção de uma muito maior quantidade de machos com as características adaptadas ao objetivo pretendido. Isto leva a uma maior necessidade a nível de matérias-primas e ferramentas, o que se traduz num aumento de custo nomeadamente na macharia.

2.3. Machos

Os machos (figura 2) são extensivamente usados na indústria da fundição automóvel para formar cavidades interiores e furos durante a manufatura dos componentes [7]. São geralmente compostos de areias naturais ou, em alguns casos, misturas de areias naturais e artificiais cujos grãos são ligados usando ligantes orgânicos ou inorgânicos. Durante o vazamento do metal líquido os machos suportam elevadas pressões metaloestáticas, pelo que é necessário prestar especial atenção durante a elaboração dos mesmos, dado que as propriedades mecânicas e estabilidade dimensional podem determinar a integridade de todo o cacho. Para garantir o cumprimento das expectativas dos clientes e produzir consistentemente fundidos de alta qualidade, os machos devem satisfazer inúmeros requisitos: boas propriedades refratárias, boa resistência térmica, inércia química com o metal líquido, resistência mecânica, baixo coeficiente de expansão térmica, distribuição granulométrica uniforme e baixo custo [8]. Desta forma são utilizados agentes ligantes (aglomerantes) que são maioritariamente responsáveis por proporcionar resistência ao macho através da ligação dos grãos e assim proporcionar também segurança no

manuseamento e transporte durante o processo. A quantidade de aglomerantes adicionada à mistura é dependente da granulometria da mesma e da superfície específica, uma vez que misturas com tamanho de grão superiores irão necessitar de uma quantidade menor de agentes ligantes devido à menor área superficial, enquanto que misturas com tamanho de grão inferior requerem uma maior quantidade de agentes ligantes.



Figura 2 - Exemplo de machos produzidos pela Funfrap - Fundação Portuguesa, S.A.

2.3.1. Processo de fabrico de machos - *Cold-Box*

A fabricação de machos é classificada consoante o mecanismo de cura e o tipo de ligante utilizado [9]. A seleção de um sistema ideal deve ter em vista a obtenção de um tempo de cura mínimo garantindo o maior tempo de bancada possível e, desta forma, maximizando a produtividade e rentabilidade do equipamento. O tempo de bancada é o tempo desde a produção da mistura da areia com o ligante até à perda das propriedades mecânicas desejadas. O tempo de cura corresponde ao tempo necessário para que a mistura da areia com o ligante obtenha resistência suficiente para uma desmoldação sem deformação.

Os tipos de processos de fabrico de machos são: cura a frio ou autosssecativo, cura com gás (*“Cold-box”*) e cura a quente. No processo de cura a frio, a areia, os ligantes e o agente de cura são misturados previamente à calção sobre os moldes e é um processo de reação imediata, enquanto que no processo de cura com gás, a areia e os ligantes são primeiramente misturados, e após a calção sobre os moldes, é introduzido o agente de cura que será responsável por atribuir a resistência ao macho. Ambos os processos ocorrem a temperatura ambiente. O processo de cura a quente é análogo ao processo de cura com gás, no entanto é necessária a aplicação de calor para a cura do aglomerante [10].

A Funfrap na fabricação dos seus machos utiliza o processo de cura com gás, mais conhecida como caixa fria (*“Cold box”*). O processo de caixa fria é um sistema de três partes, utilizando dois ligantes líquidos. A parte I é um componente reativo, um polímero formaldeído-fenólico misturado com solventes e aditivos e é utilizado para produzir uma

solução resinosa com baixa viscosidade. A parte II é um polímero isocianato misturado com solventes e aditivos. Na presença de um terceiro componente, um catalisador gasoso, o grupo hidroxilo fornecido pela Parte I reage com os grupos isocianatos da Parte II formando um polímero uretano sólido (PUR), como se pode observar na figura 3. Existem dois tipos de catalisadores terciários de amina que são geralmente utilizados para curar a resina e o isocianato: Trietilamina (TEA) e dimetiletilamina (DMEA) [11]. Uma versão simplificada do mecanismo de cura é:

Líquido parte I + Líquido parte II → Ligante sólido

Resina fenólica + Polisocianato → Catalisador de amina (cura por vapor) → Poliuretano

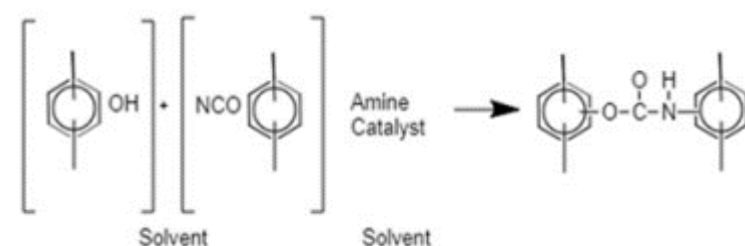


Figura 3 - Reação de cura entre os grupos hidroxilos da parte I e os grupos isocianatos da parte II que, na presença de amina gasosa, forma o poliuretano (resina sólida) [11].

A reação do uretano não produz água ou qualquer outro subproduto. O sistema contém 3-4% de azoto, que vem do componente polimérico de isocianato.

O sistema PUCB (“*phenolic urethane cold-box*”) pode ser aplicado com a maioria dos tipos de areias comumente utilizados para fabricação de moldações e machos na indústria da fundição. No entanto é necessário ter em consideração os efeitos da temperatura da areia e da humidade no desempenho da ligação. A temperatura ideal da areia é 20-25 °C, e a tolerância máxima da humidade na areia é 0,2% em massa [13,14]. No caso destes valores não serem respeitados, a eficiência do processo é afetada. Valores elevados de humidade afetam a capacidade de aglomeração e endurecimento da mistura de areia, reduzindo assim a resistência mecânica do macho [15,16]. A redução da resistência mecânica dos machos com o aumento da humidade é apresentada no gráfico da figura 4. No caso da temperatura do processo ultrapassar os 25 °C ocorre uma redução de eficiência da mistura devido ao incremento na duração do período de cura.

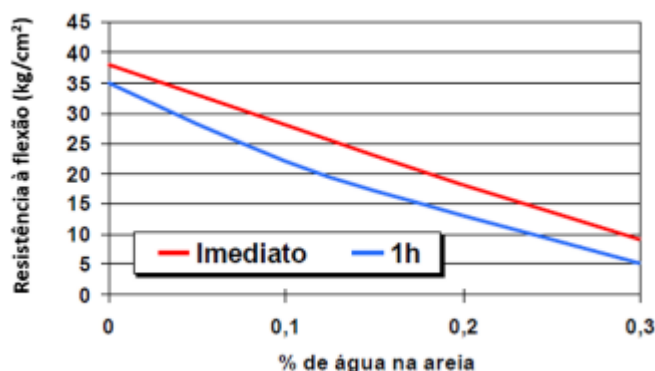


Figura 4 - Variação da resistência à flexão com a percentagem de humidade na areia [16].

Na maioria dos casos 1-3% em massa total de ligante consistindo em Parte I e Parte II nas proporções de 50:50, é adicionado à areia de base. Aproximadamente 1 mL de amina líquida é necessária para 1 kg de areia. O tempo de gaseificação é geralmente de 1-2 s seguido de um período maior de gaseificação com ar (10-15 s) de forma a remover amina residual do macho [11].

Tal como noutras aplicações de resinas/aglutinantes orgânicos nas fundições, também deve ser considerada a formação de poluentes atmosféricos e a emissão de compostos orgânicos devido às reações de decomposição, a fim de garantir uma área de trabalho ambientalmente sustentável e segura na fábrica. Apesar dos inconvenientes ambientais e de segurança deste processo, as suas principais vantagens são os ciclos de cura rápida e a excelente precisão dimensional dos machos e moldes [3,17,18].

2.3.2. Areia de sílica

A areia de sílica é a areia mais utilizada para moldação devido à sua disponibilidade de aquisição, baixo preço e elevado ponto de fusão (1713 °C) [19]. Possui elevada dureza, o que contribui positivamente para uma boa resistência à abrasão no processo de preparação das misturas de areia e produção de moldes, e é quimicamente inerte a temperaturas consideráveis. Complementarmente possui boas propriedades de mistura com diversos compostos frequentemente utilizados e boa molhabilidade pela água e praticamente todos os aglomerantes [19].

A procura por uma alternativa à areia de sílica é derivada de diversos fatores. Uma elevada exposição à sílica cristalina respirável leva a uma doença denominada “silicose”. Adicionalmente, a expansão da sílica durante a transição de alfa para beta aos 573 °C pode causar defeitos no fundido [34], o que também pode resultar numa perda de precisão dimensional. O problema da grande expansão não linear da sílica agrava no caso dos ferros fundidos, especialmente quando é utilizada areia virgem. A areia de sílica é normalmente obtida em grandes quantidades em zonas costeiras, o que causa degradação ambiental e impactos que requerem um longo tempo de recuperação [35]. Sumariamente as principais desvantagens da areia de sílica são:

- Elevada reatividade com óxidos de ferro e óxidos de outros metais (elementos de liga do aço) a altas temperaturas;
- Dilatação térmica - relacionada com a baixa precisão dimensional dos fundidos e diversos defeitos gerados pelo stress térmico.
- A expansão da cristobalite na presença de mineralizantes a altas temperaturas (acima de 900 °C)
- Silicose - doença causada pela inalação de partículas de sílica cristalina respirável.

2.3.3. Principais características dos aditivos da areia de macharia

A composição das misturas de areia utilizadas para fabricar machos determina o seu desempenho no processo de fundição. A areia de macharia é geralmente constituída por uma mistura de areia de sílica como constituinte principal e aditivos que têm como

principal função melhorar o desempenho dos machos face a certos problemas que possam a ocorrer num dado processo. Por esta razão é necessário atentar especialmente em algumas características dos materiais aditivos para que haja uma percepção acerca do seu efeito nas propriedades finais do macho, nomeadamente na sua resistência à flexão e permeabilidade. Tendo em conta a natureza deste trabalho, tratar-se-á de analisar a qualidade superficial das peças obtidas através de machos fabricados com areias naturais ou sintéticas, como aditivos. Procura-se essencialmente que, com a utilização de aditivos na areia de machos, seja possível reduzir a tendência de formação de defeitos nos fundidos através de um aumento da resistência do macho à penetração do metal líquido e, simultaneamente, proporcionar um bom acabamento superficial. As principais características das areias utilizadas como aditivos no fabrico de machos são a morfologia, dimensão e distribuição dos grãos, coeficiente de expansão linear, refratariedade, inércia química e permeabilidade.

2.3.3.1. Morfologia, dimensão e distribuição dos grãos

As dimensões dos grãos que constituem uma dada areia determinam a sua granulometria. Tendo em conta a granulometria, a *American Foundry Society* propôs o índice de finura AFS, que quantifica o tamanho e distribuição de tamanhos de uma determinada areia, através de peneiros normalizados (ASTM). O aumento do índice de finura AFS significa um aumento de finura da areia, ou seja, diminui o tamanho das partículas que a constituem. Para se ter uma ideia, na indústria da fundição de ferro, o índice de finura AFS das areias de sílica utilizadas ronda os 50-60 [22].

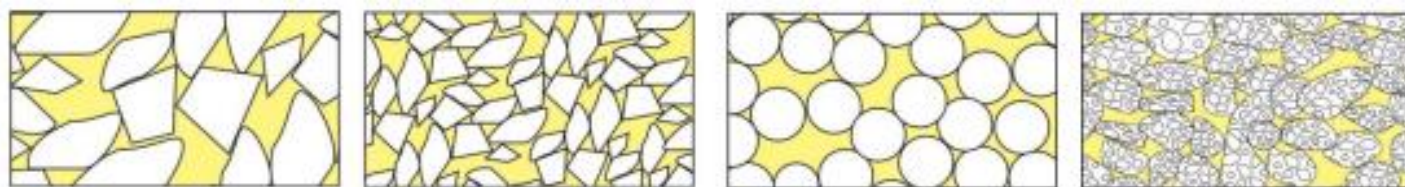
O tamanho dos grãos que constituem a areia possuem uma forte influência no que toca à compactibilidade, permeabilidade, qualidade superficial e resistência mecânica da moldação/macho que constituem. Isto porque, com a diminuição do tamanho de grão, existe uma redução do espaço entre os grãos. Consequentemente, existe um aumento da área superficial específica, aumentando assim a quantidade de ligante necessário para revestir e ligar totalmente as partículas. Consequentemente, para atingir a resistência mecânica pretendida, uma areia mais fina irá requerer uma maior quantidade de aglomerante.

Comparando uma areia que apresente uma distribuição não homogénea com elevada presença de finos, com uma areia com uma distribuição homogénea, pode-se inferir que os espaços entre os grãos da areia não homogénea irão ser preenchidos pelas partículas de menor dimensão e, assim, diminuir substancialmente a permeabilidade da mistura [23,24]. A redução substancial da permeabilidade da mistura traduz-se numa fraca capacidade de escoamento dos gases, fazendo com que haja um aprisionamento dos mesmos na cavidade moldante. Este facto irá aumentar a tendência à ocorrência de diversos defeitos de fundição que poderá resultar na rejeição do fundido, sendo por isso altamente indesejável.

A morfologia e tamanho dos grãos que constituem uma dada areia definem a área superficial total dos grãos contidos numa unidade de massa. A superfície específica permite estabelecer previsões relativamente à quantidade de ligante/aglomerante necessário para revestir todos os grãos presentes numa dada mistura de areia [25].

Os grãos de areia podem ser divididos consoante a sua morfologia (figura 5) [25]:

- Angulares
- Sub-angulares
- Arredondados
- Composto



Angular

Sub.angular

Arredondados

Composto

Figura 5 - Ilustração dos tipos de morfologia dos grãos [4].

No que toca à indústria da fundição, é comum priorizar areias com grãos arredondados, visto que, quando comparadas com as restantes morfologias, estas são as que apresentam uma menor superfície específica, que se traduz numa menor área de contacto entre os grãos e, assim, numa menor quantidade necessária de aglomerante/ligante para revestir totalmente os grãos [26]. As areias angulares apresentam a maior superfície específica e, portanto, requerem uma quantidade de aglomerante superior. Adicionalmente, durante a utilização deste tipo de areia, existe uma produção acrescida de finos, devido ao choque mecânico e térmico inerentes ao processo, diminuindo assim o tempo de vida da areia ao haver um maior desgaste [27]. As areias sub-angulares apresentam uma junção das características das areias arredondadas e angulares, e as areias compostas são formadas pelos três tipos de grãos.

2.3.3.2. Efeito da morfologia dos grãos

A morfologia dos grãos é geralmente determinada através do coeficiente de angularidade. O coeficiente de angularidade é o quociente entre a superfície específica real e a teórica, apresentado na equação 1 [28].

$$Wk = \frac{S_w}{S_{wt}} \quad (1)$$

O valor é superior a 1, uma vez que para o cálculo assume-se a forma esférica ideal, que ocupa uma área de superfície mínima. Quanto mais esférico for o grão de areia, menor é a diferença entre a superfície específica real da superfície específica teórica (que considera que todos os grãos são esféricos). Consoante os valores obtidos para o coeficiente de angularidade, é possível inferir a morfologia do grão, através da tabela 1 [28].

Tabela 1 - Relação entre o tipo de morfologia de grão com o coeficiente de angularidade, adaptado de [28].

Morfologia	Coeficiente de angularidade
Esférica	1,0
Arredondada	1,2 a 1,4
Angular	>1,4

2.3.3.3. Refratariedade

A refratariedade de um dado material caracteriza a sua capacidade de suportar temperatura elevadas sem sofrer fusão, amolecimento ou deformação. Tendo em conta a natureza do processo de fundição, os materiais aditivos da areia de macharia devem ser capazes de suportar elevadas temperaturas sem sofrer qualquer alteração a nível cristalino, principalmente quando utilizados na fundição de materiais com elevadas temperaturas de fusão [29]. A areia de sílica é bastante utilizada na fabricação de machos devido à sua elevada refratariedade, visto que o ponto de fusão da sílica pura é de 1710 °C. O aumento do teor de impurezas na areia de sílica implica uma diminuição na sua temperatura de fusão. Algumas propriedades chave que influenciam diretamente a refratariedade de um dado material são a sua condutividade térmica, uma vez que determina a quantidade de calor que este consegue absorver e transmitir, e a sua porosidade [30]. Como regra geral, quanto maior o nível de porosidade num material, menos denso é e menor condutividade térmica terá. Ambos os fenómenos são explicados pelos poros no material a granel que estão a ser preenchidos com ar (ou outro gás - os gases não são bons condutores de calor). Logicamente uma maior quantidade de poros significa existência de mais ar, o que significa menor condutividade. Combinando este fator com um material que já tem uma tolerância muito elevada à temperatura, obtém-se excelente material refratário.

2.3.3.4. Coeficiente de expansão linear e inércia química

O coeficiente de expansão linear dos aditivos é um fator determinante na obtenção de peças dimensionalmente corretas e isentas de defeitos. O coeficiente de expansão linear pode ser definido como o aumento do comprimento por unidade de comprimento quando a temperatura é elevada 1 °C [31]. Por esta razão, os aditivos devem apresentar baixos coeficientes de expansão linear, de forma a garantir que, com o aumento da temperatura, não ocorra distorções na forma do macho. Caso contrário, poderão originar defeitos relacionados com a precisão dimensional e problemas na remoção do macho do cacho.

Complementarmente ao coeficiente de expansão linear, os aditivos devem ser quimicamente inertes, ou seja, no decorrer do enchimento da cavidade moldante e posterior solidificação, estes não devem reagir com o metal líquido, evitando a formação de compostos que permanecerão nos cachos.

