



M 2017

Aumento da Eficiência do Processo de Fabrico da Culassa

Sérgio Miguel Ferreira de Sá

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Orientador: Prof. Doutor Carlos Alberto Silva Ribeiro
Orientador na Empresa: Eng. Rui Santos

Porto, julho de 2017

<i>CANDIDATO</i>	Sérgio Miguel Ferreira de Sá			<i>Código</i>	201207158
<i>TÍTULO</i>	Aumento da Eficiência do Processo de Fabrico da Culassa				
<i>DATA</i>	18 de julho de 2017				
<i>LOCAL</i>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala F106 - 14:30h				
<i>JÚRI</i>	<i>Presidente</i>	Professora Doutora Laura Maria Melo Ribeiro			DEMM/FEUP
	<i>Arguente</i>	Doutor Vítor Emanuel Azevedo dos Anjos			CITNM
	<i>Orientador</i>	Professor Doutor Carlos Alberto da Silva Ribeiro			DEMM/FEUP

Agradecimentos

Primeiro gostava de agradecer a orientação e acompanhamento do meu orientador, Prof. Silva Ribeiro, que proporcionou a oportunidade de realizar a minha dissertação na Funfrap. Na Funfrap gostava de agradecer a orientação e disponibilidade do Rui Santos, do João Matos e do Rui Reis.

Gostava de agradecer a toda a equipa da Funfrap que me ajudou sempre que pedi ajuda, para a realização da minha dissertação, como também quaisquer dúvidas que tivesse. Gostava de agradecer à equipa dos métodos por todo o apoio, aprendizagem e simpatia, entre eles o Sr. Lima, o Sr. Mortágua, o Sr. Ratola, o Sr. Saraiva, o João Castro, o Paulo Silva e o Bruno Branco. À equipa de qualidade, entre eles o Paulo Nunes, o Rui Mendes e o Sr. José António, gostava de agradecer todo o apoio prestado.

A todos os meus amigos, por me acompanharem durante o meu percurso académico, quero agradecer todo o apoio e paciência.

Por último, mas não menos importante, quero agradecer aos meus pais todo o seu apoio e sacrifícios, pois sem eles nada disto teria sido possível.

A todos, quero deixar um grande obrigado.

Resumo

A Funfrap fabrica vários componentes para a indústria automóvel, e dentro desses encontra-se a culassa, que é fabricada com o método *All-In-Core*, fazendo uso de nove machos, dentro dos quais solidifica o componente.

Este trabalho pretendeu, dentro do processo de fabrico da culassa, determinar as causas de certos defeitos, atuando sobre estes e, paralelamente, tornar o processo mais eficiente. Os defeitos mais pertinentes foram os de bolhas e os de macho partido.

O modo de atuar envolveu, a eliminação de uma operação, a nível da conceção dos machos, a substituição de um aditivo da areia de machos, e a eliminação de três operações, a nível dos acabamentos do componente. Os ensaios efetuados cingiram-se à variação da quantidade do novo aditivo (areia de bauxite) na mistura de areia de macho, e da realização ou não das operações mencionadas.

Dos resultados obtidos determinou-se que a quantidade de areia de bauxite que permite obter uma melhoria considerável no processo, sem aumentar os custos, é 50 % de bauxite na mistura de areia de macho. Este parâmetro associado à eliminação das operações dos acabamentos, permite aumentar a eficácia do processo, reduzindo às peças sucata, e reduzir os custos, contribuindo, de um modo geral, para o aumento da eficiência do processo.

Palavras-Chave: Machos, Revestimentos Refratários, Areia de Bauxite, Defeitos de Fundição

Abstract

Funfrap manufactures various components for the automotive industry, and among them is the cylinder head, which is manufactured through the *All-In-Core* process, making use of nine cores, completely encasing the solidifying component.

The aim of this work was to determine the causes of certain defects, acting on them and, in parallel, making the process more efficient. The most pertinent defects were those of blowholes and broken core.

The way of acting involved changes at the level of core making, the substitution of a core sand additive, and the elimination of three operations, in terms of component machining. The carried-out tests were based on the amount of the new additive (bauxite sand) in the core sand mixture, and the execution or not of the aforementioned machining operations.

From the results obtained it was determined that the amount of bauxite sand which allows a considerable improvement in the process, without increasing costs, is 50 % of bauxite in the core sand mixture. This parameter pared with the elimination of the machining operations, results in the increase of the process's effectiveness, reducing scrapped parts and costs, broadly contributing, to the increase of the process's efficiency.

Índice

Agradecimentos	ii
Resumo.....	iii
Abstract.....	iv
Índice.....	v
Índice de Figuras.....	vii
1. Introdução.....	1
1.1. Objetivo.....	2
2. Empresa e Processo	2
2.1. Funfrap	2
2.2. Culassa	3
2.3. <i>All-In-Core</i>	4
2.3.1. Conjunto de Machos	5
2.4. Processo	6
2.4.1. Areias.....	6
2.4.2. Macharia	8
2.4.3. Moldação.....	9
2.4.4. Acabamentos.....	11
2.5. Caracterização do Problema	12
3. Estado de Arte	14
3.1. Aditivos	14
3.1.1. Areia de cromite	15
3.1.2. Areia de Bauxite	16
3.1.3. Comparação entre Aditivos	17
3.2. Machos	18
3.2.1. Fabrico de Machos	19
3.2.1.1. Processo <i>Shell</i>	19
3.2.1.2. Processo <i>Hot Box</i>	19
3.2.1.3. Processo <i>Cold Box</i>	20
3.3. Revestimentos	22
3.3.1. Efeitos físicos	22
3.3.2. Efeitos químicos.....	22
3.3.3. Defeitos carboníferos	23
3.3.4. Componentes da Tinta	23
3.3.4.1. Refratário.....	23

3.3.4.2.	Solvente.....	24
3.3.4.3.	Ligante	24
3.3.4.4.	Agente de Dispersão	25
3.3.5.	Métodos de Aplicação de Revestimentos	25
3.3.5.1.	Imersão.....	25
3.3.5.2.	Escovagem.....	26
3.3.5.3.	Pincelagem	26
3.3.5.4.	Projeção	27
3.3.5.5.	Transbordagem	27
3.3.6.	Vantagens e Desvantagens	28
3.3.7.	<i>Rheotec</i>	29
3.3.8.	<i>Isokote</i>	29
3.3.9.	<i>Hydro Cover</i>	30
3.4.	Defeitos	30
3.4.1.	Bolhas	30
3.4.2.	Macho Partido.....	33
3.4.3.	Inclusões metálicas	34
3.4.4.	Sinterizações.....	36
3.4.5.	Inclusões de Areia.....	38
4.	Metodologia Experimental	39
4.1.	Planificação	41
4.2.	Análise de Defeitos	43
5.	Apresentação de Resultados	44
5.1.	Inspeção visual	44
5.1.1.	Ensaio 0	45
5.1.2.	Ensaio 1	46
5.1.3.	Ensaio 2	47
5.1.4.	Ensaio 3	48
5.2.	Análise de Sucata	49
6.	Discussão de Resultados	50
6.1.	Ensaio 0	50
6.2.	Ensaio 1	51
6.3.	Ensaio 2	51
6.4.	Ensaio 3	52
7.	Conclusões	53

8. Sugestões para Trabalhos Futuros	54
9. Referências Bibliográficas	54

Índice de Figuras

Figura 1 - Várias vistas, em 3º Diedro, de um culassa acaba, contendo a vista frontal (centro), a vista de topo (acima) e a vista lateral (à direita).	4
Figura 2 - Representação de parte do conjunto de machos, mostrando os machos base (A), camisa inferiores (B) e camisa superior (C).	5
Figura 3 - Esquema da etapa de preparação da areia dos machos.	6
Figura 4 - Esquema da etapa de pintura e montagem do conjunto de machos.	8
Figura 5 - Esquema das etapas de Moldação e Fusão do processo de fabricação da culassa.	9
Figura 6 - Esquema da etapa de Acabamentos do processo de fabricação da culassa.	11
Figura 7 - Defeito de bolha, assinalado com um círculo vermelho, na superfície de topo da culassa.	13
Figura 8 - Comparação visual entre grãos de areia de cromite (esquerda) e de bauxite (direita).	18
Figura 9 - Defeito de bolha no interior de uma culassa.	31
Figura 10 - Defeito de inclusões metálicas nos contornos interiores de um fundido.	34
Figura 11 - Defeito de sinterizações num fundido de ferro fundido lamelar, devido a impurezas na areia de quartzo usada.	36
Figura 12 - Localização dos cortes, referente à superfície lateral da culassa.	43
Figura 13 - Imagem representativa da inspeção visual realizada no ensaio 0.	45
Figura 14 - Imagem representativa da inspeção visual realizada no ensaio 1.	46
Figura 15 - Imagem representativa da inspeção visual realizada no ensaio 2.	47
Figura 16 - Imagem representativa da inspeção visual realizada no ensaio 3.	48

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Comparação entre as propriedades da areia de sílica com a de cromite.	15
Tabela 2 - Apresentação das alternativas consideradas para os ensaios.	40
Tabela 3 - Apresentação das variáveis e ações dos ensaios.	42
Tabela 4 - Principais resultados dos ensaios realizados, com os valores relativos de sucata.	49

1. Introdução

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito da Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais e em parceria com a empresa Funfrap - Fundição Portuguesa, S.A.