2.3.3.5. Resistência mecânica dos machos

A resistência mecânica dos machos é influenciada por diversos fatores como as forças de adesão e coesão proporcionadas pelos ligantes, quantidade de ligações entre grãos consoante o tamanho e distribuição de grão, percentagem de finos e molhabilidade. Estes fatores irão determinar a capacidade do macho de resistir às tensões térmicas e mecânicas exercidas sobre ele durante o processo de vazamento e solidificação, no entanto, um macho também deve ser facilmente removido após a solidificação do fundido. O facto de a resistência mecânica depender não só dos ligantes utilizados, como das características da mistura de areia, faz com que os aditivos necessitem de alcançar um balanço entre todas as características referidas anteriormente, de forma a poderem contribuir positivamente para a obtenção de uma resistência mecânica final do macho

aceitável para a indústria de fundição e, ao mesmo tempo, possibilitar a obtenção de boas qualidades superficiais.

2.3.4. Aditivos

Os materiais utilizados na moldação podem conter uma vasta gama de componentes, que permitam ajudar a melhorar certo tipo de propriedades ou atuar face a ocorrência de um defeito específico de fundição. Desta forma são utilizados aditivos que possam melhorar diversas propriedades como a permeabilidade (i.e., aumento da dissipação dos gases) e a qualidade superficial do fundido através da adição de pó de carvão. Também é possível reduzir a tendência à formação de defeitos como *veining* (ver capítulo 2.6.3.) e penetração de metal nos espaços intersticiais dos grãos, através da adição de óxido de ferro.

2.3.4.1. Cromite

As areias de cromite são formadas naturalmente e consistem essencialmente de óxido de cromo e óxido de ferro. Ao contrário da areia de sílica, que sofre transformações alotrópicas a 575 °C, a areia de cromite não sofre qualquer transformação, eliminando os problemas associados ao coeficiente de expansão térmica. Apresenta uma elevada resistência a choque térmico. Possui um ponto de fusão relativamente elevado (1880 °C) e apresenta uma temperatura de sinterização de 1100°C. Adicionalmente, a cromite possui elevada condutividade térmica, o que permite obter boas condições de arrefecimento dos fundidos. Comparativamente à bauxite e à areia de sílica, a cromite apresenta uma densidade superior, podendo levar indiretamente a aumentos de custos de produção [32].

Este tipo de areia é inerte aos óxidos de ferro a altas temperaturas em diversas atmosferas gasosas e apresenta má molhabilidade por metal líquido. Todos estes fatores melhoram as condições de solidificação do metal e ajudam a prevenir a formação de defeitos. A elevada condutividade térmica e capacidade calorífica da cromite possibilitam a criação de uma solidificação direcional do fundido, prevenindo irregularidades de solidificação [33]. A areia de cromite é utilizada como aditivo em misturas de areia de macho ou moldação. As suas características tornam-na particularmente interessante quando se fabrica componentes de grande dimensão, onde é necessária uma elevada resistência à pressão metalostática.

2.3.4.2. Bauxite

A areia de bauxite pode ser obtida através da fusão do minério bauxite num forno de arco elétrico, seguido de um super-arrefecimento [34]. Tal como a cromite, a bauxite apresenta uma taxa de expansão térmica muito baixa, permitindo a sua utilização como aditivo em misturas de areias de moldação ou macho. Apresenta uma baixa condutividade térmica que, aliada ao baixo coeficiente de expansão térmica, permite obter uma elevada precisão dimensional dos fundidos.

Ao contrário da areia de cromite, a areia de bauxite apresenta uma morfologia de grão esférica. Esta característica garante uma boa escoabilidade da mistura de areia que integra, permitindo um aumento de complexidade das formas possíveis de reproduzir. Comparativamente à areia de cromite, a areia de bauxite apresenta uma superfície

específica inferior devido à morfologia de grão, que é esférica, permitindo a utilização de uma quantidade de resina inferior e assim originar, para a mesma resistência final, uma redução dos custos totais associados à produção da mistura de areia pretendida.

2.3.4.3. Castball

As areias sintéticas foram introduzidas na indústria da fundição para contornar a disponibilidade limitada de areias especiais e custos associados ao transporte de longas distâncias destas areias. Derivadas e processadas a partir de materiais cerâmicos de baixo custo, foram desenvolvidas areias sintéticas capazes de satisfazer os requisitos de moldação obtidos a partir de areias especiais naturais. O desafio dos produtores de areia sintética reside na produção de um composto comparável a um custo substancialmente mais baixo. A Funfrap iniciou a utilização de uma nova areia sintética denominada CastBall, para lidar com as condições térmicas severas inerentes ao processo de fundição e, ao mesmo tempo, solucionar o problema de defeitos, como a penetração de metal e *veining*, que se formam durante a fundição de materiais ferrosos.

A Castball é um material sintético produzido pela empresa Curimbaba utilizando bauxite com elevadas quantidades de alumina. Segundo a Curimbaba, a CastBall apresenta um desempenho comparável a outros tipos de areia disponíveis na indústria, como a areia de sílica e cromite, sem quaisquer problemas relacionados com propriedades físicas que afetassem o desempenho na fabricação de machos. Os valores de expansão térmica são semelhantes aos valores da areia de cromite, permitindo uma redução significativa na ocorrência de *veining* nos fundidos. A característica mais notável desta areia sintética é a permeabilidade, que permite diminuir os defeitos relacionados com compostos gasosos [21]. O custo da Castball é superior ao da cromite e, esta por sua vez, é maior do que areia de sílica, mas segundo os técnicos decisores da empresa, a utilização da Castball origina uma diminuição de defeitos associados à penetração de metal líquido - tipo *veining*.

2.3.4.4. Adição de Fe_2O_3

A maioria do óxido de ferro utilizado como aditivo atualmente é o minério de hematite (Fe_2O_3) em que o teor de ferro varia entre 30 e 55% [36]. Os pós finos de hematite são extremamente eficientes na prevenção de defeitos de fundição. As fundições que utilizam ferro fundido cinzento e dúctil acham o óxido de ferro útil para promover uma limpeza mais fácil. Um óxido de ferro de boa qualidade, se utilizado corretamente, deve ser capaz de (1) melhorar o acabamento da superfície do bruto de fundição; (2) diminuição da tendência de *veining* e da penetração de metal; (3) reduzir a sinterização que possa ocorrer; (4) reduzir ou eliminar a porosidade das cavidades e (5) diminuir os defeitos de carbono lustroso (figura 6).

Observou-se que a adição de hematite (Fe_2O_3) a um macho/moldação é eficaz na minimização de defeitos de carbono lustroso na fundição de ferro, tanto na quantidade como na gravidade. Acredita-se que o óxido de ferro (III) ajuda a oxidar os resíduos carbonáceos resultantes da decomposição do aglomerante e minimiza a reação entre o FeO e o carbono. Menos monóxido de carbono é produzido e, portanto, a formação de defeitos de carbono lustroso é significativamente reduzida. Este mecanismo deve também

aplicar-se à fundição de aço [37]. Estes resultados lançam dúvidas sobre a ideia de que o enchimento intersticial das moldações é necessário para evitar a penetração localizada de metal. A rugosidade superficial diminui quando o óxido de ferro só está presente nos grãos de areia.

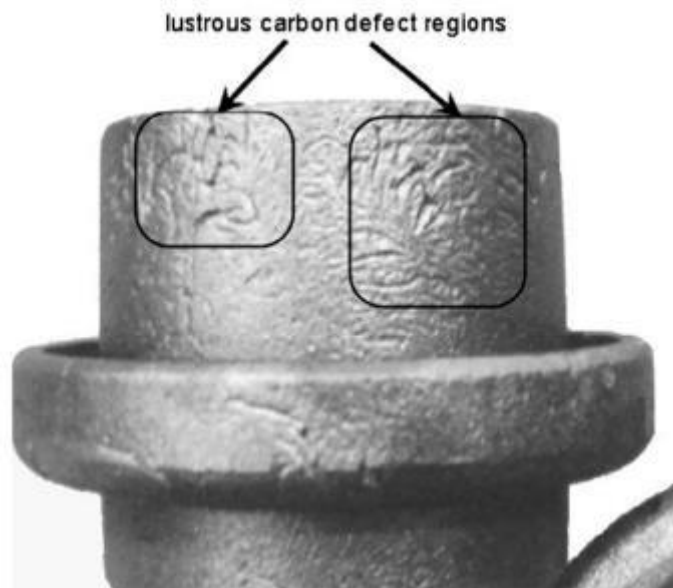


Figura 6 - Exemplo de defeito de carbono lustroso [37].

2.4. Qualidade superficial

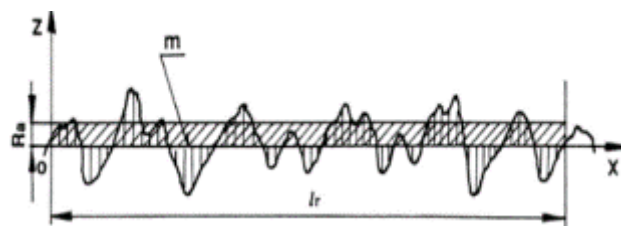
Os fundidos produzidos por um processo de fundição de areia têm múltiplas características de qualidade. A qualidade de um fundido depende sempre do controlo adequado da grande quantidade de parâmetros envolvidos no processo, bem como da combinação adequada dos mesmos, enquanto que alguns dos defeitos são persistentes e difíceis de evitar. Controlar o processo para evitar as rejeições de componentes fundidos devido à presença de tais defeitos que persistem depende principalmente da compreensão correta dos parâmetros que lhe estão associados.

2.5. Rugosidade

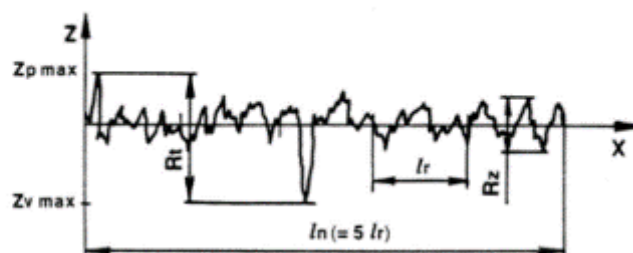
A rugosidade é a medida das micro-irregularidades geométricas existentes na superfície da uma peça, decorrentes do seu processo de fabrico, e é geralmente quantificada através de parâmetros relacionados com a altura (amplitude) e largura (espaçamento) das irregularidades da superfície. Os parâmetros mais utilizados na medição da rugosidade são o desvio médio aritmético do perfil de rugosidade (R_a), altura total do perfil de rugosidade (R_t) e média aritmética das alturas máximas do perfil (R_z), apresentados na figura 7 [38].

O acabamento superficial de um fundido depende essencialmente das partículas de areia que compõe a moldação/macho. Partículas maiores produzirão uma superfície mais rugosa do que grãos mais finos. A tensão superficial do metal líquido e a sua capacidade de salientar as eventuais imperfeições na moldação/macho irão ter impacto na rugosidade superficial do fundido. Através da adição de materiais carbonáceos é possível impactar positivamente a tensão da superfície do metal, melhorando o grau de acabamento superficial. Uma areia fina tenderá a preencher imperfeições na superfície da moldação/macho, garantindo assim uma melhor qualidade superficial [36].

$$Ra = 1 / l_r \int |Z(x)| dx$$



$$Rt = Zp \text{ max} + Zv \text{ max}$$



$$Rz = 1 / 5 (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5)$$

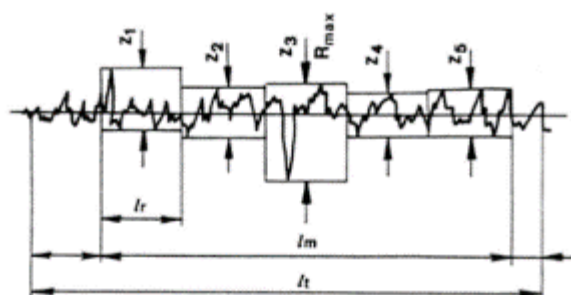


Figura 7 - Exemplos ilustrativos da determinação de: desvio médio aritmético do perfil de rugosidade, Ra; altura total do perfil de rugosidade, Rt; média aritmética das alturas máximas do perfil, Rz [12].

2.6. Defeitos

A qualidade dos fundidos é fortemente influenciada pelas misturas utilizadas no fabrico das moldações e machos. A preparação de misturas com as propriedades pretendidas é uma tarefa tradicional na indústria da fundição, no entanto, estudos indicam que 40 a 60% dos defeitos de fundição são derivados da qualidade insatisfatória das misturas utilizadas [40, 41]. Por esta razão, torna-se essencial a avaliação e resolução dos problemas associados à criação de defeitos durante o processo de fabrico de um fundido.

2.6.1. Porosidade

A porosidade pode ser subdividida em três causas: Primeiramente, gases mantidos em solução no metal líquido podem precipitar enquanto o metal solidifica, devido ao decréscimo da sua solubilidade com a redução de temperatura [32]. A segunda causa é relacionada com as condições de vazamento, ou seja, no caso das condições serem desfavoráveis, como por exemplo uma elevada velocidade de vazamento do metal, é possível o aprisionamento de ar na corrente de metal líquido e, portanto, criação de porosidade quando o metal solidificar. Por fim, os aglomerantes utilizados na moldação e

machos durante o vazamento, sofrem decomposição e formam compostos gasosos. No caso da pressão na interface dos gases com o metal líquido for superior à pressão metalostática, ocorre a penetração do gás no metal líquido, originando defeitos geralmente conhecidos como porosidade, como se pode observar na figura 8.

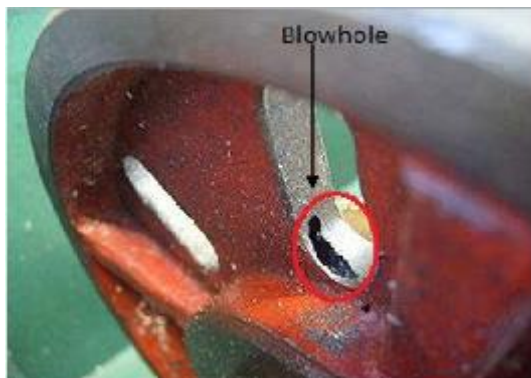


Figura 8 - Exemplo de porosidade num fundido [42].

A dimensão das bolhas é extremamente importante uma vez que são necessários diâmetros superiores a 5 milímetros para que haja capacidade de quebra da dupla camada de óxido (a sua própria camada e a camada de óxido adjacente) quando atingem o topo da moldação. Este facto faz com que as bolhas com diâmetros inferiores a 5 milímetros se encontrem imediatamente sob a camada superficial do fundido, havendo alguma tendência de se aglomerarem acima dos ataques do sistema de gitagem [32].

Assim que haja a formação da primeira bolha, existe grande facilidade na formação de bolhas adicionais, uma vez que o rasto formado pela primeira serve de passagem para as seguintes, e aumentando a tendência para a formação de defeitos de elevadas dimensões. As bolhas contêm uma variedade de gases, incluindo vapor de água, que possuem grande capacidade oxidante de metais como alumínio e outros metais com pontos de fusão mais elevados. O rasto formado pela passagem das bolhas em secções mais finas do fundido é particularmente prejudicial uma vez que existe a possibilidade de ocorrer penetração do rasto de bolhas no macho adjacente, enquanto que no caso de ocorrer em secções mais grossas, as bolhas irão percorrer o rasto desde o macho até à camada mais superficial do fundido.

De forma a reduzir a tendência à formação de porosidade na peça deve atentar-se principalmente em fatores como (1) a produção de gases e (2) capacidade de escoamento de gases da moldação. Deve utilizar-se a mínima quantidade de aglomerantes com a capacidade de libertar poucos gases ou que possuam uma libertação retardada dos mesmos. Analogamente, deve-se procurar melhorar a permeabilidade do macho através da adição de aditivos que permitam um melhor escoamento dos gases. As condições de vazamento também influenciam bastante no aparecimento de porosidade, nomeadamente a velocidade de enchimento e a temperatura de vazamento. De forma a não permitir a entrada de gases na corrente de metal líquido e a pressão interna do macho não supere a do líquido circundante, deve-se aumentar a velocidade de enchimento. Em último recurso deve-se recorrer ao aumento da temperatura de vazamento, de forma a que a libertação dos gases ocorra previamente à formação da camada de óxido [32].

2.6.2. Macho partido

O defeito de macho partido, tal como o nome indica, é referente à fratura parcial ou total do macho, que se reflete no aparecimento de protuberâncias irregulares situadas nas cavidades obtidas pelo meio de machos. A quebra dos machos pode ocorrer previamente ao vazamento, nomeadamente no manuseamento dos mesmos.

2.6.3. Veining [43]

O defeito de *veining* é essencialmente causado durante o processo de vazamento do metal líquido devido à criação de tensões internas entre a camada superficial do macho e a camada imediatamente abaixo desta. Estas tensões internas são criadas devido à existência de um gradiente térmico entre as camadas anteriormente mencionadas, fazendo com que o processo de expansão da sílica não ocorra simultaneamente. À medida que a temperatura superficial do macho aumenta, o volume da areia diminui. A areia na camada imediatamente abaixo da camada superficial, estando a uma temperatura inferior, irá aumentar de volume à medida que sofre a transformação alotrópica de alfa para beta a 573 °C. A combinação de areia em contração na camada superficial com areia em expansão na camada imediatamente abaixo, irá criar fissuras no macho. As zonas fissuradas da areia de sílica sofrem penetração por parte do metal líquido, havendo formação de um excedente metálico fino e irregular nas cavidades do fundido, nomeadamente nos cantos e arestas, como se pode observar na figura 9.