Um fator que promoveu a fundição como método de produção é a sua capacidade de obter, num só componente, partes que, por outros métodos, teriam que ser sujeitos a processos de união, que poderiam deteriorar a sua qualidade e desempenho. O que determina esta capacidade de produzir geometrias complexas é o uso de machos, separados ou em um conjunto assembled [1].

Um macho é um corpo conformado, normalmente de areia, que forma a parte interior do fundido. Em fundição a moldação é o bloco, em areia, que contém a cavidade moldante e onde, durante o vazamento, o macho impede que o metal líquido preencha um espaço por completo [1].

O uso de machos permite a incorporação de furos no desenho, até espaços que não têm de estar limitados a uma forma cilíndrica, que atravessam o fundido. Os machos podem adquirir vários ângulos e formas, nunca estando limitados a um por moldação, podem sim ser assembled para criar uma rede interna de passagens e câmaras [1].

Durante o vazamento, o metal líquido entra em contacto com os materiais refratários que compõem a moldação e os machos, como também os constituintes responsáveis pela sua agregação e desempenho. A natureza dissimilar entre estes materiais proporciona a ocorrência de reações tanto físicas, como químicas. Qualquer uma das reações pode resultar em defeitos no fundido [2].

Para evitar, ou minimizar, as reações entre a areia e o metal, recorre-se ao uso de revestimentos, aplicados na forma de tintas. O principal objetivo destes revestimentos é fornecer um melhor acabamento superficial ao fundido com que entra em contacto [2].

A fundição é um processo que contém sempre algum risco de ocorrência de falhas, e por isso é necessário tomar ações que permitam o fabrico de componentes sem defeitos. A maior parte dos defeitos advêm de parâmetros do processo, e para evitar a ocorrência de defeitos é necessário conhecer a influência que os parâmetros têm sobre estes [3].

A análise de defeitos envolve a descoberta das causas raiz do mesmo, a tomada de decisões para a sua redução, resultando numa melhoria da produtividade do processo [3].

1.1. Objetivo

O trabalho proposto pela Funfrap, foi a melhoria, ao nível da eficiência, do processo de fabrico da culassa, atuando sobre a ocorrência de certos defeitos como bolhas e macho partido. O trabalho abrange temas como, controlo do processo de fabrico, análise de defeitos, e análise de custos.

2. Empresa e Processo

2.1. Funfrap

A Funfrap situada em Cacia, Aveiro, pertence ao grupo italiano Teksid, sendo uma das sete fundições que o compõe. A Funfrap especializa-se no desenvolvimento e produção de componentes para a indústria automóvel em ferro fundido, nomeadamente blocos de motor, cárteres chapéus, caixas diferenciais, cambotas, entre outros. A capacidade produtiva é de 45 000 toneladas por ano, servindo os principais clientes como a FCA, *Reanult*, PSA, OMR-GM e *Honeywell* [4].

A empresa está certificada segundo as normas ISO/TS 16949, ISO 14001, OHSAS 18001 e ISO 50001, que correspondem, respetivamente à gestão de qualidade para fornecedores da industria automóvel, à gestão de ambiente, à gestão da saúde e segurança no trabalho, e à gestão da energia [4].

A empresa rege-se pela metodologia WCM (*World Class Manufacturing*) cujos princípios consistem na eficiência operacional, na redução de desperdícios e na viabilidade económica. Em novembro de 2015, a Funfrap tornou-se na primeira fundição do grupo *Fiat Chrysler Automobiles* (que engloba o grupo Teksid) a ganhar a medalha de bronze pela metodologia WCM [4].

2.2. Culassa

A culassa tem como funções sustentar e controlar o processo de combustão enquanto permite a admissão e exaustão de gases no motor. A culassa deve ser robusta, pois tem que suportar pressões e temperaturas elevadas, tudo isto sem mudar de forma e corromper a sua união ao bloco de motor. O interior da culassa contém várias passagens, que permitem a entrada de combustível, a passagem do óleo (lubrificante) e água (refrigerador), assim como a saída de gases de exaustão [5, 6].

Existe o risco da culassa sobreaquecer, que causa a expansão da peça, fora das tolerâncias, e a falha da mesma, para a mitigar este efeito existe a circulação de líquido refrigerador (uma mistura de água e anticongelante) que transfere o calor em excesso para o exterior do motor [5, 6].

Com a passagem de gases pelas válvulas da culassa, estas sofrem desgaste que eventualmente resulta, na fuga de gases de exaustão para o coletor de admissão, e ultimamente, na paragem ou falha da ignição [5, 6].

A culassa, na Funfrap, é fabricada com o grau de ferro fundido lamelar, UNI 5330, que é não-ligado e para uso na indústria automóvel. Na *figura 1* está apresentada, em vistas diferentes, uma culassa acabada.

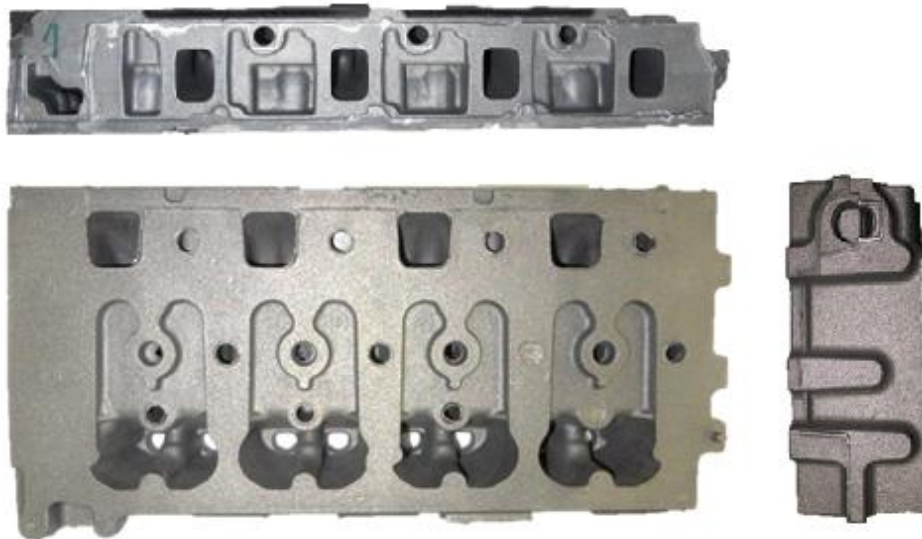


Figura 1 - Várias vistas, em 3º Diedro, de um culassa acaba, contendo a vista frontal (centro), a vista de topo (acima) e a vista lateral (à direita).

As vistas observadas na *figura 1* são as mais pertinentes para o trabalho, pois a vista central serve como referência das outras vistas, a vista topo assinala a face onde preferencialmente se localiza o defeito de bolhas, um dos que será abordado ao longo do trabalho, e a vista lateral servirá como referência para um dos ensaios realizados, que será aprofundado no *capítulo 4.2*.

2.3. All-In-Core

A culassa é produzida pelo método *All-In-Core*, que consiste no fabrico de fundidos no seio de machos, sem contacto com a areia verde, permitindo maior precisão dimensional, tudo devido à maior resistência mecânica da areia de macho, relativamente à areia verde. Com o método, a moldação em areia verde simplesmente estabelece parte do sistema de alimentação, em concreto: a bacia; o gito de descida; e os caminhos de gitagem. O restante sistema de gitagem, os ataques, são estabelecidos em cada conjunto de machos. No método, nenhuma parte do componente fundido toca em areia verde, garantindo assim uma melhor qualidade superficial.

2.3.1. Conjunto de Machos

A culassa é produzida com o auxílio de nove machos, cujas funções são distintas entre si. Seis dos nove machos que compõem o conjunto estão representados na *figura 2*, sendo só os machos das *figuras 2.B* e *2.C* o foco do trabalho. Dois dos machos servem para enclausurar o componente, impedindo o contacto com a moldação exterior, sendo estes denominados tampa e base (*figura 2.A*). Dois dos machos reproduzem as condutas de óleo que acedem ao bloco de motor, estes são denominados machos conduta, separando-se em superior e inferior. Os últimos cinco, e o foco deste trabalho, reproduzem as passagens pelas quais a água acede à culassa, estes são denominados machos camisa e são subdivididos em um macho camisa superior (*figura 2.C*) e quatro machos camisa inferiores, assinalados com linhas vermelhas na *figura 2.B*.

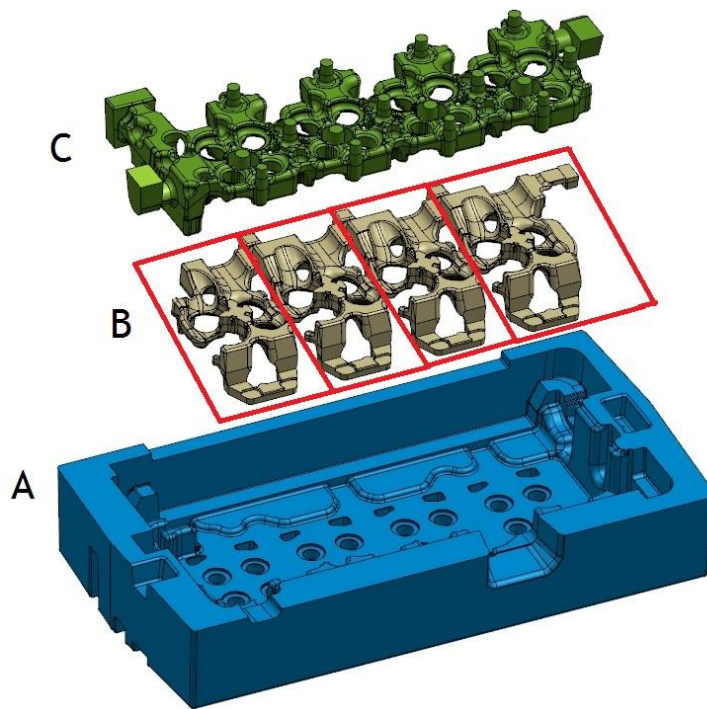


Figura 2 - Representação de parte do conjunto de machos, mostrando os machos base (A), camisa inferiores (B) e camisa superior (C).

2.4. Processo

O processo produtivo está de modo geral, representado neste capítulo. O processo inicia-se com a preparação da areia de machos e o fabrico destes, representado na *figura 3*, seguido do revestimento dos machos, e a montagem do conjunto *All-In-Core*, representado na *figura 4*. Após os machos cumprirem o tempo necessário em stock, são colocados dentro das moldações, etapa representada na *figura 5*. Após as peças terem sido completamente arrefecidas seguem para a linha de acabamentos, cujo fluxograma está representado na *figura 6*, onde são trabalhadas, e inspecionadas, a nível de defeitos, até se obter a peça final.

2.4.1. Areias

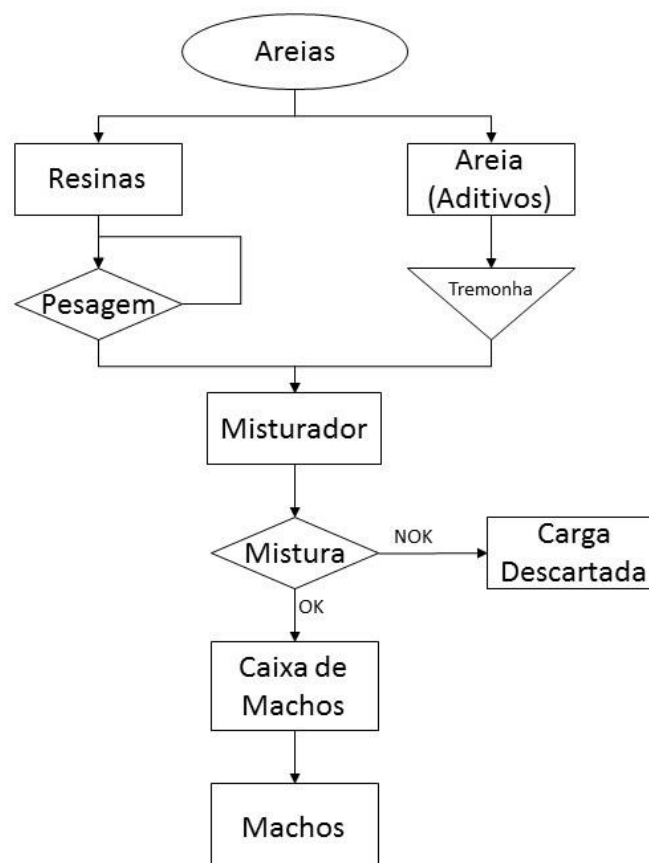


Figura 3 - Esquema da etapa de preparação da areia dos machos.

Na preparação de areias, a areia mais os aditivos (nos casos aplicáveis do *capítulo 3.1*) é preparada numa tremonha que mistura os dois. Como o ligante vem em duas partes, estas são pesadas em separado e adicionadas juntamente com a areia ao misturador, em cargas discretizadas. A areia é colocada numa tremonha, para que esta alimente o misturador ao mesmo ritmo que o ligante, de forma a garantir que estes não entrem desfasados um do outro. Um desfasamento da areia e do ligante formaria uma mistura heterogénea, que resultaria em variações nas propriedades ao longo do macho. O tempo que a mistura passa no misturador dependerá da quantidade de areia colocada.

Antes de utilizar a areia no fabrico de machos, esta é controlada. Assim que sai do misturador, é retirada uma parte para produzir dois provetes de areia. Os dois provetes são ensaiados quanto à resistência à flexão, no local, de acordo com procedimentos de operação normalizados (SOP's), para controlar o nível de resina. Este ensaio serve para um controlo rápido da resina na mistura, e é corroborado com um ensaio mais completo, efetuado à posteriori. Os provetes fraturados são enviados para os laboratórios de qualidade onde são testados através da perda por fogo (de acordo com regulamentos internos normalizados), fornecendo um valor mais exato da quantidade de resina no macho.

Se o ensaio de resistência à flexão, comprovar que a areia possui o nível adequado de resina, esta prossegue para a macharia onde é injetada para a caixa de machos, que fabrica os machos de acordo com o processo de *Cold Box*, aprofundado no *capítulo 3.2.1.3*.

2.4.2. Macharia

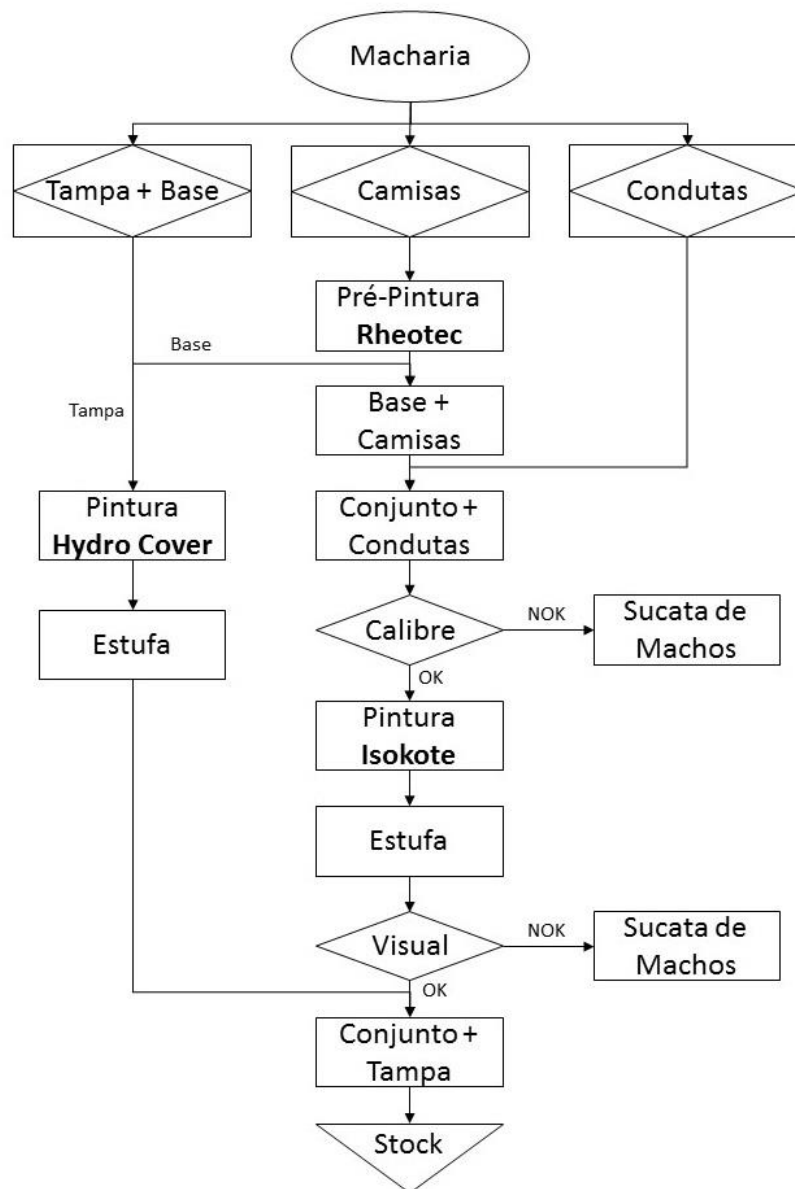


Figura 4 - Esquema da etapa de pintura e montagem do conjunto de machos.

Os vários machos que vão compor o conjunto, que dará origem à culassa, são fabricados em linhas separadas. Os dois tipos de machos conduta serão fabricados numa máquina, os camisa serão fabricados noutra, enquanto a base e tampa serão fabricadas na mesma máquina. Após o fabrico dos machos, estes são inspecionados visualmente e com calibre (camisa superior) pelos operadores que os manuseiam. Os machos camisa sofrem uma pré-pintura manual com a tinta *Rheotec XL* (capítulo 3.3.7.). Os machos camisa inferiores são colados sobre a base, nas respetivas posições, sendo sobrepostas pelos machos conduta

com cola, seguidas pela colocação do macho camisa superior, e finalizando com o aparafusamento do conjunto. Este conjunto sofre uma pintura automática com a tinta *Isokote* (capítulo 3.3.8.), que é seguida por uma passagem na estufa, com o objetivo de curar a tinta, assegurando uma boa adesão ao substrato, e garantindo uma boa secagem, para remover a humidade do revestimento. Após a cura do conjunto, este é inspecionado visualmente pela presença de defeitos da pintura.