Este defeito ocorre geralmente nas cavidades do fundido, estando relacionado com a utilização de moldações quimicamente endurecidas (machos). Uma vez que a sua formação é primariamente atribuída à expansão induzida termicamente da areia utilizada na moldação, os machos fabricados exclusivamente com areia de sílica apresentam elevada vulnerabilidade. Adicionalmente, o metal líquido que rodeia os machos provoca um gradiente térmico entre a superfície e o centro dos mesmos, o que causa tensões internas. Este tipo de defeito é também influenciado pelo comportamento a elevadas temperaturas dos aglomerantes (resistência à tração a quente, termoplasticidade), dos possíveis aditivos e também pela molhabilidade e condutividade térmica da mistura utilizada.

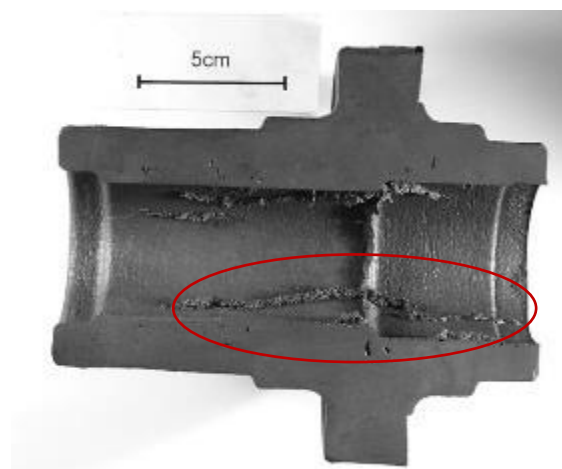


Figura 9 - Exemplo de defeitos de *veining* assinalados a vermelho [43].

Os fatores decisivos que influenciam a formação de *veining* são: (1) o tamanho de grão e (2) a distribuição granulométrica. Um maior grau de uniformidade da mistura promove o aumento das tensões, uma vez que todos os grãos de sílica sofrem a transformação alotrópica simultaneamente; A temperatura de vazamento, uma vez que elevadas temperaturas de vazamento provocam uma transformação rápida da sílica e, portanto, aumento das tensões; Os aditivos utilizados, que promovem o decréscimo das tensões ao suprimir a expansão da sílica devido ao aumento da termoplasticidade e formação de ligações cruzadas estáveis por parte dos aglomerantes; O material base da mistura, que influencia diretamente na tendência à formação de defeitos consoante a dimensão e uniformidade da expansão da sílica, bem como a condutividade térmica; A intensidade da compactação, sendo que uma elevada intensidade de compactação leva a uma maior densidade compactada e portanto, maiores tensões internas [43].

De forma a prevenir a formação de *veining* devem adotar-se medidas como: a utilização de areia de sílica com distribuição granulométrica menos uniforme - garantindo uma transformação da sílica mais homogênea; a redução da intensidade de compactação; a utilização de um material base com elevada condutividade térmica - reduzindo assim as tensões formadas pelos gradientes térmicos e aumentando a velocidade de solidificação; e por fim a utilização de aditivos [43].

2.6.4. Sinterização

O defeito de sinterização é principalmente caracterizado por uma camada fina de areia firmemente aderida à superfície do fundido. Ocorre geralmente nas secções com maior espessura dos fundidos, nas zonas com maior temperatura, e em torno dos machos (interface metal/macho). A areia que compõe os machos irá sinterizar na forma de uma crosta fina devido à sua baixa resistência térmica. Adicionalmente, os silicatos com baixo ponto de fusão irão reagir com o óxido de ferro e formar silicatos de ferro, reduzindo ainda mais o seu ponto de sinterização. A sinterização e fusão das impurezas presentes na mistura de areia de moldação/macho permite uma velocidade de penetração do metal líquido superior. A tendência do metal líquido a penetrar os espaços entre os grãos de areia irá resultar numa aderência firme desta crosta à superfície do fundido, tornando a etapa da sua remoção difícil [44,45]. Os materiais com elevadas temperaturas de vazamento são muito mais propensos à ocorrência deste defeito. O aspeto visual deste defeito encontra-se representado na figura 10.

As principais causas do defeito de sinterização relacionam-se essencialmente com o estado de compactação da areia, o seu tamanho de grão e a temperatura de fusão do material base da moldação/macho. No caso de haver uma compactação não homogênea da areia, existe um aumento do espaço entre os grãos, permitindo assim a penetração do metal. Analogamente, um tamanho de grão grosseiro provoca o mesmo efeito. Se a temperatura de fusão do material base da moldação/macho for baixa facilita a ocorrência de reações entre o metal e a areia. Por exemplo, no caso de haver uma atmosfera oxidante da cavidade moldante, o ferro fundido irá oxidar e reagir com a sílica da areia, formando um composto com baixa viscosidade (silicato de ferro), que irá promover a sinterização como mencionado anteriormente. Desta forma, a quantidade de calor que é necessário remover do ambiente da cavidade moldante é elevada, permitindo a ocorrência de

reações entre o metal líquido e componentes do material de moldação/macho com pontos de fusão baixos, formando-se assim as crostas de areia aderidas firmemente ao fundido [45]. Adicionalmente uma das causas deste defeito pode ser uma temperatura de vazamento muito elevada, presença de impurezas no material de moldação/macho, e velocidade de vazamento muito elevadas, o que causa um aumento da pressão metaloestática e assim facilita a penetração do metal.

De forma a reduzir a tendência de ocorrer sinterização deve-se ter em atenção o desempenho dos componentes presentes na mistura de areia de moldação/macho à sinterização, através de testagem a nível da sua densidade, distribuição granulométrica e permeabilidade. É necessário garantir que existe uma compactação homogênea da areia, uma velocidade de vazamento adequada de forma a prevenir elevadas pressões metaloestáticas, e uma utilização de areia com baixo grau de impurezas.



Figura 10 - Exemplo de defeito de sinterização [46].

2.6.5. Inclusões de areia

O defeito de inclusão de areia refere-se a partículas, nomeadamente areia, pertencentes ao material de moldação ou macho, que se encontram presentes na estrutura final do fundido. Em caso de compactação insuficiente do material de moldação ou de um endurecimento insuficiente das moldações de areia e/ou machos, as partículas de areia podem sofrer abrasão durante o fecho da moldação e permanecer no fundido.

As inclusões de areia são formadas irregularmente, na superfície do fundido, combinadas com protuberâncias metálicas em outros pontos. O defeito de inclusão de areia é uma das causas mais frequentes de rejeição dos fundidos. É extremamente difícil de diagnosticar, uma vez que estes defeitos ocorrem geralmente em posições muito variadas e, portanto, são muito difíceis de atribuir a uma causa local. Determinadas áreas de areia são arrancadas pelo fluxo metálico e depois flutuam até à superfície do fundido porque não possuem molhabilidade suficiente para ser molhadas pelo metal líquido. As inclusões de areia aparecem frequentemente associadas a porosidades provenientes de libertação de monóxido de carbono e partículas de escória. Estas também podem

permanecer aprisionadas sob a superfície do fundido juntamente com óxidos metálicos e escória, e só se tornam visíveis durante a maquinagem. Um exemplo de defeito de inclusão de areia é apresentado através de uma imagem SEM na figura 11b (proveniente da secção apresentada na figura 11a), onde a análise EDS (figura 11c) realizada à zona 1 revelou uma elevada percentagem de silício, caraterístico de grãos de areia de sílica.

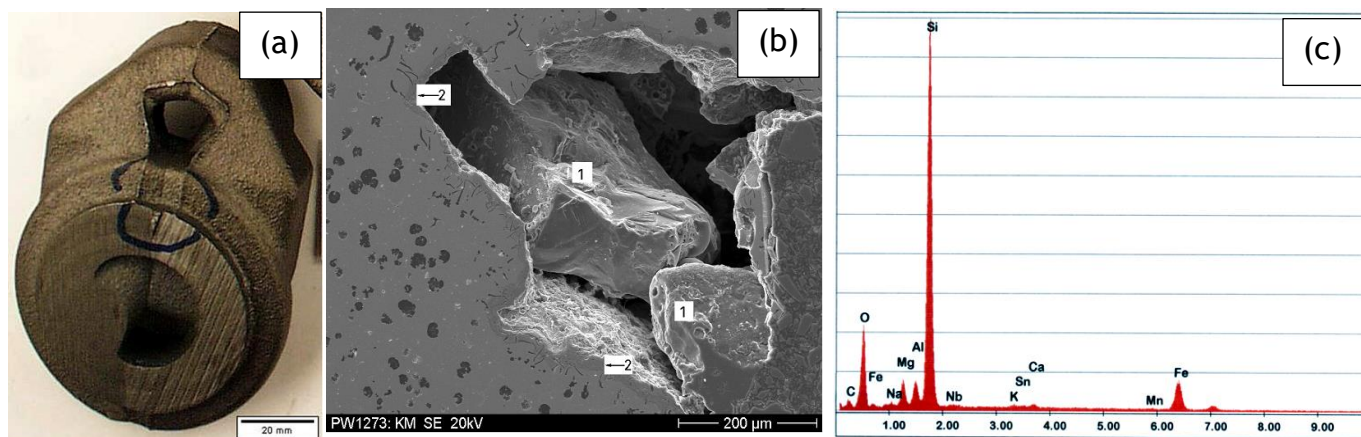


Figura 11 - (a) Secção defeituosa assinalada no fundido; (b) Imagem SEM de um defeito encontrado na secção defeituosa; (c) Análise EDS da zona 1 assinalada em (b) [47].

Quantidades demasiado baixas de aglomerante aliadas a endurecimento insuficiente e a utilização de uma percentagem elevada de material regenerado são as causas mais comuns de defeitos na moldação e nos machos [48]. Outras causas que podem originar este defeito são uma elevada altura de vazamento, que devido ao impacto contra a parede da moldação provoca erosão, e um elevado tempo de vazamento (associado a um mau dimensionamento do sistema de gitagem).

Para diminuir a tendência a ocorrer inclusões de areia deve-se aumentar a resistência mecânica dos machos, através de um aumento da quantidade de ligantes e aumento da sua compactação. Adicionalmente deve-se evitar um elevado impacto do metal nas paredes da moldação ao reduzir a altura de vazamento. Para evitar elevados tempos de vazamento deve-se tentar melhorar e otimizar os canais de distribuição [49].

3. Metodologia Experimental

A metodologia experimental deste trabalho iniciou-se pela caracterização da areia de sílica e das areias utilizadas como aditivos, uma vez que estas fariam parte da mistura que compõe os machos. Uma vez que a natureza deste trabalho é industrial, a metodologia de caracterização das areias foi realizada conforme os procedimentos da empresa. Após a caracterização das areias através de ensaios de granulometria, coeficiente de angularidade e humidade, procedeu-se à preparação manual das misturas a estudar através da escolha das proporções areia-aditivo e resina. Seguidamente elaboraram-se diferentes provetes que foram utilizados para realizar ensaios de resistência à flexão, tempo de bancada e permeabilidade.

Os aditivos a serem estudados foram escolhidos em conjunto com a empresa, a partir de todo o conjunto de aditivos recomendados pelos técnicos da empresa. Teve-se como principal objetivo a escolha de três aditivos com índices de finura AFS distintos. Desta forma utilizou-se como areia base, a areia de sílica que é habitualmente utilizada pela empresa, e como aditivos areias de Castball 40 (índice AFS 40), Cromite 45-50 (índice AFS entre 45 e 50) e Cromite 55-60 (índice AFS entre 55-60). No que toca à escolha das proporções areia base-aditivo e quantidade de resina, utilizou-se como referência uma mistura com as proporções de 70% areia base, 30% aditivo e 160 gramas de resina (80 gramas de Parte I e 80 gramas de Parte II), que é comumente utilizada pela empresa na produção de machos e foi recomendada pelos técnicos tendo em conta ensaios realizados previamente que demonstraram que esta proporção proporcionava a melhor relação custo-qualidade.

Utilizando as proporções das misturas descritas, procedeu-se à mistura das areias no misturador *Fordath* e, de seguida, elaboração de machos em série na máquina H25 (representada na figura 12), conforme o protocolo da empresa. Após o fabrico dos machos estes foram pintados pelos robots de pintura e secos na estufa. A tinta utilizada teve como principal função o aumento da refratariedade, impermeabilização face ao metal líquido e redução da rugosidade superficial dos machos. Após a secagem dos machos, estes foram recolhidos e procedeu-se à sua colocação nas caixas de moldação. Posteriormente ao vazamento, solidificação e arrefecimento do metal vazado, ocorreu o abate das moldações. A inspeção visual das peças foi feita previamente às etapas de limpeza das cavidades obtidas pelos machos fabricados para ensaio.



Figura 12 - Máquina H25.

3.1. Métodos de ensaio de caracterização das areias utilizadas

3.1.1. Ensaio de granulometria [49]

Este método tem por objetivo definir e efetuar a análise granulométrica e cálculo do índice de finura AFS das areias de macharia e moldação (partículas de diâmetro inferior a 3,36 mm).

Define-se por granulometria, a distribuição dimensional das partículas constituintes de um determinado produto. O princípio deste ensaio relaciona-se com a determinação da repartição dos grãos da amostra a estudar, segundo classes convencionais de dimensões. A repartição dos grãos é feita com uma série de peneiros, de diferentes aberturas de malha. O índice de finura AFS é calculado a partir da repartição granulométrica.

A aparelhagem necessária para a realização deste ensaio é:

- Série de peneiros ASTM E 11;
- Uma base;
- Uma tampa;
- Agitador de peneiros RO-TAP;
- Balança de precisão 0,01 g;
- Pincel.

Para iniciar este ensaio foi necessário pesar 100 gramas de amostra a estudar, previamente seca na estufa PROLAB (figura 13a) a 105 °C. Procedeu-se à determinação do teor de finos menores que 20 micron através da utilização do aparelho de lavagem automática (figura 13b). Após a lavagem da areia para remoção dos finos, retirou-se a areia do aparelho e voltou-se a secar e pesar. A diferença do valor obtido e a massa inicial de 100 g corresponde à massa de finos limpos e secos que foi retirada.

De seguida foi necessário sobrepor os peneiros sobre o fundo do peneiro, por ordem decrescente de números (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) como demonstrado na figura 13c. A amostra de areia foi colocada sobre o peneiro superior, adicionou-se a tampa e colocou-se o peneiro no agitador RO-TAP (figura 13d). A duração da agitação foi de 10 minutos. Finalizado o processo, retirou-se a tampa e o peneiro superior. Colocou-se o peneiro superior na balança e tara-se. Sem desligar ou tarar novamente, retirou-se o peneiro da balança e procedeu-se à limpeza do mesmo, retirando todos os grãos presentes na malha e nas paredes interiores com a ajuda de um pincel. Por fim colocou-se novamente o peneiro na balança e o valor obtido corresponde à massa de areia retida nesse peneiro. Repete-se o processo de limpeza e pesagem dos restantes peneiros e regista-se todos os valores obtidos.

O próximo passo foi calcular o total das frações retidas em percentagem. O valor deve ser igual ao peso inicial da amostra $\pm 0,2\%$. Para o cálculo do índice de finura AFS procedeu-se à multiplicação de cada fração retida pelo coeficiente multiplicativo indicado na tabela apresentada abaixo.

Tabela 2 - Número do peneiro ASTM E 11 e correspondentes aberturas (em mm) e coeficiente multiplicativo.

Número do peneiro ASTM E 11	Abertura (mm)	Coeficiente multiplicativo
6	3,350	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

O coeficiente multiplicativo para cada peneiro é o número ASTM do peneiro precedente, com exceção dos peneiros 6, 12, 20 e base que multiplica por 3, 5, 10 e 300, respetivamente.

A distribuição granulométrica expressa-se em percentagem (%) retida em cada peneiro. Pode ser apresentada numericamente ou em histograma.

O índice de finura expressa-se numericamente, com ajuda da seguinte fórmula.

$$\text{Índice de finura A.F.S.} = \frac{\text{Soma dos produtos}}{\text{Total das frações retidas em \%}}$$

Sendo que:

Soma dos produtos - Soma dos produtos entre fração retida em cada peneiro e respectivo coeficiente multiplicativo

Total das frações retidas em % - Soma das frações retidas em cada peneiro.



Figura 13- Aparelho de lavagem automática "Autoclave Dietert Ditroit NO. 534-A. (b) Estufa PROLAB (c) Série de peneiros ASTM E 11 (d) Agitador de peneiros RO-TAP.

3.1.2. Ensaio de coeficiente de angularidade [50]

Este ensaio tem como objetivo determinar o coeficiente de angularidade de areias de macharia e moldação. Define-se por coeficiente de angularidade a razão entre a superfície específica real e a superfície específica teórica. A medida da superfície específica é baseada na passagem de ar através de um leito de areia em forma de coluna cilíndrica longa (princípio de Blaine).

A superfície específica real (S_r) é função dum peso em volume, da porosidade e da permeabilidade do leito de areia referido anteriormente. O processo descrito previamente permite determinar por medida da permeabilidade, a superfície específica real de uma determinada areia. A superfície específica real indica-nos a superfície total em cm^2 de todos os grãos de uma grama de areia.

A superfície específica teórica (S_t) calcula-se partindo da análise granulométrica, supondo que todos os grãos são esféricos. O valor da superfície específica teórica é sempre inferior ao da superfície específica real, pois este último tem em conta a morfologia real dos grãos, de onde resulta para um mesmo peso de grãos uma maior superfície.

Para a realização deste ensaio foi necessária a seguinte aparelhagem:

- Aparelho para medir superfície específica tipo POF.
- Série de peneiros ASTM E 11;
- Uma base e uma tampa;
- Agitador de peneiros RO-TAP;
- Balança de precisão 0,01 g;
- Pincel;
- Funil de vidro;
- Cronómetro.