Em paralelo com estas etapas, a tampa do conjunto sofre uma pintura com a tinta *Hydro Cover* (capítulo 3.3.9.), que é seguida por uma passagem na estufa. Assim que o macho passa pela estufa, converge com o resto do conjunto e é montado sobre este. O conjunto é fechado com parafusos e dirigido para stock, onde aguarda pelo vazamento.

2.4.3. Moldação

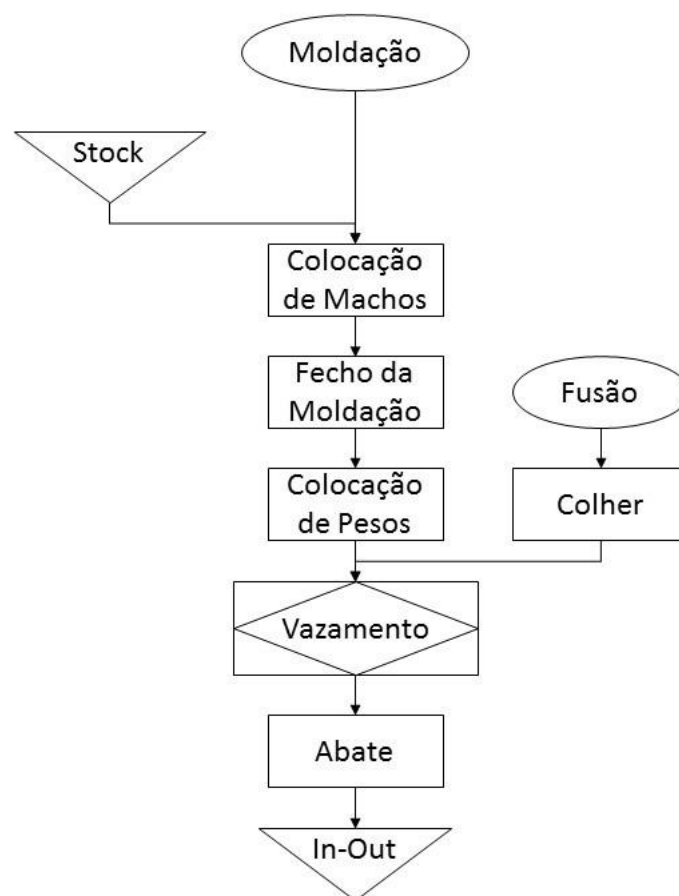


Figura 5 - Esquema das etapas de Moldação e Fusão do processo de fabrico da culassa.

Assim que a areia verde seja preparada e ambas as meias moldações sejam elaboradas, segue-se a colocação dos machos.

Os machos são retirados do stock e preparados para serem colocados na meia moldação inferior de forma automática. Assim que o filtro é colocado a moldação é encerrada com a meia moldação superior, sendo estas sobrepostas por um peso, que tem como objetivo contrariar a pressão metalostática gerada pelo enchimento da moldação.

Em paralelo, na secção da Fusão, o ferro fundido lamelar é produzido. O metal líquido é vazado para uma colher, que por si é colocada na linha de moldação. O vazamento é decorrido pelo método *Mezger* (ou de basculamento), onde a colher, na linha de moldação, é inclinada para verter o metal líquido para dentro da moldação. O fluxo é controlado eletronicamente pela inclinação da colher.

Assim que a moldação esteja cheia, esta segue para a linha de arrefecimento. Quando a moldação chegar ao fim da linha de arrefecimento é abatida (remoção da caixa da moldação que sustem a areia) e é dirigida para a secção de *In-Out*, onde as moldações são armazenadas até arrefecerem por completo.

2.4.4. Acabamentos

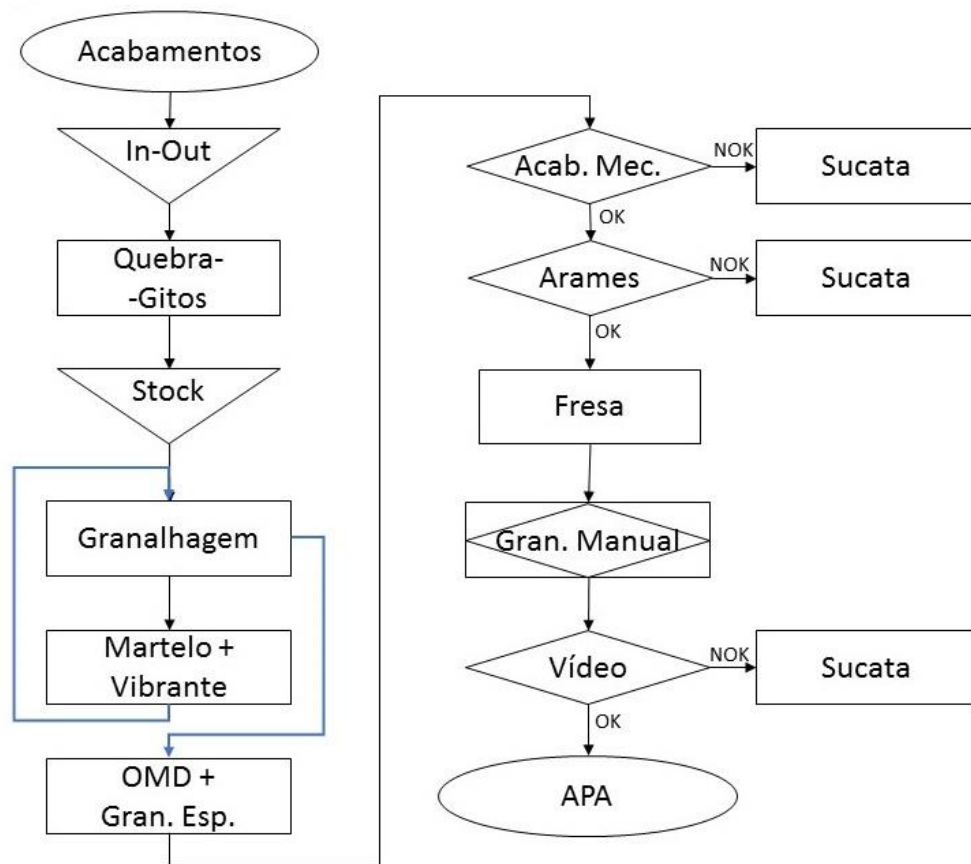


Figura 6 - Esquema da etapa de Acabamentos do processo de fabrico da culassa.

Após a moldação arrefecer até uma temperatura manuseável, é retirada do *In-Out* e dirigida ao quebra-gitos, aonde o resto da areia é separada do fundido e este é subdividido nos seus componentes, as peças e o sistema de alimentação. As peças, ou seguem para a próxima etapa ou são colocadas em stock.

Na etapa seguinte, as peças são penduradas num suporte, adequado à sua geometria, que percorre um trajeto, no qual sofre uma etapa de granalhagem, que tem como objetivo remover qualquer areias que estejam agarradas à superfície das peças. No fim do trajeto as peças são postas num tapete vibrante onde um operador, através de um martelo pneumático, realiza uma remoção mais focalizada de areias superficiais das peças. Após a passagem pelo tapete vibrante, as peças sofrem uma segunda granalhagem (marcada pela

linha azul na *figura 6*), desta vez com o intuito de atingir as passagens de água e óleo da culassa, criadas pelos machos. Um dos objetivos dos ensaios realizados ao longo deste trabalho foi a possível eliminação desta segunda passagem, cuja viabilidade é discutida no *capítulo 4.1*.

Com a realização da granalhagem das peças, estas passam pela OMD, cujo objetivo é facejar a peça em quatro faces, e remover as rebarbas criadas pela utilização dos machos. De seguida as peças são enclausuradas e sustidas por garras, responsáveis por impor um movimento rotativo, que em conjunto com uma granalhadora específica promove uma remoção, mais profunda, da areia remanescente no interior da peça. Além da segunda granalhagem, esta etapa foi considerada para eliminação, e sua viabilidade é discutida no *capítulo 4.1*.

Assim que a etapa anterior esteja concluída, as peças são dirigidas para as cabines aonde são realizadas operações específicas aos requerimentos da culassa. As operações centram-se: no controlo visual (a olho nu e com vídeo endoscópico) de defeitos superficiais; na fresagem de uma face da peça; no controlo do interior com arames, para detetar obstruções, e remove-las, se possível, com uma granalhagem manual. É de salientar que quaisquer peças, com defeitos sinalizados, são sucatadas e separadas para posterior análise. No final as peças são dirigidas ao **Armazém de Peças Acabadas**.

2.5. Caracterização do Problema

Parte do trabalho proposto foi a eliminação de defeitos como, bolhas e macho partido, abordados nos *capítulos 3.4.1.* e *3.4.2.*, respetivamente. A ocorrência destes defeitos resultava na rejeição dos fundidos, com frequência e gravidade considerável. Na *figura 7* é possível observar este defeito e como ele se apresenta na superfície do fundido.