Iniciou-se pela recolha de uma amostra da areia ou aditivo pretendido, lavada e seca nos equipamentos previamente indicados, que foi colocada no tubo graduado do aparelho POF, representado na figura 14a. Com a ajuda de um funil de vidro procedeu-se à colocação da amostra no tubo graduado até que esta alcançasse o primeiro valor de volume (V) da escala. Após a colocação da areia no tubo graduado foi necessário bater ligeiramente nas paredes do tubo para compactar a amostra, até não se verificar redução do volume. De seguida colocou-se a torneira do aparelho na posição A (aspiração) (figura 14b). Com a ajuda da pera de borracha, fez-se subir o petróleo no tubo de medida, no mínimo até à marca superior negra. Colocou-se a torneira do aparelho na posição R (repouso)(figura 14c) e seguidamente rodou-se a torneira para a posição B (serviço)(figura 14d). Logo que o petróleo atingiu a marca superior vermelha, ligou-se o cronómetro. Imediatamente após o petróleo atingir a marca inferior vermelha, parou-se o cronómetro. Anotou-se o tempo (T) gasto pelo petróleo ao deslocar-se entre as duas marcas vermelhas e calculou-se a superfície específica real, relacionando o tempo (T) com o volume (V), com a ajuda do gráfico correspondente ao aparelho POF, presente no anexo A. Retirou-se a areia do tubo graduado para um recipiente previamente tarado na balança, e registou-se o valor de massa da areia ensaiada.

Seguidamente procedeu-se ao cálculo da superfície específica teórica. Para isto repetiu-se o procedimento de colocação da amostra de areia ensaiada na série de peneiros ASTM E 11, onde se agitou o peneiro durante 10 minutos no agitador RO-TAP. Por fim registaram-se os valores de massa retida em cada peneiro (similarmemente ao procedimento do ensaio de granulometria) e calculou-se a fração retida em cada peneiro. Procedeu-se à multiplicação de cada fração retida pelo coeficiente multiplicativo indicado na tabela apresentado abaixo.

Tabela 3 - Número de peneiros ASTM E 11 e respetivas aberturas (em mm) e coeficiente multiplicativos.

Número do peneiro ASTM E 11	Abertura (mm)	Coeficiente multiplicativo
20	0,850	17,94
30	0,600	31,61
40	0,425	44,75
50	0,300	63,04
70	0,212	89,15
100	0,150	125,91
140	0,106	177,95
200	0,075	252,51
270	0,053	355,91
BASE	-	619,18

Seguiu-se o cálculo a soma de todos os produtos indicados no parágrafo anterior e calculou-se a superfície específica teórica, dividindo a soma dos produtos atrás referidos, pelo peso da amostra.

O resultado deve ser expresso numericamente e sem unidades, através da utilização da seguinte fórmula:

$$\text{Coeficiente de Angularidade} = \frac{\text{Sup. Esp. Real}}{\text{Sup. Esp. Teórica}}$$

A superfície específica real expressa-se em cm^2/g , com ajuda do gráfico correspondente ao aparelho, em que se relaciona o tempo de escoamento e volume ocupado pela amostra. A superfície teórica expressa-se em cm^2/g , calculada a partir da análise granulométrica. De forma a validar os resultados, procedeu-se à observação dos grãos dos aditivos com a utilização da lupa LUX 150S *Nachet*.



Figura 14 - (a) Aparelho de medição de superfície específica real na posição: (b) de aspiração (c) de repouso e (d) de serviço, respetivamente.

3.1.3. Ensaio de humidade [51]

O objetivo deste ensaio é definir e determinar a humidade das areias de moldação e de macharia. O princípio deste ensaio prende-se com a determinação da perda de água de um dado produto, mantido à temperatura de 105°C , até peso constante. Os produtos a ensaiar foram colocados numa balança que tem incorporado um sistema de secagem com raios infravermelhos. As amostras ao mesmo tempo que são aquecidas são simultaneamente pesadas até que o valor pesado com um determinado intervalo de tempo fosse constante.



Figura 15 - Aparelho de medição de humidade.

A aparelhagem necessária para a realização deste ensaio é uma espátula, um prato de alumínio e uma balança com sistema de infravermelhos incorporado, regulado para 104 ± 1 °C, como a da figura 15.

Primeiramente foi necessário ligar a balança e sistema de infravermelhos e conferir a temperatura pretendida. De seguida seleccionou-se o indicador do tipo de resultado (% 0-100) e tara-se a balança.

Procedeu-se à distribuição uniforme no prato de alumínio de 10 a 20 gramas (no caso de amostras com humidades superiores a 10% de humidade, 2 a 5 gramas) da amostra a analisar. Carregou-se no botão “START” até que o indicador luminoso ficasse constante.

Esperou-se que o valor indicado no visor comece a piscar (fim de análise) e ler no visor o valor obtido. A humidade expressa-se em percentagem (%), sendo que o valor lido no visor, representa diretamente a percentagem de humidade perdida pela amostra.

3.2. Método de preparação das misturas de areia ensaiadas

Tendo em conta a natureza industrial do estágio, as misturas de areia utilizadas para a realização dos ensaios de resistência à flexão, tempo de vida útil e perda ao fogo, não foram passíveis de obtenção direta nos misturadores industriais. Por esta razão foi necessário proceder à preparação manual das misturas de areia seguindo o protocolo da empresa.

O primeiro passo foi a obtenção de areia de sílica, Castball 40, Cromite 45-50, Cromite 55-60 e respetivas resinas parte I e II, nas proporções pretendidas para uma carga de 10kg de areia. As misturas consistiram nas proporções apresentadas na tabela abaixo.

Tabela 4- Peso dos componentes, em kg, que compõe as misturas de areia C40, C45 e C55.

Peso (kg)	C40	C45	C55
Resina P1	0,08		
Resina P2	0,08		
Castball 40	3	-	-
Cromite 45-50	-	3	-
Cromite 55-60	-	-	3
Areia de sílica	7	7	7

Após a obtenção das diferentes areias e tendo em conta que a areia de sílica foi obtida diretamente do misturador *Fordath* de forma a replicar as condições em que a areia estaria, procedeu-se à mistura nos laboratórios através da batedeira da empresa *Felino*, presente na figura 16.

Primeiramente pesou-se 2 kg de areia de sílica em dois recipientes distintos, e 3 kg da areia aditivo que se colocou diretamente na misturadora. O primeiro recipiente com 2 kg de areia foi colocado na balança, onde se tareou e pesou 0,08 kg de resina Parte I. Envolveu-se toda a resina pesada em areia e colocou-se na misturadora. Com os 3kg de areia aditivo e 2 kg de areia de sílica com 0,08 kg de resina Parte I, procedeu-se ao início da mistura ao ligar o aparelho durante 2 minutos. No segundo recipiente com 2 kg de areia

pesaram-se 0,08 kg de parte II e garantiu-se novamente que toda a resina estava envolvida na areia. Colocou-se o conteúdo do segundo recipiente na misturadora e iniciou-se o aparelho novamente durante 2 minutos. As misturas preparadas foram utilizadas para a realização dos ensaios de resistência à flexão, tempo de vida útil e perda ao fogo.



Figura 16- Batedeira Felino utilizada para a elaboração das misturas estudadas.

3.2.1. Ensaio de resistência à flexão [52]

Os ensaios de resistência à flexão têm como principal objetivo a determinação da carga de rotura de um provete que, no caso específico da Funfrap, é feito com a mistura de areia preparada e endurecida com dimetiletilamina (DMEA). O provete foi sujeito a uma força axial com a ajuda de um aparelho tipo *Georg Fischer* PEG, representado na figura 17c. Este aparelho possui uma prensa hidráulica com manivela manual e um

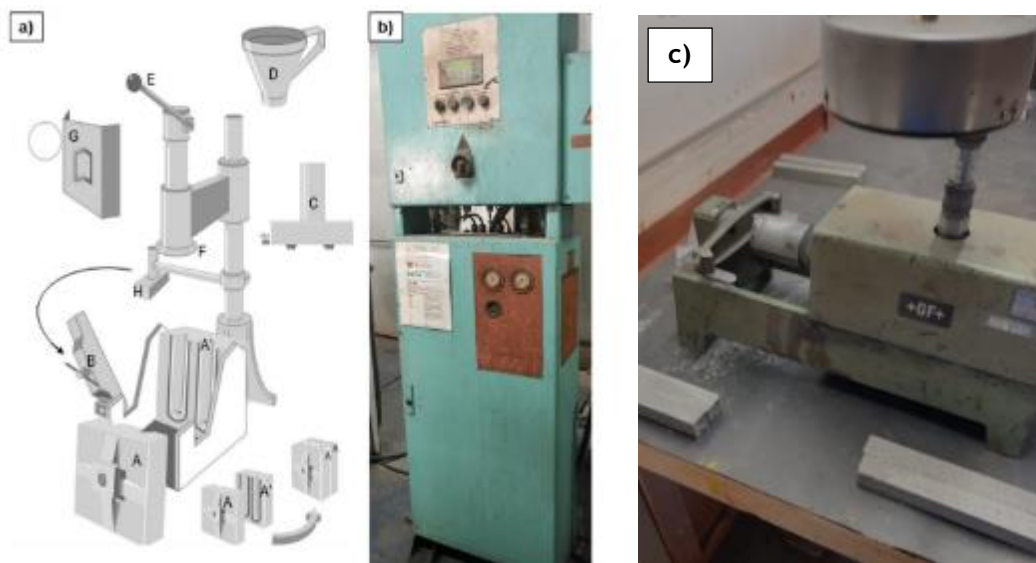


Figura 17- Máquina de sopragem de provetes (a), molde móvel (A), molde fixo (A'), porca de orelhas (B), camisa de sopragem (C), funil (D), alavanca (E), anel (F), placa de proteção (G), cabeça de gaseificação (H) e gaseificador de DMEA (b) [1]. Aparelho Georg Fischer PEG de prensa hidráulica com manivela manual e manómetro com ponteiro de arrasto (c).

manómetro com ponteiro de arrasto que regista a carga de rotura.

Para a confeção dos provetes foi necessário utilizar uma máquina de sopragem de provetes e um gaseificador de DMEA, cujos componentes e respetivas designações se encontram indicadas na figura 17a e 17b, respetivamente. Estando a mistura de areia realizada, procedeu-se ao enchimento da camisa de sopragem com a mistura a avaliar. Os dois meios moldes foram unidos e apertados com a porca de orelhas. Seguidamente colocou-se a camisa de sopragem sobre a caixa de provetes, alinhou-se o centro da camisa com o anel, e colocou-se a placa de proteção ao conjunto dos moldes para garantir segurança no procedimento. Primeiramente foi necessário acionar ligeiramente a alavanca até encostar o anel ao topo da camisa de sopragem, e depois acionou-se novamente a alavanca para que houvesse compactação da mistura no molde. De seguida, foi necessário remover a placa de proteção, retirar a camisa de sopragem e colocar a cabeça de gaseificação sobre o conjunto de moldes. Acionou-se ligeiramente a alavanca até encostar a cabeça de gaseificação aos dois meios moldes, e pressionou-se o botão do gaseificador de DMEA, validando-se o seu funcionamento com o aparecimento de uma luz verde no aparelho. Após a luz verde se apagar, foi necessário retirar a cabeça de gaseificação, desapertar a porca de orelhas e retirar os provetes. A duração do período de gaseificação foi regido pelo gaseificador (programado pela empresa para que tenha a duração de 1 minuto), sendo sempre constante para todas os provetes. Os provetes obtidos são paralelepípedicos com um comprimento de 175 mm e altura e largura de 22,36 mm.

Para a medição da resistência à flexão foi necessário colocar o provete elaborado no aparelho de prensa hidráulica com manivela manual. Colocou-se o provete horizontalmente sobre o dispositivo, encostado a dois cutelos apoiados em dois espigões da máquina. Colocou-se o ponteiro de arrasto (vermelho) encostado ao ponteiro principal (preto). Rodou-se a manivela do aparelho, o mais uniformemente possível, fazendo com a prensa comesse a exercer força axial sobre o provete, que começou a fletir até ocorrer à sua rotura. Quando o provete partiu, o ponteiro principal recuou, ficando o ponteiro de arrasto a indicar o valor da carga a que ocorreu a rotura. Procedeu-se à leitura do valor da escala interior do manómetro .

A resistência à flexão é expressa em daN/cm^2 (0,1 MPa), e o resultado é a média de dois ensaios, indicado à unidade. Para serem válidos não podem diferir entre si mais de 5 daN/cm^2 .

3.2.2. Ensaio de perda ao fogo [53]

Este ensaio permitiu definir e determinar as perdas ao fogo das areias de moldação, de macharia e de refratários. Definiu-se por perda ao fogo, a quantidade de matéria que um produto perde, após ser sujeito a uma determinada temperatura durante um determinado tempo. Para tal foi necessário determinar a diferença de peso sofrida por uma amostra submetida a um aquecimento de 900 °C e mantida a essa temperatura durante uma hora, de maneira a desaparecerem todas as matérias orgânicas.

A aparelhagem necessária para a realização deste ensaio é:

- Mufla regulada a $900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Balança de precisão 0,01 g.
- Estufa regulada a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Cápsulas de sílica de diâmetro 40 a 50 mm e altura 15 a 20 mm.
- Exsicador.
- Pinça em níquel de comprimento 400 mm.
- Cronómetro.

Primeiramente procedeu-se à pesagem da cápsula de sílica (P1), apresentada na figura 18a, com a ajuda da balança de precisão da figura 18b. Na cápsula de sílica, colocou-se entre 10 e 15 gramas da amostra a estudar (até às 0,1 mg) previamente seca a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, durante 30 minutos (P2). Repartiu-se uniformemente a amostra no fundo da cápsula para que a calcinação fosse homogénea. De seguida, introduziu-se a cápsula no centro da mufla apresentada na figura 18c, fechou-se a porta e deixou-se calcinar a $900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 1 hora. Por fim retirou-se a cápsula da mufla e deixou-se arrefecer num exsicador, pesando a amostra quando possível.

As perdas ao fogo expressam-se em percentagem (%) com a ajuda da seguinte fórmula:

$$\text{Perda ao fogo (\%)} = \frac{P2 - P3}{P2 - P1} \times 100$$

Sendo:

P1 = Peso da cápsula

P2 = Peso da cápsula + o produto, antes da estufagem.

P3= Peso da cápsula + o produto, depois da estufagem.

O resultado é a média de dois ensaios, indicado com uma casa decimal. O desvio entre cada um dos ensaios e a média deve ser inferior a 2% do valor médio.



Figura 18- Cápsula de sílica, balança de precisão e mufla, respetivamente.

3.2.3. Ensaio de permeabilidade [54]

O princípio do ensaio de permeabilidade é determinar o volume de ar em cm^3 que, sob uma pressão de 1 cm de coluna de água, atravessa um cubo ou um cilindro de 1 cm^2 de secção e de 1 cm de altura.

Para a realização desse ensaio é necessária a seguinte aparelhagem:

- Aparelho para media a permeabilidade, tipo PDU - +GF+ (figura 19a)
- Balança de precisão 0,1 g
- Moldes para provetes cilíndricos
- Bloco para desmoldação
- Aparelho de compactação, tipo PRA - +GF+

No que toca à elaboração dos provetes destinados à determinação de permeabilidade, estes devem respeitar as condições dimensionais e de compactação. Os provetes foram realizados com um molde e um compactador, apresentados na figura 19c e 19d. Inicialmente foi necessário realizar as misturas de areia a ensaiar com a resina, tal como indicado anteriormente (ver secção 3.2).

Primeiramente foi necessário pesar uma quantidade da amostra a estudar, de maneira a obter um provete com $50 \pm 0,5 \text{ mm}$ de altura. Esta quantidade é ajustada em função do tipo e quantidade de areia e ligantes da amostra a utilizar. No caso das misturas de areia utilizadas (com a resina) foi entre 130 a 140 gramas.

Introduziu-se a areia no molde (proвете cilíndrico) e colocou-se o molde no aparelho de compactar, de forma a este ficar centrado. Foi necessário destravar o aparelho com a ajuda da manivela da esquerda, e após isso, com a manivela da direita, deram-se três pancadas. Verificou-se na escala do compactador se o provete ficou com a altura especificada. Nos casos afirmativos, retirou-se o molde do compactador e retirou-se o provete do molde. Após isto foi necessário proceder à cura do provete, através da passagem de amina, recorrendo ao aparelho de gaseificação presente na figura 17a. É necessário garantir que o compactador se encontre na vertical e a sua base deve ser fixada sobre um suporte maciço e rígido de forma a evitar amortecimentos.

Passando à utilização do aparelho de permeabilidade, iniciou-se ao seleccionar a válvula de respiro vermelha (permeabilidades de 0 a 500) e colocação do molde com o provete no anel de borracha que suporta as válvulas de saída de ar. De seguida, pressionou-se o molde no anel de borracha de forma a vedar a ligação molde/anel de borracha, e colocou-se a torneira do aparelho na posição A (aspiração). Levantou-se a campânula até à marca de 1000 ficar visível e colocou-se a torneira na posição E (descompressão) para fixar a campânula levantada.

Para iniciar o ensaio foi necessário proceder à colocação da torneira na posição B (serviço), fazendo com que a campânula começasse a descer. Esperou-se que a agulha estabilizasse, indicando o valor de permeabilidade, que foi lido diretamente no mostrador (figura 19b). Por fim colocar a torneira na posição E (descompressão) e retirar o molde com o provete.



Figura 19 - (a) Aparelho de medição de permeabilidade e respetivo mostrador (b);(c) Molde cilíndrico; (d) Compactador.

3.3. Inspeção visual

A inspeção visual das peças vazadas foi realizada com o auxílio de um endoscópio que permitiu a observação do interior das cavidades dos fundidos. A partir do ensaio industrial realizado com os machos fabricados (onde se utilizaram as misturas programadas), obtiveram-se 90 peças na totalidade, estando divididas em 30 de cada mistura (ver tabela 4, página 28). A inspeção visual foi feita qualitativamente, onde se observou a presença de defeitos como sinterização e *veining*. Tal como mencionado anteriormente, a elevada exigência da qualidade superficial de componentes com complexidade acrescida, típica da indústria automóvel, requer a obtenção de cavidades isentas de defeitos. Por essa razão, considera-se que, tanto a sinterização como o *veining* (defeitos mais ocorrentes), apresentam o mesmo grau de importância no que toca à sanidade das peças.

4. Apresentação e discussão de resultados

4.1. Caracterização das areias

4.1.1. Distribuição granulométrica, coeficiente de angularidade e humidade

Os resultados dos ensaios de granulometria, coeficiente de angularidade e humidade estão reunidos na tabela 5. Na tabela 5 também está presente a avaliação da morfologia do grão consoante as imagens obtidas através da sua observação à lupa.

Tabela 5 - Valores obtidos nos ensaios de granulometria, humidade e coeficiente de angularidade. Avaliação da morfologia do grão consoante observação à lupa.

	Índice AFS	Tamanho médio de grão (µm)	Humidade	Coeficiente de angularidade	Forma do grão
Areia de sílica	52,5	300	0,01	1,41	-
CastBall 40	38,2	540	-	1,21	Arredondado
Cromite 45-50	45,7	430		1,39	Angular
Cromite 55-60	58,2	240		1,42	Angular

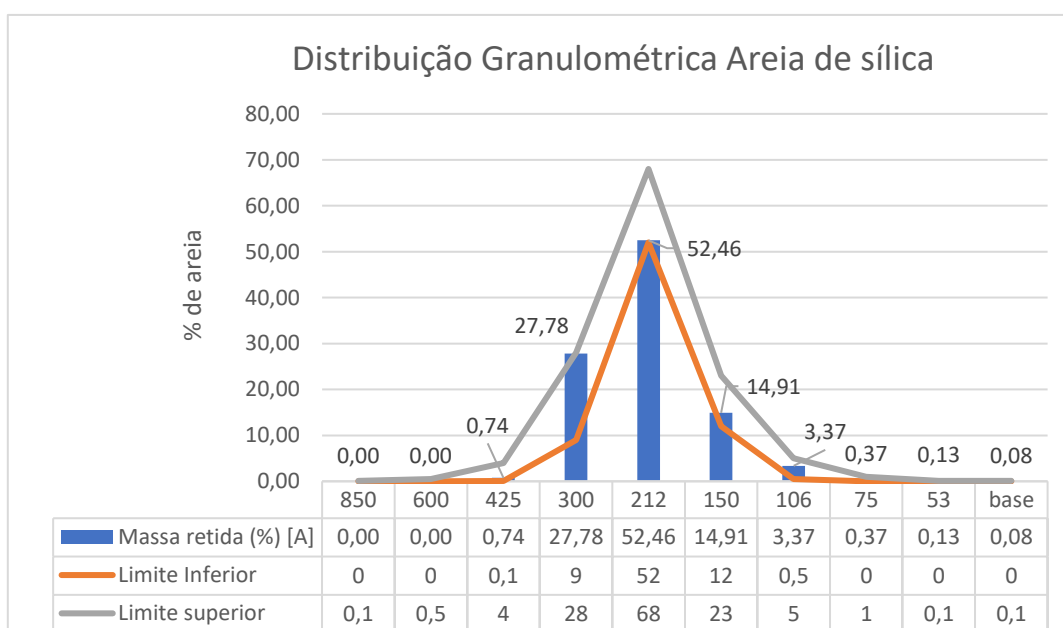


Figura 20 - Distribuição granulométrica da areia de sílica e respetivos limites superiores e inferiores indicados pela empresa.

Os resultados de distribuição granulométrica da areia de sílica são apresentados na figura 20. As linhas apresentadas a cinza e laranja correspondem aos limites máximos e mínimos admitidos pela empresa para o controlo de qualidade da areia de sílica. Através dos resultados granulométricos foi possível concluir que a areia de sílica apresenta um índice AFS de 52,5 e uma distribuição de tamanho de grão homogênea. Os cálculos

relativos ao índice de finura AFS de todas as areias analisadas estão apresentados no anexo B. Adicionalmente, tanto os valores de distribuição granulométrica da areia como os valores de humidade, encontram-se dentro da gama de limites especificados pela empresa.

Na figura 21 são apresentados os resultados das distribuições granulométricas das areias de Castball 40, Cromite 45-50 e Cromite 55-60. Os valores correspondentes ao índice AFS das areias analisadas coincidem com os valores especificados, validando que a areia de Cromite 55 é a mais fina com um índice AFS de 58, seguida pela areia de Cromite 45 com um índice AFS de 45 e a areia Castball 40 com um índice AFS de 38.

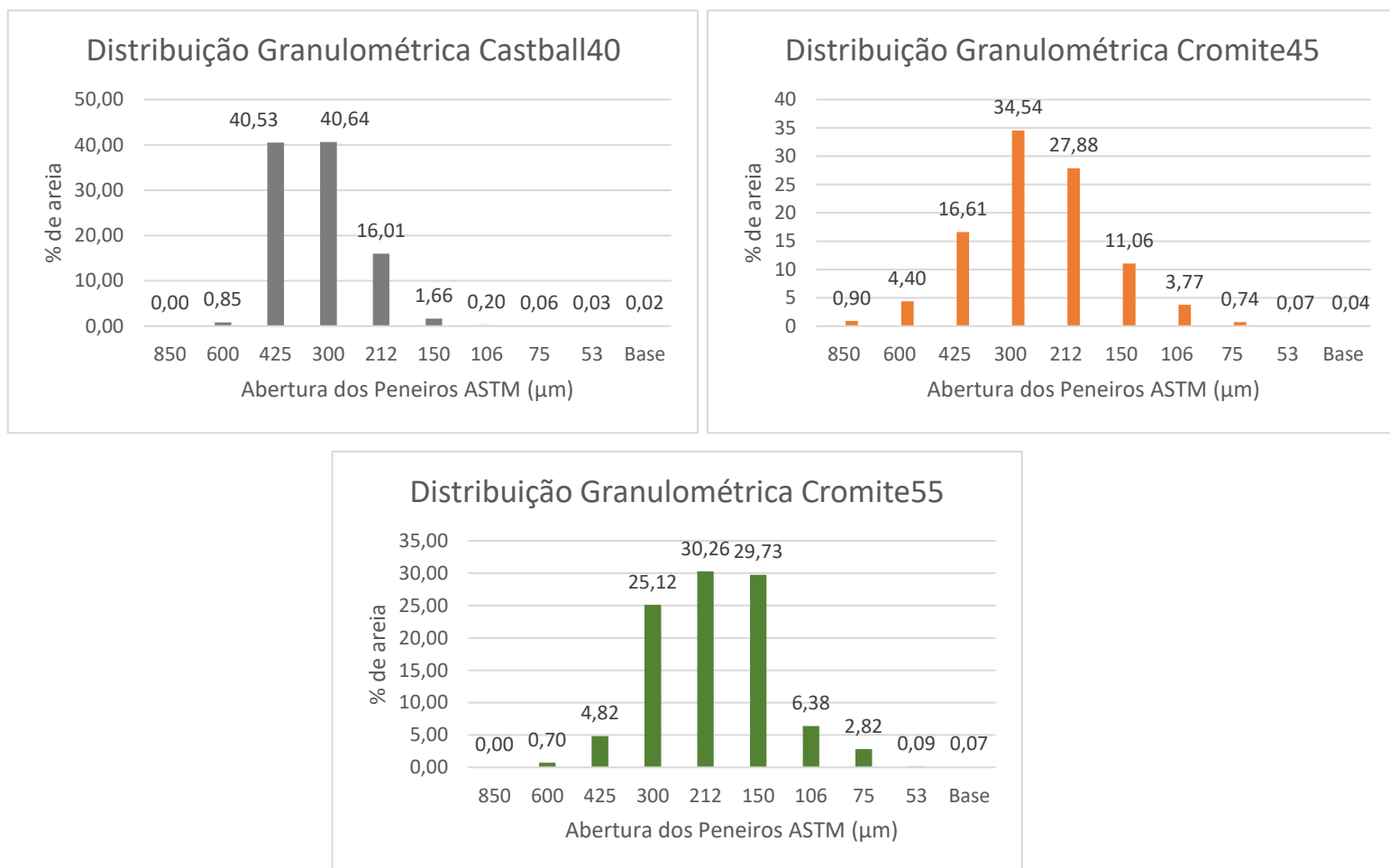


Figura 21 - Distribuição granulométricas das areias de Castball40, Cromite 45-50 e Cromite 55-60.

Na figura 22 são apresentadas as curvas granulométricas traçadas a partir dos resultados obtidos das distribuições granulométricas. Através das curvas granulométricas é possível calcular aproximadamente o tamanho de grão médio das amostras estudadas. Para isso é necessário traçar uma reta horizontal no eixo dos yy correspondente a 50% da massa cumulativa, ou seja, $y=50$. A interseção da reta $y=50$ com a curva granulométrica origina um ponto cuja coordenada no eixo xx corresponde ao tamanho de grão médio. Os pontos correspondentes ao tamanho médio de grão estão apresentados na figura 22 com as letras A, B, C e D. Analisando os valores dos tamanhos de grão determinados a partir das curvas granulométricas (presentes na tabela 5) é possível verificar que o aditivo com maior índice AFS, a areia de Cromite 55-60, apresentou simultaneamente o menor

tamanho de grão (240 μm). A areia de Cromite 45-50 demonstrou possuir um tamanho médio de grão de 430 μm , considerado intermédio comparativamente aos restantes aditivos estudados. A areia Castball40 apresentou o maior tamanho de grão (540 μm) e a areia de sílica, utilizada com material base na produção dos machos, apresentou um tamanho médio de grão de 300 μm , similar à areia de Cromite 55-60. Os resultados obtidos referentes ao tamanho médio de grão das amostras demonstraram que, logicamente, um índice de finura AFS inferior corresponde a um tamanho de grão médio superior.

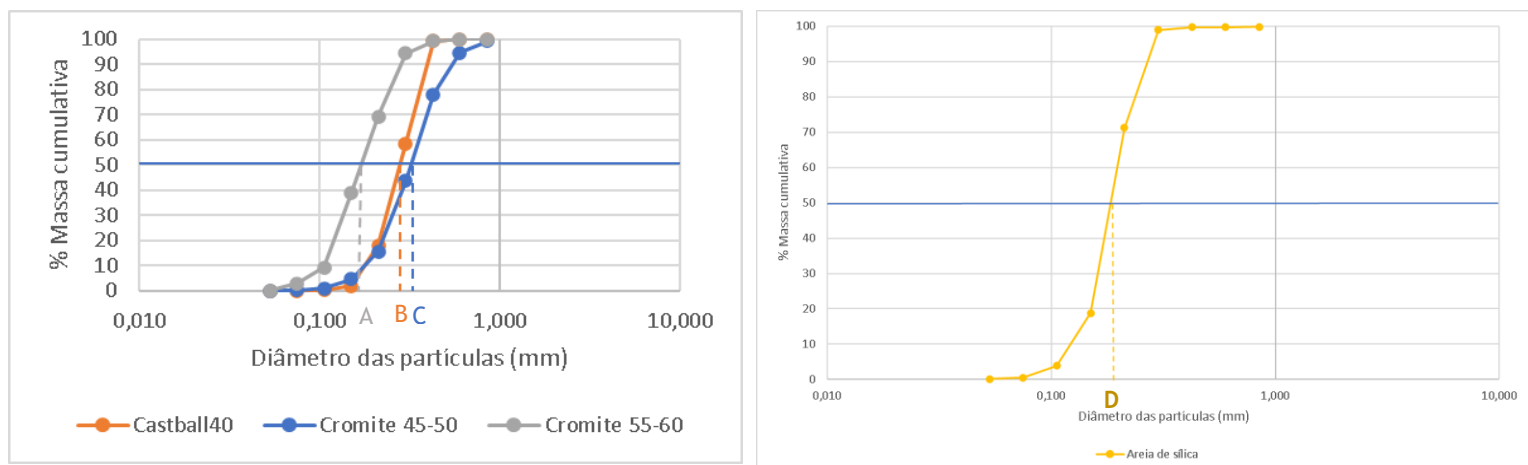


Figura 22 - Curvas granulométricas: à esquerda, dos aditivos estudados (Castball 40; Cromite 45; Cromite 55); à direita, da areia de sílica. A - Tamanho médio de grão Cromite 55-60; B- Tamanho médio de grão Castball40; C- Tamanho médio de grão Cromite 45-50; D- Tamanho médio de grão areia de sílica

Comparando a homogeneidade das distribuições das areias analisadas é possível verificar uma maior uniformidade na distribuição granulométrica da areia Castball, estando a maior parte da sua distribuição localizada nos peneiros com abertura de 425, 300 e 212 μm , totalizando uma percentagem de 97,18%. Apesar das semelhanças demonstradas pelas distribuições das areias de Cromite 45 e Cromite 55, é possível verificar que o número de peneiros que retiveram mais de 10% da areia, é de 3 crivos na Castball 40 e Cromite 55 e 4 crivos na Cromite 45. A areia de Cromite 45, apresentando o maior número de crivos que diferencia a fração fina da fração grosseira, apresenta a menor homogeneidade dos aditivos estudados. A questão da homogeneidade das misturas pode também ser validada pelo declive presente nas curvas granulométricas, ou seja, um maior declive (apresentado pela curva granulométrica da Castball40) corresponde a uma maior uniformidade da amostra.

Os valores dos ensaios de coeficiente de angularidade, revelaram que a areia de Castball 40 apresenta a morfologia mais esférica das areias observadas, que podem ser validados com a observação à lupa dos grãos, presente na figura 23. Obteve-se um valor de 1,21 de coeficiente de angularidade para a Castball40 que, segundo a literatura, corresponde a uma morfologia arredondada [28]. Os valores de 1,39 e 1,42 obtidos para as areias de Cromite 45-50 e Cromite 55-60, respetivamente, demonstram uma maior angularidade dos seus grãos. Os cálculos efetuados para obtenção do coeficiente de angularidade estão presentes no anexo C.

A figura 23 apresenta as imagens obtidas a partir da observação dos grãos dos aditivos à lupa. A comparação das imagens permite concluir que os grãos da areia Castball40 apresentam elevada esfericidade, enquanto que as areias de Cromite apresentam grãos mais angulares, validando assim os resultados obtidos nos ensaios de coeficiente de angularidade. Apesar de na literatura [28] ser considerado que um valor de 1,39 de coeficiente de angularidade corresponde a uma morfologia de grão arredondada, a observação dos grãos da areia de Cromite 45-50 demonstrou que estes possuem alguma natureza acicular e, portanto, considerou-se que a sua morfologia é angular.

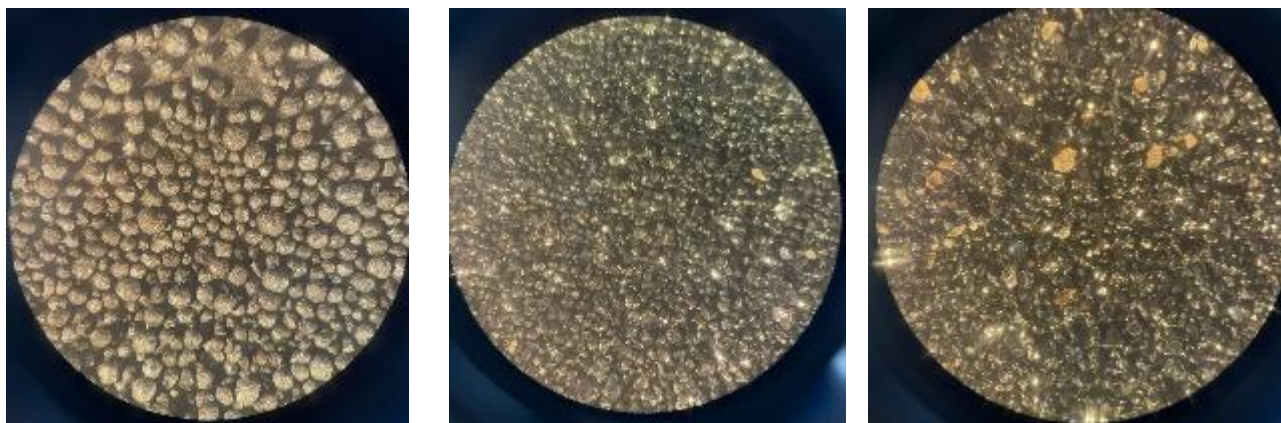


Figura 23- Observação dos grãos via lupa da areia de: (a) Castball 40 (b) Cromite 45-50 (c) Cromite 55-60.

Correlacionando os valores obtidos de coeficiente de angularidade (e respetiva morfologia validada por observação à lupa) com os índice AFS e tamanho médio de grão das amostras, é possível concluir que: tendo em conta que a areia de sílica possui um índice AFS de 52 e tamanho médio de grão de 300 μm , supõe-se que a adição de Castball40 resultará numa diminuição da capacidade de compactação comparativamente às areias de Cromite 45 e Cromite 55. Isto porque a morfologia esférica dos grãos de Castball, aliada a uma distribuição uniforme de dimensões dos mesmos, permitem a criação de uma quantidade superior de espaços intergranulares. Adicionalmente, as areias de Cromite 45 e Cromite 55 possuindo uma morfologia angular (segundo o coeficiente de angularidade semelhante à areia de sílica) e tamanho médio de grão mais próximo da areia de sílica, permitirão obter um grau de compactação superior.