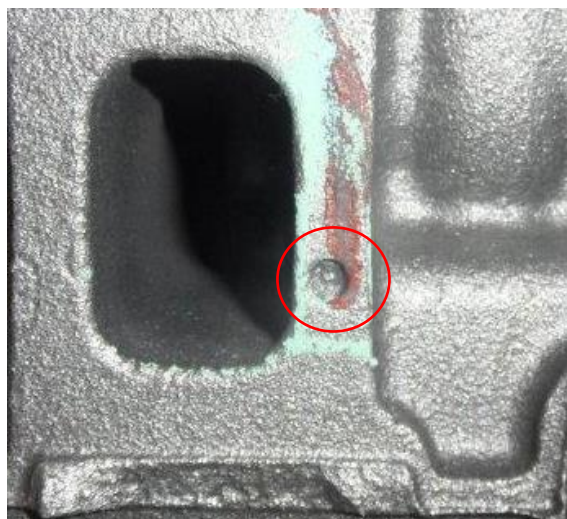


Figura 7 - Defeito de bolha, assinalado com um círculo vermelho, na superfície de topo da culassa.

O defeito de bolha, observado na *figura 7*, tem como aparência característica uma forma arredondada e lisa. A ocorrência e prevenção deste defeito será aprofundada no *capítulo 3.4.1*.

O caminho escolhido foi a nível da pintura dos machos, pois apresentou-se como uma possível fonte de gases, nomeadamente vapor de água, que originam as bolhas. Admite-se que os machos interiores, são aqueles que originam os gases responsáveis pelas bolhas, pois não é esperado que os machos exteriores tenham problemas de ventilação. Os machos camisa revelam-se mais críticos quando se considera que estes sofrem duas pinturas diferentes.

Após ter isolado a pré-pintura como potencial causa dos defeitos, ensaios foram efetuados para testar a sua influência nos defeitos. Dos ensaios realizados (detalhados no *capítulo 4.1*) foi concluído que, embora a remoção da pré-pintura resulta na redução dos defeitos originais, o aparecimento de outros defeitos, como inclusões metálicas e sinterizações, indicia que esta medida não é suficiente.

Após o primeiro ensaio o defeito de bolha é praticamente eliminado, ficando o defeito de macho partido por resolver, como também os novos defeitos que requerem uma alternativa que não empregue revestimentos. Entre as alternativas, de prevenção de inclusões metálicas e de sinterizações, abordadas nos *capítulos 3.4.3.* e *3.4.4.*, foi escolhido alterar o aditivo da areia dos machos camisa, sendo esta a alternativa com o melhor compromisso entre

exequibilidade e garantia de sucesso. Oportunamente a areia de bauxite encontrava-se disponível na empresa, e foi considerada como alternativa ao aditivo atual (razões aprofundadas no *capítulo 3.1.3.*). A única desvantagem sobre a cromite, é o custo superior. Para contrabalançar o custo adicional, certos benefícios teriam que ser aumentados, ou então, custos reduzidos. Várias alternativas foram estudadas, de forma a encontrar um compromisso entre benefícios e exequibilidade dos ensaios, aprofundados no *capítulo 4*.

O indicador de eficiência escolhido para o trabalho é a relação entre benefício e custo (B/C), indicador utilizado internamente pela empresa, a nível de *Cost Deployment*, pilar técnico do sistema de gestão WCM. O indicador (B/C) necessita de uma métrica em comum entre as contribuições para o processo, que podem tanto ser materiais como imateriais, e positivas (benefícios) ou negativas (custos). A métrica empregue no trabalho foi a de custo por peça produzida, ou seja, a influência que cada contribuição tem sobre o preço final. Como principal resultado, será utilizada a diferença relativa de sucata, antes e depois de uma ação.

3. Estado de Arte

Neste capítulo expõe-se a informação considerada necessária para a tomada de decisão, como também para a discussão dos resultados, abordadas, respetivamente nos *capítulos 4.1 e 6*.

3.1. Aditivos

A areia de sílica é o constituinte que influencia o desempenho dos machos, mas em certos casos, como o dos machos camisa, esta não é suficiente, sendo necessário a introdução de aditivos. Os aditivos, adicionados na forma granular, pretendem melhorar as propriedades dos machos, entre elas, a resistência à flexão e a refratariedade (resistência a temperaturas altas). Neste subcapítulo apresenta-se os aditivos pertinentes a este trabalho, como as areias de cromite e de bauxite.

Na *tabela 1* apresenta-se várias propriedades das areias de sílica e de cromite, abrangendo propriedades granulométricas, físicas e as suas aplicações principais.

Tabela 1 - Comparação entre as propriedades da areia de sílica com a de cromite [7].

Propriedade	Sílica	Cromite
Tamanho de grão (nº AFS)	50/55	50/60
Forma de grão	Redonda/Angular	Angular
Densidade específica	2,65	4,52
Densidade a granel (kg.m ⁻³)	1490	2670
Expansão térmica	1,9 %	0,6 %
Aplicação	Refratário principal	Resistência à penetração metálica

A areia de sílica é amplamente usada na fundição de areia, para produzir moldações e machos, pois é facilmente acessível e possui um custo baixo, comparativamente a outros granulados refratários. O tamanho de grão (50/55 AFS) é o melhor compromisso entre o acabamento superficial e a quantidade ligante necessária. A forma de grão arredondada também assiste na redução de ligante necessário. A alta expansão térmica da areia pode causar defeitos superficiais nos fundidos, como rebarbas ou inclusões metálicas [7].

3.1.1. Areia de cromite

A cromite, FeCr_2O_4 , tendo altas massa volúmica e condutividade térmica provê um efeito de têmpera pronunciado. A sua expansão térmica é baixa e torna defeitos associados, menos prováveis de acontecer. A cromite apresenta uma maior resistência apesar do seu menor tamanho de grão (50/60 AFS). A reutilização da cromite fica impossibilitada, pois, após abate, encontra-se contaminada com sílica, e logo perde a sua refratariedade [7].

A cromite é amplamente usada como um aditivo e é valorizada pela sua expansão térmica baixa e pelo seu efeito de têmpera, particularmente quando usado com fundidos de aço. A maior fonte de areia de cromite é a britagem do seu minério, que por virtude do processo resulta numa areia com forma angular [2].

3.1.2. Areia de Bauxite

A bauxite é um minério de alumínio e a maior fonte do mesmo. Cerca de 85 % de toda a bauxite minada a nível mundial é processada em alumínio. Outros 10 % são reduzidos a alumina que é usada em produtos químicos, abrasivos ou refratários. Os restantes 5 % da bauxite são utilizados para fazer produtos abrasivos ou refratários, e compostos de alumínio [8].

A areia de bauxite é produzida fundindo e sobrearrefecendo minério de bauxite num forno de arco elétrico, que sucessivamente sofre um processo de *spraying* proprietário, fornecendo uma forma perfeitamente esférica aos grãos. A areia é constituída principalmente por, alumina (Al_2O_3) e hematite (Fe_2O_3), possuindo uma densidade a granel perto de 1900 kg.m^{-3} [9, 10].

A areia de bauxite é amplamente utilizada na indústria de fundição como areia de moldação e de macho, devido à sua forma de grão perfeitamente esférica. Na macharia pode-se reduzir custos com ligantes até 50 % sem perdas de resistência à flexão, quando comparada com outros aditivos [9, 10].

A forma de grão esférica melhora consideravelmente a escoabilidade da mistura areia/ligante, permitindo o fabrico de formas mais complexas, do que quando comparada com areias mais angulares [9, 10].

A areia de bauxite possui uma taxa de expansão térmica muito baixa, em comparação com outras areias (sílica e cromite), que permite o fabrico de fundidos com um alto grau de precisão dimensional [9, 10].

A natureza esférica da areia de bauxite resulta numa área superficial reduzida permitindo o fabrico de moldações e machos com menores quantidades de ligante, e consequentemente um menor custo com a mistura de areia [9, 10].

As vantagens do uso da areia de bauxite são [9]:

- Uma redução no uso de areia;
- A forma de grão esférica, quando comparada com areias angulares, permite uma separação mais fácil entre o fundido e o refratário moldante;
- É segura a nível de saúde, quando comparada com a sílica (silicose);
- Expansão e condutividade térmicas baixas, garantindo melhores precisões dimensionais e desempenhos da moldação e machos;
- Requer 30 % menos de resina;
- Pode ser usada tanto como aditivo, ou como constituinte principal;
- Oferece menores massa volúmica real e área superficial específica;
- Melhor durabilidade quando comparada com sílica e cromite.

3.1.3. Comparação entre Aditivos

A areia de bauxite, na forma de pérolas refratárias perfeitamente esféricas, apresenta-se como uma boa alternativa à areia de cromite. Como se pode observar na *figura 8*, a bauxite possui um tamanho de grão maior (AFS 55), como também uma forma mais redonda. Estas propriedades refletem um consumo menor de ligante, quando a bauxite é usada na mesma quantidade que a cromite. De modo similar a bauxite, para a mesma quantidade de aditivo e de ligante que a cromite, deverá exibir maior resistência à flexão.

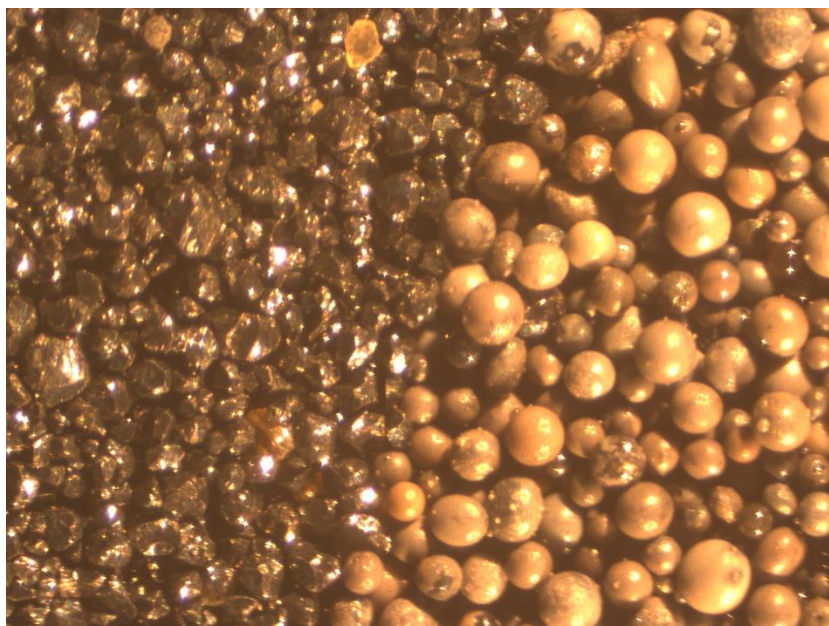


Figura 8 - Comparação visual entre grãos de areia de cromite (esquerda) e de bauxite (direita).

Em termos de refratariedade, a bauxite é superior à cromite, possuindo assim maior estabilidade térmica. Esta propriedade permite que a bauxite suporte maiores temperaturas que a cromite, ou a mesma temperatura por mais tempo, com o mínimo de reatividade com o metal líquido. A única desvantagem da bauxite em comparação com a cromite será o preço.

3.2. Machos

Para que o macho seja bem-sucedido na produção de fundidos de alta qualidade, necessita que vários tipos de propriedades. Necessita de resistência suficiente para manter a forma enquanto é preparado e manuseado, precisa de suportar as altas temperaturas durante o vazamento de metal líquido, e também não deve exibir grandes expansões, ou contrações, térmicas de modo a garantir uma boa precisão dimensional. Todas estas propriedades devem ser condicionadas ao fundido em questão, para que este seja realizado correta e eficientemente [1].

3.2.1. Fabrico de Machos

Existem vários métodos para o fabrico de machos, mas dentro desses existem três tipos que são mais utilizados, que são os processos *Cold Box*, *Hot Box*, e o *Shell* [11].

3.2.1.1. Processo *Shell*

O processo *Shell* tem como objetivo a produção em massa e a melhoria do acabamento superficiais, podendo reproduzir detalhes na ordem dos 0,02 mm. O processo consiste no fabrico de uma moldação que possui duas ou mais carapaças finas, que possuem dureza e acabamento superficial moderáveis. A areia de moldação é preparada com um pó seco de resina fenólica termoendurecível e areia fina, que são misturados uniformemente com uma relação de 1:20. No processo o molde é aquecido entre 205 °C e 230 °C e coberto com a mistura de areia. Após 30 s uma carapaça dura de areia é formada sobre o molde, e os dois são juntamente aquecidos a 315 °C durante 60 s. Após esta etapa o molde e a carapaça são separados. O processo permite o fabrico de várias carapaças, assim como também carapaças que servem de machos, ou seja, para fazer as cavidades interiores do fundido. Assim que todas as carapaças são fabricadas, podem ser montadas umas nas outras e formar a cavidade moldante que fornecerá a forma ao fundido final [11].

As carapaças formadas por este processo possuem, espessuras que estão compreendidas entre os 0,3 e 0,6 mm, dureza suficiente para serem facilmente manuseadas e podem ser armazenadas indefinidamente. As carapaças são mantidas unidas, ou por grampos ou por adesivos, e suportadas por materiais a granel permeáveis como granalha de aço ou gravilha [11].

3.2.1.2. Processo *Hot Box*

Este processo é uma inovação do processo *Shell*, pois faz uso de uma resina semelhante para aplicar um revestimento aos grãos de areia. Ao contrário do processo *Shell*, que produz várias carapaças finas que formam um

macho oco, este produz machos inteiros e maciços. É normalmente usado no fabrico de machos com secções finas, resistentes à fratura e à erosão quando em contacto com o metal líquido. O processo é particularmente usado para machos pequenos, permitindo grandes capacidades produtivas [1, 12, 13].

No processo de *Hot Box* um ligante líquido termoendurecível (resina fenólica) e um ácido catalisador latente (ureia) são misturados com areia seca e injetados para uma caixa de machos aquecida, que ao contrário do processo *Shell* não envolve a formação de uma camada fina, mas sim de uma massa sólida. A caixa de machos é aquecida entre 230 a 290 °C e após o aquecimento, o catalisador liberta ácido que induz uma cura rápida, podendo os machos ser removidos após 10 a 30 s. O macho é aquecido a uma temperatura perto de 230 °C e de seguida arrefece para completar a cura. Em alguns casos uma pós-cura pode ser necessária. Os machos obtidos estão relativamente livres de distorções ou contrações, sendo a precisão dimensional maior do que no processo *Shell* [1, 12, 13].

3.2.1.3. Processo *Cold Box*

Os machos são fabricados pelo processo de *Cold Box*, que se distingue de outros processos por não utilizar moldes aquecidos, e por utilizar uma fase gasosa para catalisar a cura do ligante das partículas refratárias do macho [14].

O ligante usado no processo é aplicado em duas partes. A parte 1 é uma resina fenólica, a parte 2 é um poliisocianato (MDI) que atua como solvente para a resina. As resinas são misturadas com areia, seguidamente injetadas para uma caixa de machos e compactadas. A caixa de machos é gaseada com amina (na forma de TEA, DMEA ou DMIA) que catalisara a reação em ambas as partes causando um aumento de resistência à flexão do macho. De seguida a mistura de areia é calcada e pressionada enquanto a reação do ligante surte efeito. A desmoldação é efetuada assim que se atinge o *strip time*, e após esta etapa o endurecimento do macho prossegue até se dar por concluído a reação do ligante [7].

Após a adição do catalisador à mistura dá-se a reação do ligante, por isso existe um *work time* em que o macho deve ser conformado. Se o *work time* for excedido a resistência final do macho será reduzida, sendo aconselhado cumprir um tempo que seja um terço do *strip time* [7].

É aconselhado desmoldar os machos assim que estes atinjam resistência suficiente, pois o ligante utilizado ataca os moldes após contacto prolongado. As propriedades dos ligantes são expressas em termos de [7]:

- *Work time*: é definido como o tempo após mistura, em que a mistura de areia possui uma resistência à compressão menor que 10 kPa, sendo este abaixo deste valor a altura em que a mistura tem maior fluidez e compactabilidade.
- *Strip time*: é definido como o tempo após mistura em que é atingida uma resistência à compressão de 350 kPa, permitindo uma desmoldação sem risco de distorções no macho.
- Resistência máxima: é o valor da resistência à compressão de uma mistura completamente endurecida, atingindo valores por volta dos 3 000 e 5 000 kPa.

A areia utilizada deve ser virgem, com um tamanho de grão na ordem dos 50 a 60 AFS, normalmente o material refratário usado é sílica, mas este pode ser substituído por outros, como cromite ou bauxite, ou usados em combinação. A temperatura da areia deve rondar os 25 °C, pois temperaturas baixas causam a condensação da amina e uma cura irregular, mas temperaturas altas resultam em perdas de solvente e consequente perda de propriedades mecânicas do macho [7].

As adições de resina totalizam entre 0,8 a 1,5 % do peso da mistura, sendo a qualidade da areia a variável que condiciona este valor. As partes normalmente são usadas em proporções iguais [7].

3.3. Revestimentos

Durante o enchimento da moldação e assim que o metal líquido entra em contacto com a areia de moldação e/ou de macho podem ocorrer reações físicas e químicas na interface areia/metal. Qualquer uma das reações pode resultar em defeitos superficiais no fundido [7].

3.3.1. Efeitos físicos

A penetração de metal líquido nos poros da areia afeta principalmente a qualidade superficial do fundido. A severidade dos defeitos está dependente de [7]:

- Pressão metalostática - a penetração acentua-se nas partes mais inferiores da cavidade moldante;
- Pressão dinâmica - a severidade é maior nas superfícies que sofrem o impacto direto do fluxo de metal líquido;
- Porosidade superficial da areia - poros abertos surgem com, ou areia muito grossa, ou areia mal compactada, ou machos com um ligante muito viscoso, ou machos que excederam o seu *work time*.