4.1.2. Comparação da composição química das areias

Através das composições químicas facultadas pelos fornecedores, presentes na figura 24, é possível validar que as areias de Cromite 45-50 e 55-60 apresentam na sua composição elevadas quantidades de Cr_2O_3 e FeO . Segundo a literatura, um tamanho de grão inferior e presença de óxido de ferro permitem a obtenção de um bom acabamento superficial [38]. Por estas razões, analisando as composições químicas das areias, é expectável que as areias de Cromite 45-50 e Cromite 55-60, apresentando um grão mais fino e maiores quantidades de óxido de ferro, proporcionem um acabamento superficial superior à areia Castball 40. Adicionalmente, a presença de uma maior quantidade de SiO_2 na Castball, implica um aumento do coeficiente de expansão térmica devido à transformação da sílica a 573 $^{\circ}\text{C}$, que poderá ser prejudicial no seu desempenho.

Apesar da presença de uma quantidade de sílica superior na Castball 40 contribuir para um aumento de expansão térmica, também garante uma elevada refratariedade a este aditivo. Comparando a presença de materiais refratários entre os aditivos estudados, a Castball40 apresenta uma elevada quantidade de alumina como refratário principal, uma quantidade considerável de sílica e óxidos de cálcio, potássio e sódio. As areias de Cromite 45-50 e Cromite 55-60, apresentam óxido de crômio como constituinte principal e uma quantidade considerável de alumina e óxido de magnésio.

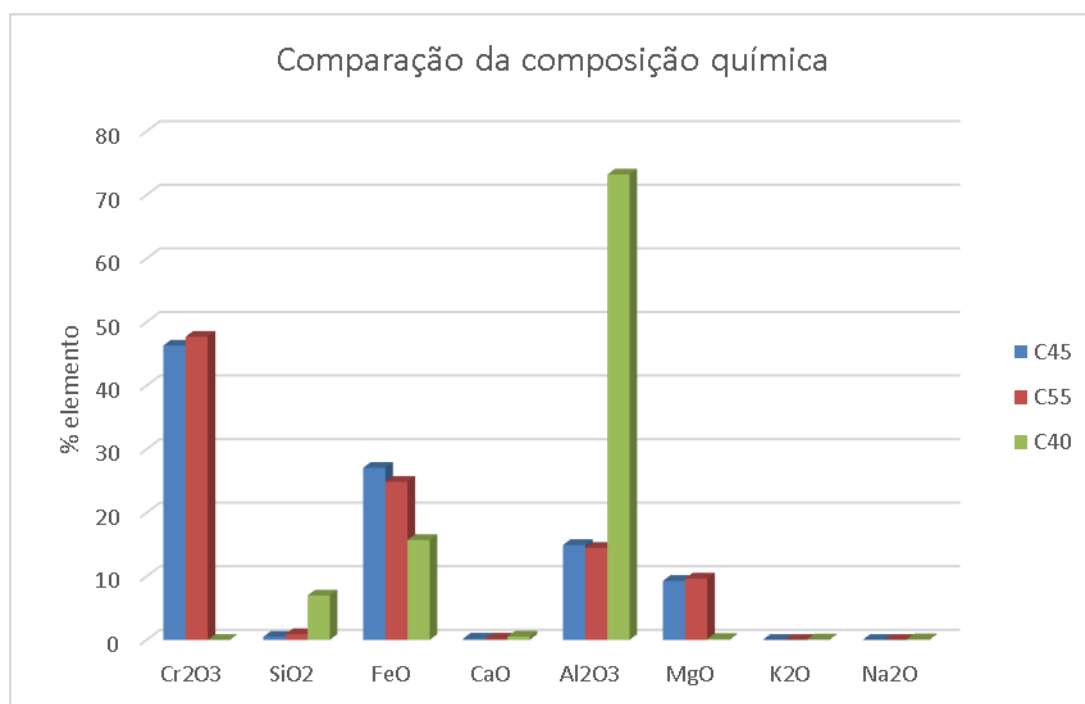


Figura 24 - Gráfico comparativo das composições químicas dos aditivos de areia estudados.

Conclui-se que as principais diferenças entre as areias relaciona-se com o seu constituinte principal, (sendo o Cr₂O₃ na Cromite 45-50 e Cromite 55-60 e a Al₂O₃ na Castball 40) e   presença de compostos cerâmicos como K₂O e Na₂O apenas na composição da Castball. Segundo a literatura a presença de materiais refratários como estes óxidos reduz a tendência de ocorrência de re   es entre as paredes do macho e o metal líquido, evitando assim a aderência de partículas de areia e defeitos provenientes da penetração de metal na camada superficial do macho [56].

4.1.3. Ensaio de permeabilidade

A avaliação da permeabilidade das misturas foi feita através do ensaio de 3 provetes referentes a cada mistura, presentes na figura 25. A média dos resultados obtidos nos 3 ensaios de cada mistura é apresentada na tabela 6.



Figura 25 - Provetes utilizados no ensaio de permeabilidade.

Tabela 6- Valores obtidos do ensaio de permeabilidade das misturas ensaiadas. Valor médio de permeabilidade da areia de moldação.

	Permeabilidade (cm ⁴ /g.min)
C40	290
C45	257
C55	250
Areia de moldação	150

As misturas C45 e C55 apresentaram valores de permeabilidade muito idênticos. Os resultados de permeabilidade das misturas demonstraram que a mistura C40 possui a melhor capacidade de escoamento dos gases da cavidade moldante. Comparando os valores obtidos com os valores médios de permeabilidade da areia de moldação (fornecidos pela empresa), é possível constatar que todas as misturas estudadas apresentaram uma permeabilidade bastante superior. Isto demonstra uma maior capacidade de escoamento dos gases da cavidade moldante por parte das misturas utilizadas no fabrico dos gases comparativamente à areia de moldação. Correlacionando os valores do ensaio de permeabilidade com os valores obtidos de tamanho médio de grão e índice AFS da areia de sílica e dos aditivos, podemos observar que o aditivo com o maior tamanho de grão, menor índice AFS e maior uniformidade de grãos, exibiu os valores mais elevados de permeabilidade. Adicionalmente, a morfologia esférica dos grãos do aditivo Castball40 contribui para uma redução na compactação dos grãos da mistura, permitindo a criação de uma maior quantidade de espaços intergranulares que permitiram a passagem de uma quantidade superior de gás.

Do mesmo modo os valores inferiores de permeabilidade obtidos pelas misturas C45 e C55 podem ser explicados através da literatura [57]: a morfologia angular dos grãos e um inferior tamanho médio de grão das areias de Cromite 45 e Cromite 55, permitam que, juntamente com a areia de sílica que também possui uma morfologia angular, haja um grau de compactação superior. À medida que o grau de compactação aumenta, um único grão contacta com um número crescente de grãos vizinhos. Consequentemente, os espaços entre os grãos e as áreas transversais abertas ao fluxo de gás diminuem, levando a uma menor permeabilidade.

Um estudo comparativo da areia Castball e Cromite demonstrou que, utilizando misturas com 53,8% de aditivo (Castball ou Cromite) e 46,2% de areia de sílica e fabrico de machos com o processo PUCB, a Castball apresentou um incremento de 256 % de permeabilidade na mistura [21]. Tendo em conta este estudo, existe concordância com os resultados obtidos, no entanto esperar-se-ia uma maior diferença na permeabilidade demonstrada pela mistura que utiliza Castball como aditivo.

4.2. Ensaio de resistência à flexão, tempo de bancada e perda ao fogo

Para a avaliação da resistência à flexão e tempo de bancada das misturas estudadas foram elaborados 16 provetes por mistura. A resistência à flexão foi avaliada a partir de 2 provetes elaborados imediatamente após a elaboração da mistura de areia, 30 minutos, 1 hora e 2 horas. Para a avaliação da resistência precoce à flexão, efetuou-se o ensaio mecânico a 1 dos 2 provetes elaborados por período de tempo, e para a avaliação da resistência tardia à flexão efetuou-se o ensaio mecânico ao provete adicional 24 horas após a sua elaboração. Os valores obtidos nos resultados de resistência à flexão são apresentados na figura 26.

As misturas apresentaram um comportamento muito semelhante no que toca ao aumento ou decréscimo de resistência à flexão com o tempo. Desde o momento inicial de preparação da mistura até às 2 horas após, ocorre um decréscimo da resistência à flexão

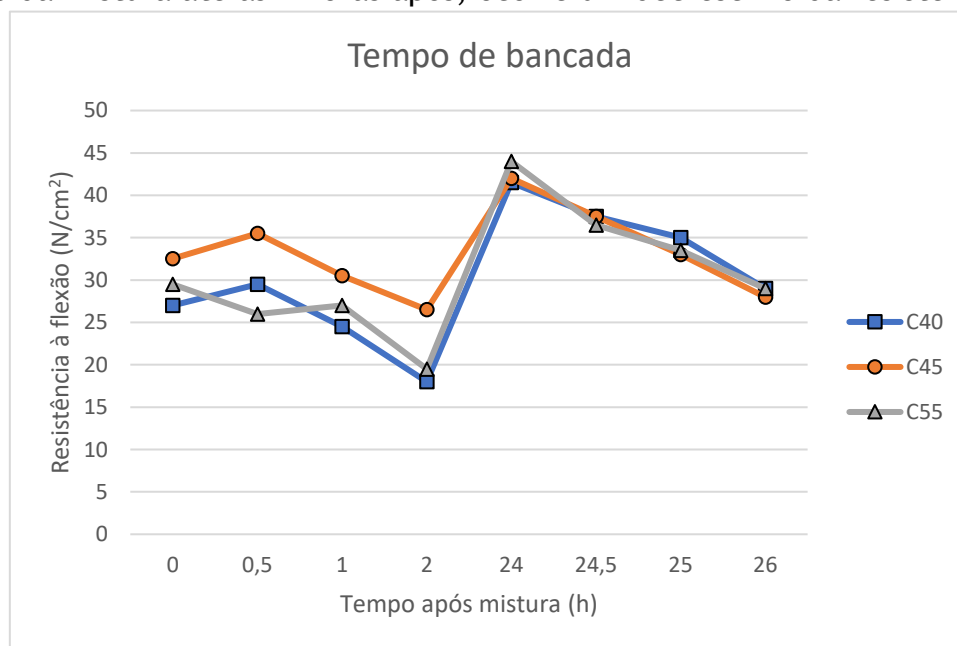


Figura 26- Valores obtidos dos ensaios de resistência à flexão das misturas ensaiadas.

em todas as misturas. O ponto mínimo de resistência à flexão em todas as misturas parece ser 2 horas após a preparação das misturas. Após 24 horas da preparação da mistura, as amostras atingem o seu pico de resistência à flexão, voltando a ocorrer um decréscimo da mesma até às 26 horas após preparação da mistura. Os resultados obtidos não vão de encontro com o que é apresentado na literatura [57], a resistência à flexão não aumentou linearmente com o aumento do tempo de armazenamento, verificando-se apenas um pico no seu valor nas 24 horas após preparação das misturas. No entanto, comparando com trabalhos realizados anteriormente na Funfrap [1], onde demonstraram um aumento da resistência à flexão os 30 minutos e 1 hora, e um pico de resistência à flexão 24 horas após, é possível inferir que existe alguma concordância entre os resultados. Isto porque, contrariamente aos estudos efetuados anteriormente, ocorreu um pequeno período de tempo entre a elaboração da mistura e a execução dos ensaios mecânicos e, por isso, o aumento da resistência à flexão das misturas C45 e C40 dá-se entre o momento de preparação e após 30 minutos.

Sumariamente, observa-se que 24 horas após o armazenamento dos provetes, verifica-se o valor mais elevado de resistência à flexão, começando a diminuir até às 26 horas. Não foram encontradas evidências na literatura que expliquem o aumento de resistência à flexão entre as 2 horas e as 24 horas, sendo que ocorre novamente um decréscimo das 24 às 26 horas. De forma a avaliar o sucedido seria necessária a elaboração de provetes em mais intervalos de tempo.

Comparando os valores obtidos para cada mistura, verifica-se que a mistura C45 apresentou os valores mais elevados de resistência precoce à flexão, apesar de haver grande proximidade com os valores das restantes misturas. A resistência tardia à flexão revelou valores muito semelhantes para todas as misturas. Adicionalmente todas as misturas apresentaram, após 24 horas da elaboração da mistura, valores de resistência à flexão coincidentes com o valor mínimo estabelecido pela empresa (30). Conclui-se que no procedimento habitual da empresa deve-se ter em conta que o manuseamento dos machos elaborados durante este período de tempo deve ser feito com mais cuidado de forma a evitar a sua deterioração e, de forma a otimizar o procedimento de produção e reduzir a tendência à formação de defeitos, deve utilizar-se os machos preferencialmente 24 horas após o seu fabrico.

Tabela 7 - Valores de perda ao fogo obtidos dos provetes ensaiados.

	0h	0,5h	1h	2h	Média
C40	1,37	1,29	1,27	1,27	1,30
C45	1,58	1,53	1,45	1,48	1,51
C55	1,60	1,54	1,50	1,69	1,58

Segundo a literatura [58], no ensaio de perda ao fogo é possível avaliar a perda de peso da amostra devido à volatilização de materiais orgânicos, remoção de água quimicamente ligada e dissociação de componentes inorgânicos sobre a forma de gás. Os resultados apresentados na tabela 7 correspondem essencialmente à resina e humidade perdidas pelas amostras. Tendo em conta que a percentagem utilizada nas misturas foi de

aproximadamente 1,57%, analisando os valores das misturas C40 e C45 é necessário ter em conta a oxidação de compostos da areia que fazem com que a amostra ganhe peso, e por isso os seus valores serão geralmente inferiores ao valor alvo. Com estes resultados é possível validar a percentagem de resina presente nas misturas.

4.3. Comparação do peso dos machos

Após o processo de fabricação dos machos, recorreu-se à pesagem de 10 machos (presentes na figura 27) correspondentes a cada mistura, apresentando-se os valores médios e desvios médios na tabela 8. A partir desta pesagem, pretendeu-se avaliar e validar a diferença de densidade dos aditivos utilizados, procurando-se correlacionar com a resistência à flexão obtida pelos mesmos.

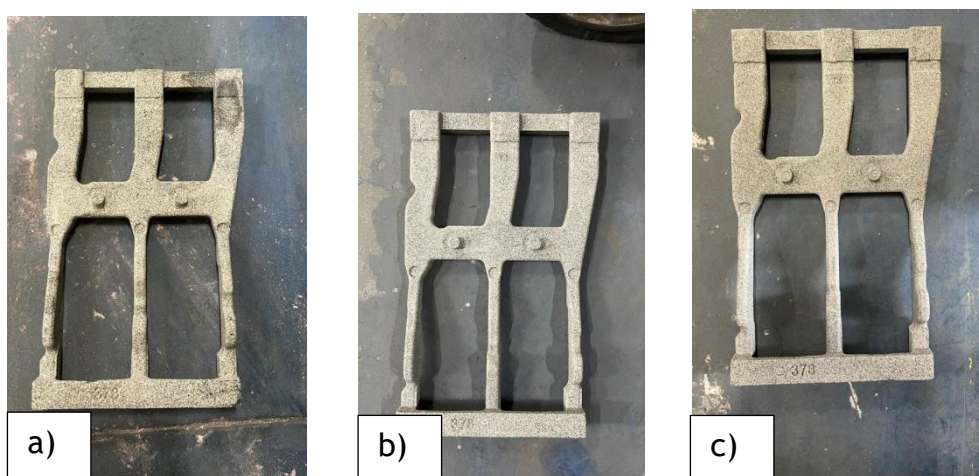


Figura 27- Machos obtidos a partir da mistura (a)C40, (b)C45 e (c)C55.

Os dados obtidos na tabela 8 revelaram que as misturas C55 e C45 possuem, em média, valores idênticos de massa, e a mistura C40 é um pouco mais leve que as restantes. Isto valida as pressuposições iniciais de um estudo efetuado às areias de Cromite e Castball, que indicavam que a areia Castball apresenta menor densidade compactada que as areias de Cromite [21]. Desta forma, comparando os valores de massa dos machos, é possível inferir que a mistura C40 apresenta a menor compactação das misturas. A areia de Castball40 apresenta um tamanho de grão superior que, aliado a uma morfologia de grão esférica, resulta numa redução na sua capacidade de compactação e permite a existência de um maior número de espaços entre os grãos. Comparando a média dos valores de massa obtidos para os machos das misturas C45 e C55, seria de esperar que a mistura C55, possuindo um aditivo com menor tamanho de grão, apresenta-se valores superiores de massa e, assim, maior compactação do macho. O preenchimento de todos os espaços entre os grãos é crucial para garantir uma boa resistência mecânica do macho e, por isso, é necessário ter em conta que tendo sido utilizada a mesma quantidade de resina em todas as misturas, este mesmo preenchimento poderá não ter sido alcançado de igual forma em todas as misturas.

Um estudo comparativo das areias de Castball e Cromite demonstrou que, a natureza acicular dos grãos de Cromite, permitiu que esta alcançasse valores menores de área superficial específica, necessitando assim de uma menor quantidade de ligante para

preencher e ligar todos os grãos. Pelo outro lado, a areia de Castball necessita de uma maior quantidade de ligante devido à sua maior superfície específica. Por estas razões é necessário ter em consideração que os valores de resina utilizados poderão não ter sido suficientes para preencher todos os espaços e, portanto, é possível a existência de uma maior quantidade de espaços vazios entre os grãos. No entanto, correlacionado com os valores obtidos nos ensaios de resistência à flexão, a mistura C40 revelou resultados de resistência à flexão idênticos às restantes misturas com a utilização de menos aditivo (em massa).