Expansão da areia, ou expansão térmica diferencial, é um fenómeno que pode ocorrer em areia verde ou de machos, devido a pequenas diferenças de tamanho ou composição, e proporciona a formação de fendas que durante o enchimento são preenchidas por metal líquido, resultando num fundido com defeitos superficiais, como rebarbas ou inclusões metálicas [7].

3.3.2. Efeitos químicos

Uma reação química ente a areia e o metal pode acontecer, se a areia tiver impurezas que possam reduzir a sua refratariedade. O ligante aplicado pode produzir fases líquidas a temperaturas menores que 900 °C e induzir reações indesejadas, apresentadas no *capítulo 3.4.* [7].

3.3.3. Defeitos carboníferos

Ligantes de base orgânica degradam-se a altas temperaturas de vazamento, formando gases que contêm carbono que promovem a carburação da superfície do fundido [7].

Um revestimento refratário na moldação ou no macho pode reduzir ou eliminar a penetração metálica e a sinterização. Embora, antigamente, muitas fundições desenvolvessem os seus próprios revestimentos à base de pó de coque ou grafite, atualmente quase todas as fundições recorrem a vendedores especializados para desenvolver os seus revestimentos [7].

3.3.4. Componentes da Tinta

As tintas utilizadas na fundição têm como principais componentes [2, 7]:

- Refratário
- Solvente líquido
- Ligante
- Sistema de controlo reológico

3.3.4.1. Refratário

O refratário é o constituinte mais importante, pois são as suas propriedades que determinam a eficiência do revestimento. Pode ser um único material ou uma mistura seletiva com aplicações específicas. O refratário é escolhido através do tamanho e forma das suas partículas, da temperatura de sinterização e de fusão, da condutividade térmica, da expansão térmica e da reatividade, com o metal a ser fundido e o material de moldação com que vai ser usado. O zircão, tendo alta refratariedade, é usado nas aplicações mais exigentes, como em fundidos de aço ou de ferro fundido, onde as secções são maiores. A grafite ou coque são mais usados em fundidos de ferro fundido com secções mais finas, e muitas vezes são usados em combinação com zircão, sílica ou talco [2, 7].

A eliminação, ou redução, de rebarbas pode ser atingida através, da inclusão de plaquetas lamelares de talco ou mica. A combinação de sílica e óxido de ferro é frequentemente usada como uma mistura de refratários barata para machos usados em componentes automóveis, pois o óxido de ferro contrabalança, a expansão térmica da sílica e a presença de atmosferas danosas [2, 7].

3.3.4.2. Solvente

O solvente líquido é o veículo para a composição total da tinta e serve para transportar o refratário para o substrato de areia e deve ser removido antes que o vazamento ocorra. Os solventes mais comuns são a água (que é o solvente usado na Funfrap) ou o isopropanol, embora outros podem ser usados como, o metanol, o etanol, hidrocarbonetos ou hidrocarbonetos clorados [2, 7].

A água é barata e acessível, mas a sua remoção com fornos é sempre necessária antes do vazamento. Secagem em excesso pode ser problemática em grandes moldações ou machos. O isopropanol seca mais rápido do que a água e pode ser removido mais rapidamente através da queima do revestimento, sendo mais caro do que a água, este solvente fica reservado para moldações ou machos de maiores dimensões. O metanol e etanol possuem pressões de vapor mais altas a 20 °C do que o isopropanol, e assim secam mais rapidamente. Os hidrocarbonetos clorados foram durante algum tempo usados para secagem ao ar rápida, mas ficaram obsoletos por preocupações ambientais [2, 7].

O uso de tintas à base de água em machos ou moldações pode alterar a integridade do substrato, possibilitando defeitos com a desagregação superficial da areia dos machos e moldações [2, 7].

3.3.4.3. Ligante

A função do ligante é a agregação das partículas refratárias e fornecer adesão à moldação ou ao macho. O ligante usado, muitas vezes, é o mesmo que para moldações ou machos, e por isso resinas orgânicas, sílica coloidal, ou

ligantes à base de silicato de sódio são comuns. O ligante normalmente interage com todos os constituintes da tinta e por isso não pode ser considerado isoladamente na concepção da tinta [2, 7].

3.3.4.4. Agente de Dispersão

O agente de dispersão permite a suspensão das partículas constituintes e impede segregações quando armazenados durante grandes períodos de tempo. Garante a homogeneidade do revestimento, sem aplicar grandes agitações. Também controla a escoabilidade da tinta e é escolhido em função do método de aplicação. Revestimento aplicados por imersão são diferentes daqueles que são usados como escovagem, projeção ou transbordagem [2, 7].

3.3.5. Métodos de Aplicação de Revestimentos

Os principais métodos de revestimento de moldações e machos são [2, 7]:

- Imersão
- Escovagem
- Pincelagem
- Projeção
- Transbordagem

3.3.5.1. Imersão

Este método envolve a imersão do macho num revestimento líquido, permitindo a acumulação de uma camada apreciável do revestimento. É o método mais rápido para a aplicação do revestimento, e é o mais usado em indústrias de alta capacidade produtiva, como o caso da Funfrap, que utiliza nas várias pinturas abordadas no *capítulo 2.4.2.* [2, 7].

O macho pode ser imergido tanto por via manual como por mecânica, sendo que em ambos os casos deve ser permitido que seja escorrida a tinta em

excesso do macho. O sucesso da operação depende na consistência da tinta e as suas propriedades reológicas. É essencial garantir a uniformidade da espessura do revestimento aplicado, a molhabilidade do líquido com a areia para fornecer boa adesão, como também que nas bolsas do macho a tinta seja bem escorrida. Se estes cuidados não forem tomados, a precisão dimensional do fundido final será afetada [2, 7].

O tipo de fluxo líquido que é apropriado para a imersão é conhecido como reologia pseudoplástica. Um líquido pseudoplástico sofre uma diminuição imediata em viscosidade com a aplicação de forças de cortes. A viscosidade original é recuperada assim que as forças de corte sejam removidas. Assim que o macho é imergido na tinta, as forças de corte reduzem a viscosidade a valores menores, assegurando uma cobertura eficaz de toda a superfície do macho. A viscosidade da tinta aumenta rapidamente com a remoção do macho e o escoamento da tinta em excesso termina [2, 7].

3.3.5.2. Escovagem

É uma técnica de fácil aplicação em que uma ou mais camadas podem ser aplicadas. O comportamento correto do fluxo é conhecido como reologia tixotrópica (semelhante a tintas comerciais). Nesta a viscosidade diminui lentamente com aplicação de forças de corte e recupera mais rapidamente, mas não imediatamente, com a remoção das forças de corte. Embora a tinta tem uma consistência quase gelatinosa pode fluir facilmente quando escovada. Permite uma boa suspensão do constituinte refratário e permite que as marcas de escovagem atenuem, deixando uma camada lisa e uniforme no macho [2, 7].

3.3.5.3. Pincelagem

Semelhante à escovagem exceto que a sua implementação causa a formação de pelos longos e macios que aderem uns aos outros. Com este método é mais fácil penetrar em reentrâncias superficiais, e aplicar uma camada espessa e lisa de tinta. Em comparação com a escovagem, há menor tendência em danificar o substrato ou formar marcas de escovagem no

revestimento. Ambas as técnicas têm aplicação lenta e requerem operadores experientes para que o revestimento seja bem executado [2, 7].

3.3.5.4. Projeção

Esta é uma técnica mais rápida que a escovagem, mas a penetração e a cobertura da areia não são tão boas. A técnica requer alguma experiência do operador para garantir que bolsas e reentrâncias sejam bem revestidas. A sua aplicação é mais apropriada para moldações e machos com geometrias simples. Na técnica a tinta é aplicada sob pressão com uma pistola de pulverização, de modo a que a tinta seja empregue na forma gotículas sobre o substrato. Algum fluxo tixotrópico é desejado para que a tinta não escorra ou não fissure [2, 7].

3.3.5.5. Transbordagem

Transbordagem, ou revestimento por aspersão, é adequado para machos ou moldações de grandes dimensões. A tinta é continuamente bombeada através de um bocal, que dirige este sobre o macho, enquanto o excesso é recolhido para um reservatório para que seja reutilizado. A reologia da tinta deve ser desenhada de modo a permitir a acumulação de uma camada uniforme independentemente da quantidade de tinta aplicada. O sistema reológico deve permitir uma deposição uniforme da tinta sem que haja o risco de esta escorrer ou fissurar [2, 7].

3.3.6. Vantagens e Desvantagens

As vantagens dos revestimentos incluem [2]:

- A redução dos custos de limpeza da superfície, devido ao acabamento obtido, como também à redução ou eliminação de defeitos como inclusões metálicas, ou sinterizações;
- A melhoria da desmoldação, pois o acabamento superficial garante menor aderência da areia à superfície do fundido;
- A redução de tempo nos acabamentos, e consequentemente uma redução no desgaste das ferramentas.

É importante realçar que, como em tudo, a aplicação de um revestimento deve ser realizado só quando realmente necessária, tendo como desvantagens [2]:

- O custo de materiais, especialmente os revestimentos à base de zircão;
- A potencial perda de precisão dimensional, pois é difícil controlar a espessura do revestimento, como a sua penetração na areia;
- O espaço necessário para ter uma estação para revestimentos;
- O custo energético para a secagem e o espaço necessário para os equipamentos;
- O tempo de secagem pode reduzir a produtividade;
- Uma completa secagem é difícil de garantir, havendo sempre a possibilidade da ocorrência de defeitos como bolhas.