Sumariamente, a mistura C40 apresenta-se como sendo a mistura capaz de produzir machos mais leves, obtendo-se uma redução de peso de 4,2% comparativamente à mistura C45 que é utilizada habitualmente pela empresa no respetivo macho. Este fator é relevante tendo em conta a natureza do processo *All-in-Core*, onde se procura uma otimização do fabrico dos machos, através de uma redução de custos (reduzindo a quantidade, em massa, de aditivo a utilizar) sem comprometer a resistência mecânica dos mesmos.

Tabela 8- Massa (gramas), em média, dos machos fabricados com as misturas C40, C45 e C55.

	C40	C45	C55
Média (g)	1016,1	1061,2	1054,3
Desvio médio	2,6	4,1	1,8

4.4. Inspeção visual das peças vazadas

A inspeção visual das peças teve como principal objetivo a identificação e avaliação dos defeitos presentes na cavidade correspondente ao macho utilizado. A contabilização dos defeitos foi feita tendo em conta a presença, ou não, de qualquer tipo de defeito na cavidade uma vez que 1) a natureza idêntica dos principais defeitos ocorrentes faz com

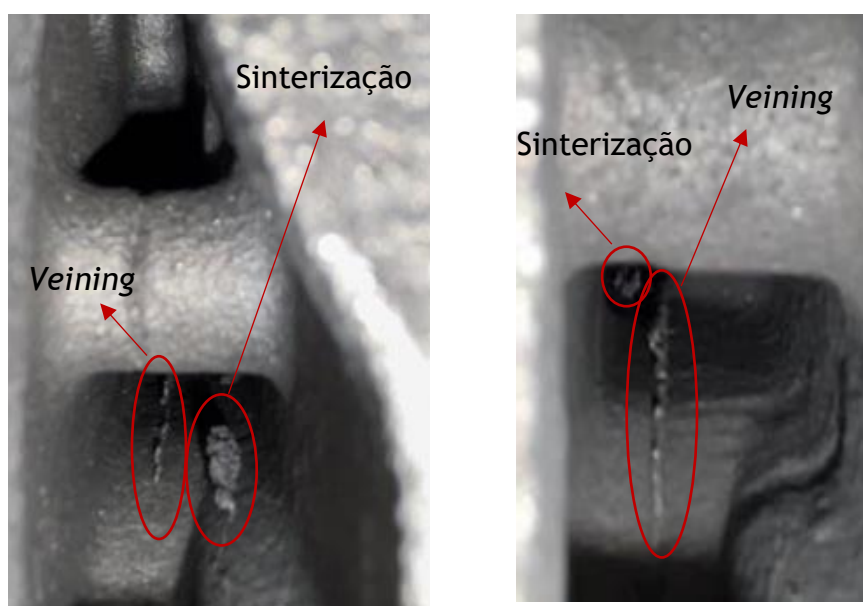


Figura 28- Interior da cavidade da peça obtida através de um macho fabricado pela mistura C45 à esquerda e mistura C55 à direita. Assinalado a vermelho indica-se a presença de defeitos de *veining* e sinterização.

que a sua distinção seja difícil sem recorrer ao corte das peças; 2) a grande exigência das cavidades complexas das peças em termos de qualidade superficial permite atribuir a mesma importância aos defeitos, uma vez que o que se pretende é a obtenção de uma cavidade isenta de qualquer defeito.

Durante a inspeção visual das peças, foram retiradas imagens representativas da generalidade dos defeitos encontrados, podendo ser observadas nas figuras 28 a 31 com a respetiva identificação, a vermelho, dos defeitos. A figura 28 e 29 correspondem ao interior das cavidades de uma peça realizada com um macho a partir da mistura C45 (à esquerda) e C55 (à direita).

Através da análise das imagens é possível efetuar uma comparação dos defeitos ocorrentes nas peças. A figura 28 pretende demonstrar o caso onde as peças obtidas por machos a partir das misturas C45 e C55 apresentavam defeitos de sinterização e também *veining*.

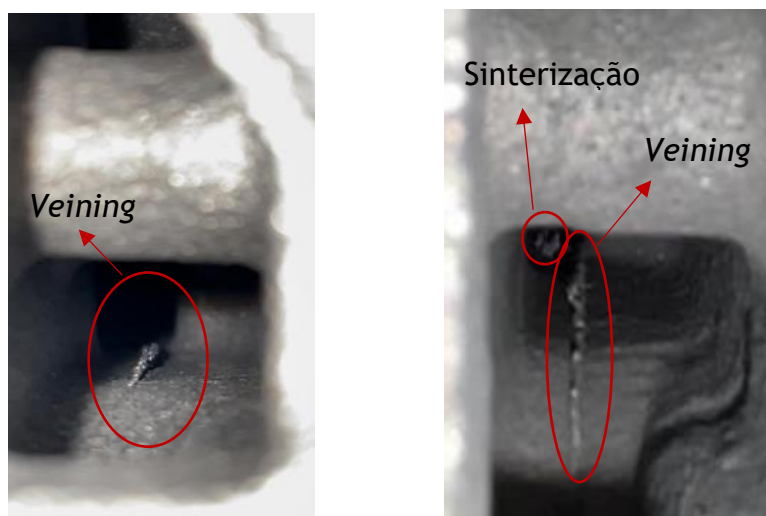


Figura 29- Interior da cavidade da peça obtida através de um macho fabricado pela mistura C45 à esquerda e mistura C55 à direita. Assinalado a vermelho indica-se a presença de defeito de *veining*.



Figura 30- Interior da cavidade da peça obtida através de um macho fabricado pela mistura C45 à esquerda e mistura C55 à direita. Assinalado a vermelho indica-se a presença de defeito de sinterização.

Na figura 29 é possível comparar a dimensão, em comprimento, do defeito de *veining* entre peças fabricadas com as misturas C45 e C55. A utilização de um aditivo com índice AFS e tamanho de grão inferiores promoveu a redução da dimensão do defeito de *veining*.

Na figura 30 observam-se dois defeitos de sinterização assinalados a vermelho, à esquerda corresponde ao interior da cavidade de uma peça onde se utilizou um macho fabricado com a mistura C45 e à direita com a mistura C55. Analogamente ao observado na figura 29, é possível observar uma diferença substancial na dimensão do defeito de sinterização. Tal como no defeito de *veining*, a redução do tamanho de grão demonstrou potenciar a diminuição da dimensão do defeito de sinterização nas cavidades.

Considera-se a redução da dimensão dos defeitos ocorrentes nas peças por parte da mistura C55 um resultado positivo, no entanto, a utilização de um aditivo mais fino necessita igualmente da etapa posterior de limpeza da cavidade, retirando assim os benefícios económicos da sua utilização.

Observa-se na figura 31 a cavidade de uma peça produzida através de um macho com a mistura C40, com um defeito de *veining*. De uma forma geral, os machos fabricados a partir da mistura C40 formaram cavidades que apresentaram alguns defeitos com dimensões de *veining* bastante semelhantes às apresentadas na figura 31.

Tabela 9- Percentagem de peças analisadas com defeito nas cavidades.

	Percentagem de peças com defeito na cavidade
C40	13 %
C45	50 %
C55	50 %

Na tabela 9 são apresentadas as percentagens de peças analisadas que revelaram a presença de defeitos de sinterização e/ou *veining* na cavidade estudada com os machos fabricados a partir das diferentes misturas. A partir da visualização do interior das cavidades foi possível observar, tanto na mistura C45 como na C55, a presença de defeitos de sinterização e/ou *veining* em 50% das peças, enquanto que na mistura C40 apenas se verificaram 13% de peças defeituosas.

Comparando as figuras 31 e 29 é possível verificar que a presença de *veining* nas peças da mistura C40 aparece em dimensões um pouco inferiores. Assumindo que a redução do tamanho do defeito é relacionada com a redução da tendência à formação do mesmo e correlacionando este facto com a obtenção de uma quantidade inferior de peças com defeito por parte da mistura C40, é possível inferir que a utilização desta mistura nos machos potenciou a redução da tendência à formação de sinterização e *veining*.

Tal como indicado na literatura, um dos fatores primordiais para a formação de *veining* é a presença de tensões internas no macho, que pode ser potenciada pela elevada

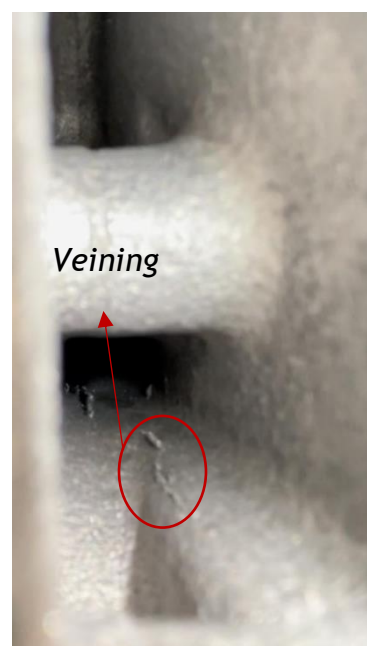


Figura 31- Interior da cavidade da peça obtida através de um macho fabricado pela mistura C40. Assinalado a vermelho indica-se a presença de defeito de *veining*.

compactação do mesmo. A utilização de um macho constituído por areia de sílica e um aditivo com índice AFS muito próximos ($I_{AFS,silica}=52$, $I_{AFS,Cromite\ 45}=45$, $I_{AFS,Cromite\ 55}=58$) e com uma morfologia de grão angular, promove uma maior compactação dos machos. O aumento da compactação dos machos gera tensões internas de ordem suficiente a potenciar a formação de *veining*. Adicionalmente, correlacionando a análise dos defeitos com os ensaios de permeabilidade, demonstrou-se que a mistura com valores superiores de permeabilidade apresentou uma quantidade inferior de defeitos.

5. Conclusões

A realização da dissertação em ambiente industrial revelou-se uma mais-valia uma vez que permitiu o primeiro contacto com a indústria de fundição. Adquiriram-se capacidades como uma elevada autonomia, *social skills* (contacto direto com operadores e engenheiros na empresa), agilidade e aptidão laboratorial em ensaios de caracterização de areia de moldação e macho.

O trabalho realizado permitiu concluir que:

- Através das curvas granulométricas presentes na figura 22, o aditivo utilizado com maior uniformidade de distribuição granulométrica foi a Castball40.
- As imagens obtidas por lupa, presentes na figura 23, permitiram concluir que os aditivos de cromite apresentam uma morfologia de grão angular, promovendo assim uma maior capacidade de compactação.
- Através da análise química aos aditivos utilizados, presente na figura 24, foi possível concluir que os aditivos de cromite apresentam principalmente óxido de crómio, óxido de ferro e óxido de magnésio como materiais refratários, enquanto que a Castball40 é composto por alumina (73%), óxido de ferro e uma quantidade considerável de sílica na sua composição.
- Através dos resultados dos ensaios de permeabilidade, presentes na tabela 6, foi possível concluir que a mistura C40, que utilizou o aditivo com maior tamanho de grão, menor índice AFS e maior uniformidade de grão, apresentou a maior facilidade no escoamento de gases. Supõe-se que a morfologia esférica dos grãos da Castball40 contribuíram para uma menor compactação da mistura e assim, a criação de maior quantidade de espaços intergranulares. Adicionalmente, as misturas com aditivos de cromite, C45 e C55, apresentaram resultados idênticos de permeabilidade. Deduz-se que a morfologia angular dos grãos e um inferior tamanho médio de grão das areias de Cromite 45 e Cromite 55, permitam que, juntamente com a areia de sílica que também possui uma morfologia angular, haja um grau de compactação superior e consequentemente redução na permeabilidade.
- Na figura 26 apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência à flexão realizados aos provetes compostos pelas misturas estudadas que permitiu concluir que o ponto mínimo de resistência à flexão em todas as misturas foi 2 horas após a preparação das misturas e que, 24 horas após o armazenamento dos provetes, verifica-se o valor mais elevado de resistência à flexão, começando a diminuir até às 26 horas. Todas as misturas apresentaram, após 24 horas da elaboração da mistura, valores de resistência à flexão coincidentes com o valor mínimo estabelecido pela empresa (30). Desta forma é possível concluir que no procedimento habitual da empresa deve-se ter em conta que o manuseamento dos machos elaborados durante este período de tempo deve ser feito com mais cuidado de forma a evitar a sua deterioração e, de forma a otimizar o procedimento de produção e reduzir a tendência à formação de defeitos, deve utilizar-se os machos preferencialmente 24 horas após o seu fabrico.
- Os valores da massa dos machos, apresentados na tabela 8, permitiram concluir que a utilização de Castball40 como aditivo permitiu a redução de 4,2% do peso dos machos, comparativamente à mistura habitualmente utilizada pela empresa. Este

facto permitiu corroborar a afirmação inicial relativamente ao menor grau de compactação obtido pela mistura C40.

- A observação das peças permitiu concluir que, tal como apresentado nas figuras 28 a 31, os principais defeitos ocorrentes nas peças foram sinterização e *veining*, podendo ocorrer simultaneamente (figura 28). A tabela 9, apresentando as percentagens de peças com defeitos, revelou que a mistura C40 apresentou um decréscimo substancial na quantidade de peças com sinterização e/ou *veining*. A análise dos defeitos ,apresentada na figura 28 e 29, permitiu concluir que, comparando os aditivos de cromite, a utilização de um aditivo com tamanho de grão inferior promoveu a redução da dimensão do defeito ocorrente.

Correlacionando todos os resultados obtidos, é possível concluir que a utilização de Castball40 como aditivo revelou os resultados mais promissores em termos de rentabilidade industrial. A sua capacidade de proporcionar a obtenção de machos com menor peso, maior permeabilidade e menor taxa de defeitos, sem perder a resistência à flexão mínima imposta pela empresa (após 24 horas do seu fabrico) torna a Castball um aditivo com elevado potencial. Os resultados indicaram que, tal como indicado num estudo pela empresa Curimbaba, um tamanho de grão superior (comparativamente aos restantes aditivos utilizados) permite a obtenção de uma maior permeabilidade, a custo de uma menor compactação (menores tensões internas), que resulta numa redução da tendência à formação de defeitos como *veining* e sinterização.

Concluindo, apesar da mistura C40 utilizar como aditivo a areia com tamanho de grão mais grosso e com preço ligeiramente superior, a sua utilização como leito principal é promissora uma vez que cumpre com os requisitos de resistência à flexão, possui maior permeabilidade e diminui a quantidade de defeitos ocorrentes nas cavidades, diminuindo consequentemente o tempo gasto pelos operadores na etapa de limpeza das peças e permitindo uma diminuição de custos ao processo.

6. Trabalhos futuros

A utilização de Castball40 como aditivo nas misturas de areia de macharia revelou-se promissora devido aos resultados obtidos, nomeadamente no decréscimo de ocorrência de defeitos. Por esta razão seria interessante efetuar um estudo quanto à influência da percentagem deste aditivo na mistura na tendência à formação de defeitos. Também seria relevante analisar e comparar os custos associados à utilização de cada aditivo, nomeadamente na etapa de limpeza dos defeitos, a fim de rentabilizar e otimizar o processo produtivo da empresa. Adicionalmente, e tendo em conta a natureza do processo de recuperação da areia efetuada na empresa, tirar-se-ia proveito de uma avaliação do impacto da utilização dos aditivos na recuperabilidade da areia.

7. Referências bibliográficas

1. J.Morgado, “Regeneração e reutilização de areias de macho em fundição”, Tese de Mestrado, UA, Aveiro, Portugal, 2019.
2. H.T. Angus, 1 - Constitution and structure of cast iron, H.T. Angus, Cast Iron: Physical and Engineering Properties (Second Edition), Butterworth-Heinemann, 1976, Pages 1-33.
3. John R. Brown, “Foseco Ferrous Foundryman's Handbook (Eleventh Edition)”, Butterworth-Heinemann, Pages 23-29, 2000.
4. Wang, Xin. “Thermal physical and mechanical properties of raw sands and sand cores for aluminum casting”, Tese de doutoramento, University of Leoben, 2014.
5. EPA. Summary of factors affecting compliance by ferrous foundries, vol. 1, EPA-340/1-80-020; 1981. pp. 34-49
6. F. Czerwinski, M. Mir & W. Kasprzak “Application of cores and binders in metalcasting”, International Journal of Cast Metals Research, 28:3, 129-139, 2015.
7. University of Babylon. “Molding Material” https://www.uobabylon.edu.iq/eprints/publication_1_1674_6172.pdf (acedido a 4 de julho de 2022).
8. Lyuty, R.V., Houri, I.M. ”Molding materials.” KPI them. Sikorsky, Kyiv, 2020.
9. 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. 94 1465-1470, 2015.
10. J. M. G. de C. Ferreira, Tecnologia de Fundição. Fundação Calouste Gulbeinken, 1999.
11. Svidró, J.T., Diószegi, A., Svidró, J. et al. “The effect of different binder levels on the heat absorption capacity of moulding mixtures made by the phenolic urethane cold-box process.” J Therm Anal Calorim 130, 1769-1777 ,2017.
12. J. M. R. S. Tavares. (2021). “Indicação dos Estados de Superfície” [Powerpoint slides] Available: <https://web.fe.up.pt/~tavares/ensino/CFAC-G/Downloads/Apontamentos/Estado%20de%20Superficies.pdf>
13. ASM metals handbook volume 15: castings. 4th edition. OH: ASM International, Metals Park. p. 212-21,1998.
14. Chemically bonded cores & molds. Schaumburg, IL: American Foundry Society; p. 107-12. 1987.
15. 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.
16. P. M. C. L. Vilhena, “Resinas de caixa-fria modificadas estruturalmente com propriedades técnicas e meio ambientais melhoradas - Sistema Biodiesel,” Tese de Mestrado, FEUP, UP, 2009.
17. Zhang H, Zhao H, Zheng K, Li X, Liu G, Wang Y. “Diminishing hazardous air pollutant emissions from pyrolysis of furan no-bake binders using methanesulfonic acid as the binder catalyst.” J Therm Anal Calorim.;116:373-81. 2014.

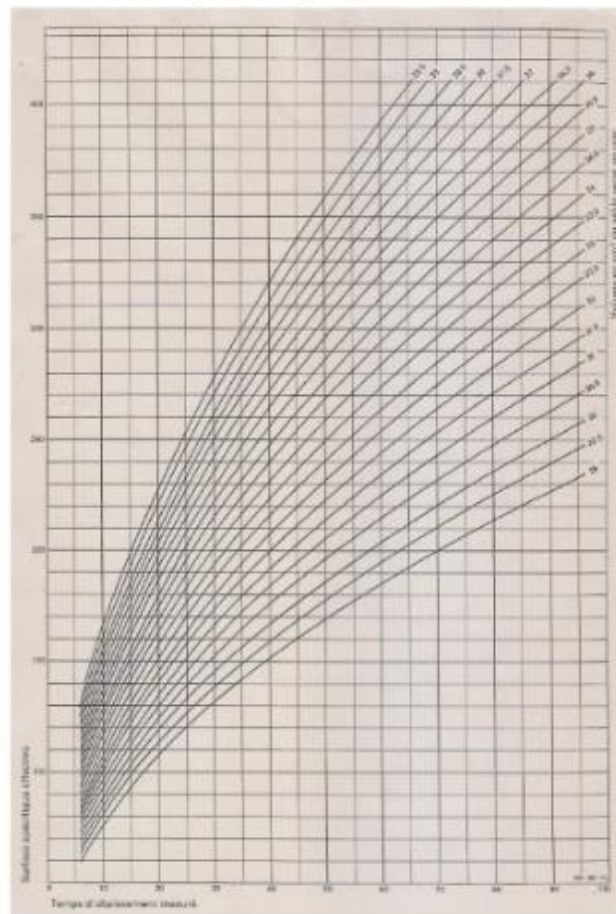
18. Tiedje N, Crepaz R, Eggert T, Bey N. "Emission of organic compounds from mould and core binders used for casting iron, aluminium and bronze in sand moulds." J Environ Sci Health Part A Tox Hazard Subst Environ Eng;45(14):1866-76. 2010.
19. Dobosz, St & Grabarczyk, Aleksandra & Major-Gabryś, K. & Jakubski, J. "Influence of Quartz Sand Quality on Bending Strength and Thermal Deformation of Moulding Sands with Synthetic Binders." Archives of Foundry Engineering. 15. 2015.
20. F. Peters, R. Voigt, S.Z. Ou, C. Beckermann, "Effect of mould expansion on pattern allowances in sand casting of steel." Int. J. Cast Met. Res. 2007.
21. E. Garel, W. Bonne, M.B. Collins, C. Pfeffer, "Offshore sand and gravel mining" , Encyc. Ocean Sci. 2019.
22. John R. Brown, "Foseco Ferrous Foundryman's Handbook (Eleventh Edition)", Butterworth-Heinemann, Pages 146-166, 2000.
23. A. Lopes e R. Silva, "Documentos teóricos da disciplina Tecnologia Metalúrgica." Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica, Universidade de Aveiro, 2017.
24. W. D. Callister, Materials Science and Engineering, vol. 344, no. 11. 2001.
25. J. Beňo, P. Jelínek, N. Špirutová. "Moulding Mixtures [E-Learning PDF]. Available: <https://silo.tips/download/vb-technical-university-of-ostava-faculty-of-metallurgy-and-materials-engineeri>.
26. P. Beeley, Foundry Technology. Butterworth-Heinemann, 2001.
27. A. Turkeli. "Sand, Sand additives, sand properties, and sand reclamation" [Powerpoint slides]. Available: https://mimoza.marmara.edu.tr/~altan.turkeli/files/cpt-2-sand_sand.pdf
28. R. J. M. de S. Rocha, "Fundição por baixa pressão em areia de ligas de alumínio," Tese de Mestrado, FEUP, UP, 2015.
29. Peter Beeley, "4 - The moulding material: Properties, preparation and testing" ,Peter Beeley,Foundry Technology (Second Edition),Butterworth-Heinemann, Pages 178-238, 2001.
30. African Pegmatite. 2022. Key Properties Of Refractory Materials: Understanding Thermal Conductivity, Compressive Strength And Porosity | African Pegmatite. [online] Available at: <https://mineralmilling.com/key-properties-of-refractory-materials/> [Accessed 4 July 2022].
31. C. Hagart-Alexander, "Chapter 21 - Temperature Measurement", Walt Boyes, Instrumentation Reference Book (Fourth Edition), Butterworth-Heinemann, Pages 269-326, 2010.
32. J. Campbell, Complete Casting Handbook, first ed., Elsevier Ltd., 2011.
33. Berlizeva, T., Ponomarenko, O., Yevtushenko, N., Grimzin, I., Lysenko, T. (2022). "Control of the Strength Properties of Mixtures Based on Chromite Sand." In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) Advanced Manufacturing Processes III. InterPartner 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham.
34. LKAB Minerals. 2022. MinSand. [online] Available at: <https://www.lkabminerals.com/en/products/minsand/> [Accessed 4 July 2022].

35. Curimbaba.com.br. 2022. [online] Available at: <https://www.curimbaba.com.br/admin/media/uploads/publicacoesInformativosTecnicos/castball-casting.pdf> [Accessed 4 July 2022].
36. Showman, R. and Scheller, E., 2022. Comparing Sand Additives in Steel Castings | Modern Casting. [online] Moderncasting.com. Available at: <https://www.moderncasting.com/articles/2015/12/15/comparing-sand-additives-steel-castings> [Accessed 4 July 2022].
37. Lannutti, John J, and Mobley, Carroll E. Improvements in Sand Mold/Core Technology: Effects on Casting Finish. United States: N. p., 2005.
38. L.C.R. Carpinetti, E.V.G.Filho, A.J.V. Porto, R.G. Jasinevicius. (2020). "Rugosidade Superficial. Conceitos e princípios de medição" [Apontamentos PDF]. Available: <http://repositorio.eesc.usp.br/bitstream/handle/RIEESC/7522/Rugosidade%20superficial.pdf?sequence=1>
39. Jezierski, Jan, Michał Jureczko, and Rafał Dojka. "The Impact of process factors on creating defects, mainly lustrous carbon, during the production of ductile iron using the lost-foam casting (LFC) method." *Metals* 10.8 (2020): 1022.
40. Boldin, A.N, Davydov, N.I, Zhukovsky, S.S.: Foundry molding materials. Molding, core mixtures and coatings. Directory. Mechanical engineering (2006).
41. Lysenko, T.V., Yasyukov, V.V., Prokopovich, I.V.: "Casting shaping control concept. Ecology", Odessa (2019).
42. N.Z.Khan, & Khan, Dr. Afzal & Shakoor, Dr. Abdul & Azam, Khizar. Manufacturing "Defects Of Brass Products And Suggested Remedies." *International Journal of Innovative Science Engineering and Technology (IJSET)*. 2. 497-514. (2015).
43. Giessereilexikon.com. 2022. Veining. [online] Available at: <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/veining-3663/?cHash=4182d478304b2c22d6c7d9ddaa09028c> [Accessed 4 July 2022].
44. Foundrygate.com. 2022. Burnt-on Sand. [online] Available at: <https://foundrygate.com/upload/artigos/Burnt-on%20sand.pdf> [Accessed 4 July 2022].
45. Giessereilexikon.com. 2022. Burnt-on sand. [online] Available at: <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/burnt-on-sand-3621/?cHash=550f91f0b372f5c0fa7505ada5fd8791> [Accessed 4 July 2022].
46. Foundrymag.com. 2022. Strategies for Combating Burn-In and Burn-On. [online] Available at: <https://www.foundrymag.com/ask-the-expert/article/21931849/strategies-for-combating-burnin-and-burnon> [Accessed 4 July 2022].
47. Giessereilexikon.com. 2022. Sand Inclusions. [online] Available at: <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/sand-inclusion-4008/?cHash=a94627b247bca7a839d1acbf49266fce> [Accessed 4 July 2022].

48. J. G. K. Rajesh Rajkolhe, "Defects, Causes and Their Remedies in Casting Process - A Review," International Journal of Research in Advent Technology, vol. 2, pp. 375-379, 2014.
49. R. Mendes, " Método de Ensaio - Determinação de granulometria/índice de finura AFS", Aveiro, 1996.
50. R. Mendes, " Método de Ensaio - Determinação do coeficiente de angularidade", Aveiro, 1996.
51. R. Mendes, " Método de Ensaio - Determinação da humidade na balança Mettler", Aveiro, 1999.
52. R. Mendes, " Método de Ensaio - Determinação da resistência à flexão", Aveiro, 1996.
53. R. Mendes, " Método de Ensaio - Determinação das perdas ao fogo", Aveiro, 1996.
54. R. Mendes, " Método de Ensaio - Determinação da permeabilidade", Aveiro, 1996.
55. Andrić, Ljubiša & Stojanović, Jovica & Terzić, Anja & Beograd, Ami & Belgrade, & Serbia,. (2012). Zircon-based coating for the applications in lost foam casting process. Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly. 18. 587-593.
56. Nolen-Hoeksema, R., 2022. Defining permeability. [online] Oilfield Review. Available at: <https://www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/define-perm-english> [Accessed 4 July 2022].
57. G. Gyarmati, I. Budavári, G. Fegyverneki, L. Varga, "The effect of sand quality on the bending strength and thermal distortion of chemically bonded sand cores" , Heliyon, Volume 7, Issue 7, 2021.

8. Anexos

A- Gráfico utilizado para a determinação da superfície específica real



B- Cálculo dos índices AFS dos aditivos e areia de sílica

1) Castball40

Tamanho peneiros ASTM	Massa retida (%) [A]	Fator multiplicativo [B]	Produto [A]x[B]
850	0,00	10	0,00
600	0,85	20	17,00
425	40,53	30	1215,90
300	40,64	40	1625,60
212	16,01	50	800,50
150	1,66	70	116,20
106	0,20	100	20,00
75	0,06	140	8,40
53	0,03	200	6,00
Base	0,02	300	6,00
Somatório	100		3815,60

$$\text{Índice AFS} = \frac{\sum \text{Produto } [A] \times [B]}{\sum \% \text{Massa retida}} = \frac{3815,60}{100} \sim 38,2$$

2) Cromite 45-50

Tamanho peneiros ASTM	Massa retida (%) [A]	Fator multiplicativo [B]	Produto [A]x[B]
850	0,90	10	9,00
600	4,40	20	88,00
425	16,61	30	498,30
300	34,54	40	1381,60
212	27,88	50	1394,00
150	11,06	70	774,20
106	3,77	100	377,00
75	0,74	140	102,90
53	0,07	200	14,00
Base	0,04	300	10,50
Somatório	100		4649,50

$$\text{Índice AFS} = \frac{\sum \text{Produto [A]X[B]}}{\sum \% \text{Massa retida}} = \frac{4649,50}{100} \sim 46,5$$

3) Cromite 55-60

Tamanho peneiros ASTM	Massa retida (%) [A]	Fator multiplicativo [B]	Produto [A]x[B]
850	0,00	10	0,00
600	0,70	20	14,00
425	4,82	30	144,60
300	25,12	40	1004,80
212	30,26	50	1513,00
150	29,73	70	2081,10
106	6,38	100	638,00
75	2,82	140	394,80
53	0,09	200	18,00
Base	0,07	300	21,00
Somatório	99,99		5829,30

$$\text{Índice AFS} = \frac{\sum \text{Produto [A]X[B]}}{\sum \% \text{Massa retida}} = \frac{5829,30}{99,99} \sim 58,2$$

4) Areia de sílica

Tamanho peneiros ASTM	Massa retida (%) [A]	Fator multiplicativo [B]	Produto [A]x[B]
850	0,00	10	0,00
600	0,00	20	0,00
425	0,74	30	22,20
300	27,78	40	1111,20
212	52,46	50	2623,00
150	14,91	70	1043,70
106	3,37	100	337,00
75	0,37	140	51,80

53	0,13	200	26,00
Base	0,08	300	24,00
Somatório	99,84		5238,90

$$\text{Índice AFS} = \frac{\sum \text{Produto } [A] \times [B]}{\sum \% \text{Massa retida}} = \frac{5238,90}{99,84} \sim 52,5$$

C- Cálculo do coeficiente de angularidade dos aditivos

1) Castball 40

C40	Massa amostra = 90,12 g		Produto [A]x[B]
Tamanho peneiros ASTM	Massa retida (%) [A]	Coeficiente multiplicativo [B]	
850	0	17,94	0
600	0,85	31,61	26,8685
425	40,53	44,75	1813,7175
300	40,64	63,04	2561,9456
212	16,01	89,15	1427,2915
150	1,66	125,91	209,0106
106	0,2	177,95	35,59
75	0,06	252,51	15,1506
53	0,03	355,91	10,6773
Base	0,02	619,18	12,3836
Somatório	100		6112,6352

$$\text{Superfície específica teórica} = \frac{\sum \text{Produto}[A] \times [B]}{\text{Peso da amostra}}$$

$$\text{Superfície específica teórica Castball 40} = \frac{6112,6352}{90,12} \sim 67,83$$

Através da utilização do gráfico presente no anexo A, e traçando a interseção entre $y=14,5$ (correspondente ao tempo obtido no ensaio de coeficiente de angularidade) e a linha 29, obtém-se que a superfície específica real é aproximadamente 82.

Utilizando a fórmula do coeficiente de angularidade:

$$\text{Coeficiente de angularidade} = \text{Sup. Esp. Real} / \text{Sup. Esp. Teórica}$$

$$C.A = \frac{82}{67,83} \sim 1,21$$

2) Cromite 45

C45	Massa amostra = 85,88 g		Produto [A]x[B]
Tamanho peneiros ASTM	Massa retida (%) [A]	Coeficiente multiplicativo [B]	
850	0,9	17,94	16,146
600	4,4	31,61	139,084
425	16,61	44,75	743,2975
300	34,54	63,04	2177,4016
212	27,88	89,15	2485,502
150	11,06	125,91	1392,5646
106	3,77	177,95	670,8715
75	0,74	252,51	186,8574
53	0,07	355,91	24,9137
Base	0,04	619,18	24,7672
Somatório	100		7861,4055

$$\text{Superfície específica teórica} = \frac{\sum \text{Produto}[A] \times [B]}{\text{Peso da amostra}}$$

$$\text{Superfície específica teórica Cromite 45} - 50 = \frac{7861,4055}{85,88} \sim 91,54$$

Através da utilização do gráfico presente no anexo A, e traçando a interseção entre $y=27,5$ (correspondente ao tempo obtido no ensaio de coeficiente de angularidade) e a linha 29, obtém-se que a superfície específica real é aproximadamente 127.

Utilizando a fórmula do coeficiente de angularidade:

$$\text{Coeficiente de angularidade} = \text{Sup. Esp. Real} / \text{Sup. Esp. Teórica}$$

$$C. A = \frac{127}{91,54} \sim 1,39$$

3) Cromite 55-60

C55	Massa amostra = 105 g		Produto [A]x[B]
Tamanho peneiros ASTM	Massa retida (%) [A]	Coeficiente multiplicativo [B]	
850	0	17,94	0
600	0,7	31,61	22,127
425	4,82	44,75	215,695
300	25,12	63,04	1583,5648
212	30,26	89,15	2697,679
150	29,73	125,91	3743,3043
106	6,38	177,95	1135,321
75	2,82	252,51	712,0782
53	0,09	355,91	32,0319

Base	0,07	619,18	43,3426
Somatório	99,99		10185,1438

$$\text{Superfície específica teórica} = \frac{\sum \text{Produto}[A]X[B]}{\text{Peso da amostra}}$$

$$\text{Superfície específica teórica Cromite 55 – 60} = \frac{10185,1438}{105} \sim 97,00$$

Através da utilização do gráfico presente no anexo A, e traçando a interseção entre $y=34,3$ (correspondente ao tempo obtido no ensaio de coeficiente de angularidade) e a linha 29, obtém que a superfície específica real é aproximadamente 138.

Utilizando a fórmula do coeficiente de angularidade:

$$\text{Coeficiente de angularidade} = \text{Sup. Esp. Real} / \text{Sup. Esp. Teórica}$$

$$C.A = \frac{138}{97} \sim 1,42$$

4) Areia de sílica

Areia de sílica	Massa amostra = 99,84 g		Produto [A]x[B]
Tamanho peneiros ASTM	Massa retida (%) [A]	Coeficiente multiplicativo [B]	
850	0	17,94	0
600	0	31,61	0
425	0,74	44,75	33,115
300	27,78	63,04	1751,2512
212	52,46	89,15	4676,809
150	14,91	125,91	1877,3181
106	3,37	177,95	599,6915
75	0,37	252,51	93,4287
53	0,13	355,91	46,2683
Base	0,08	619,18	49,5344
Somatório	99,84		9127,4162

$$\text{Superfície específica teórica} = \frac{\sum \text{Produto}[A]X[B]}{\text{Peso da amostra}}$$

$$\text{Superfície específica teórica areia de sílica} = \frac{9127,4162}{99,84} \sim 91,42$$

Através da utilização do gráfico presente no anexo A, e traçando a interseção entre $y=28,2$ (correspondente ao tempo obtido no ensaio de coeficiente de angularidade) e a linha 29, obtém que a superfície específica real é aproximadamente 129.

Utilizando a fórmula do coeficiente de angularidade:

Coeficiente de angularidade = Sup.Esp.Real/Sup.Esp.Teórica

$$C.A = \frac{129}{91,42} \sim 1,41$$