O uso de revestimentos para a melhoria da qualidade superficial tem as suas vantagens, mas para a prevenção de bolhas, nem sempre está correto, pois os revestimentos podem reduzir a permeabilidade da superfície, bloqueando o escape de gases e voláteis da tinta [2].

3.3.7. *Rheotec*

As tintas *Rheotec*, fornecidas pela Foseco, são revestimentos à base de água desenhados para a imersão de machos, e posterior secagem em estufas. As tintas são fornecidas como pós, cremes ou lamas (prontas a usar). Servem para obter um bom acabamento superficial nas passagens internas do fundido, em estado bruto de vazamento [7].

Em fundições de ferro fundido de alta produtividade, que fazem uso de machos, correm o risco de estes apresentarem defeitos de expansão, como rebarbas ou inclusões metálicas, devido às temperaturas de vazamento empregues. A ocorrência destes defeitos requerer mais tempo e custos nas etapas de acabamentos. Se os defeitos aparecerem dentro de passagens ou cavidades do fundido, então a sua remoção é impossibilitada [7].

A *Rheotec XL*, a tinta utilizada na pré-pintura, abordada no capítulo 2.4.2. dos machos camisa, é mais direcionada para a redução ou prevenção de inclusões metálicas. Exibe características como alto isolamento, penetração controlada dos aditivos da tinta no substrato de areia de macho, e resistência térmica, assegurando um revestimento estável à temperatura de vazamento [7].

O revestimento é aplicado com uma diluição adequada (38-42 Baumés), de forma a garantir uma espessura entre 0,2 e 0,3 mm [7].

3.3.8. *Isokote*

As tintas *Isokote*, fornecidas pela *Corefon International*, são descritas como sendo um revestimento refratário formulado para melhorar as superfícies das peças vazadas na produção de fundições de alta qualidade [15, 16].

A tinta é uma mistura de materiais refratários e isolantes cerâmicos (quartzo e mica), e é fornecida sob a forma de pasta solúvel em água. A alta permeabilidade permite uma rápida libertação de vapores do solvente das resinas. A tinta é usada no revestimento do conjunto de macho, abordado no

capítulo 2.4.2., com o intuito de formar uma camada superficial protetora [15, 16].

O revestimento fornece alta permeabilidade, redução de inclusões metálicas em ferro fundido lamelar, e proteção com altas temperaturas, sendo um excelente revestimento de machos [15, 16].

3.3.9. *Hydro Cover*

A tinta *Hydro Cover*, fornecida pela *Mazzon*, é descrita como um revestimento isolante, concentrado e à base de água. É composto por pós refratários laminares (alumina), com óxido de ferro, ligantes orgânicos, entre outros [17].

Tem como uso preferenciais, revestimentos refratários para fundições que empregam machos fabricados por processos de *Cold Box*, *Hot Box*, e *Shell* [17].

O principal efeito como revestimento é de adesão em profundidade, ou seja, ao contrário das outras tintas, esta penetra a areia pelos espaços intergranulares, assegurando uma melhor adesão e melhorando o desempenho da areia contra ambientes agressivos, fornecendo resistência adicional à abrasão, por parte do fluxo metálico [17].

3.4. Defeitos

3.4.1. Bolhas

Poros subsuperficiais podem ocorrer devido à flutuação de bolhas de ar que ficaram incorporadas durante o vazamento, com a aparência típica, apresentada na *figura 9*. Se a bolhas não tiverem mais que 5 mm em diâmetro então não possuem impulsão suficiente para quebrar a dupla camada de óxido (a sua própria camada de óxido e a camada de óxido adjacente) quando atingem o topo da moldação. Por causa disto as bolhas encontra-se imediatamente sob a superfície do fundido, estando muito perto da superfície e sendo muito fácil

quebrar a camada fina que as separa do exterior. As bolhas possuem alguma tendência de se aglomerar em sítios específicos, como por exemplo diretamente acima dos ataques de alimentação, estando os seus tamanhos habitualmente distribuídos entre os 1 e 5 mm [2].



Figura 9 - Defeito de bolha no interior de uma culassa.

O limite de tamanho em 5 mm, resulta numa limitação física e é uma indicação certa de que os poros têm como origem o facto de serem incorporados gases durante o vazamento. O tamanho da bolha é demasiado grande para ser gerado por uma reação de difusão, como a do hidrogénio durante a solidificação do fundido [2].

Quando os machos são rodeados por metal líquido, o aquecimento da areia e ligante causa a formação de gases no macho. Normalmente o macho é desenhado para que os gases possam escapar pelos seus prensos, aliviando a alta pressão gerada, e sejam dissipados pela moldação [2].

Em algumas circunstâncias a pressão dos gases dos machos atingem níveis superiores às do metal líquido circundante, e pode resultar num escape, quase explosivo, numa bolha para o meio exterior [2].

As bolhas ao ascender pelo metal líquido formam rastros, que originam defeitos semelhantes aos provocados por turbulência. As bolhas geradas por turbulência são devido às altas velocidades atingidas na frente de avanço do metal líquido, sendo que as tensões de corte, formadas durante o arraste, quebram as bolhas em tamanhos menores, na ordem dos 1 a 10 mm. As bolhas

coalescem e flutuam rapidamente pelo metal, e se forem maiores que 5 mm quebram facilmente pela camada de óxidos no topo da moldação [2].

Assim que o macho tenha gerado uma bolha, bolhas adicionais são facilmente criadas pelo rasto formado pela primeira, servindo como escape para os gases restantes do macho. O rasto das bolhas é particularmente preocupante pois conecta a cavidade, feita pelo macho, a outra cavidade ou ao exterior, sendo que pouco material sólido se encontra no rasto de bolhas. O rasto de bolhas pode permitir a inflação de bolhas já geradas, originando bolhas na ordem dos centímetros ou até decímetros. Adicionalmente as bolhas acompanharam os contornos da superfície superior, agravando a sua extensão da tal forma que em certos casos não são claramente perceptíveis numa radiografia [2].

Existem algumas maneiras que podem prevenir a formação de bolhas, atuando sobre [2]:

- A produção de gases - utilizando ligantes que produzam poucos gases, ligantes com uma libertação de gases retardada, ou reduzindo a quantidade de ligante ao mínimo necessário;
- A ventilação da moldação - melhorando a permeabilidade do macho, criando ventiladores dentro do macho, e se possível, pelo ponto mais acima do macho;
- O enchimento - aumentando a velocidade de enchimento, para cobrir o macho o mais rápido possível sem que a sua pressão interna supere a do metal líquido circundante, ou aumentando a altura de enchimento, de modo a aumentar a pressão hidrostática do metal líquido, o surtir o mesmo efeito;
- A temperatura de vazamento - uma alternativa de último recurso, pois aumentando a temperatura de vazamento, permite que a libertação de gases ocorra antes da formação da camada de óxido que previne as bolhas de escapar.

3.4.2. Macho Partido

O defeito de macho partido tem como principal causa a fratura do macho, resultando tanto em inclusões de areia, que fica rodeada de metal e irremovível do fundido, como também deslocamentos do desenho original, pois o macho não foi capaz de cumprir a sua função, antes do metal solidificar.

As inclusões de areia são defeitos que facilmente levam à rejeição do fundido, cuja detecção é complicada, pois pode ficar aprisionada por baixo da pele do fundido, sendo só após maquinação possível visualizar o defeito. Algo que torna complicada a análise das causas, é o facto que as areias soltas, ou são arrastadas, pelo fluxo metálico, para longe do ponto de origem, ou flutuam no metal líquido, porque não são molháveis pelo mesmo [3].

O defeito de deslocamento, resulta de o macho não estar completamente ancorado pelos seus prensos, com não consegue suportar o fluxo metálico durante o enchimento, desvia-se da sua posição inicial. Na maioria dos casos, o defeito é detetável por uma simples análise visual, observando-se a falta ou desvio do canal que o macho reproduziria. É de notar que um defeito deste tipo impossibilita o desempenho do fundido, resultando na sua rejeição [3].

A prevenção da ocorrência deste defeito cinge-se em [3]:

- Aumentar a resistência à flexão dos machos, através do aumento da quantidade de ligante;
- Compactar os machos de forma mais uniforme e eficaz;
- Evitar grandes velocidade de enchimento e o impacto do fluxo metálico diretamente contra os machos;
- Diminuir os tempos de enchimento, melhorando a distribuição do metal líquido pelos ataques do sistema de alimentação.

3.4.3. Inclusões metálicas

O defeito de inclusões metálicas é causado pela expansão do quartzo, que na forma de areia de sílica fissura, permitindo a penetração de metal líquido e a formação de um defeito na forma de protuberâncias metálicas, finas e irregulares, nos cantos e arestas do fundido, como se pode observar na *figura 10*. O defeito é típico em sistemas de ligantes orgânicos, como os machos utilizados em fundição. O defeito, normalmente ocorre na fundição em areia, mas é menos crítico para materiais de menor ponto de fusão, como o alumínio e o magnésio [18, 19].

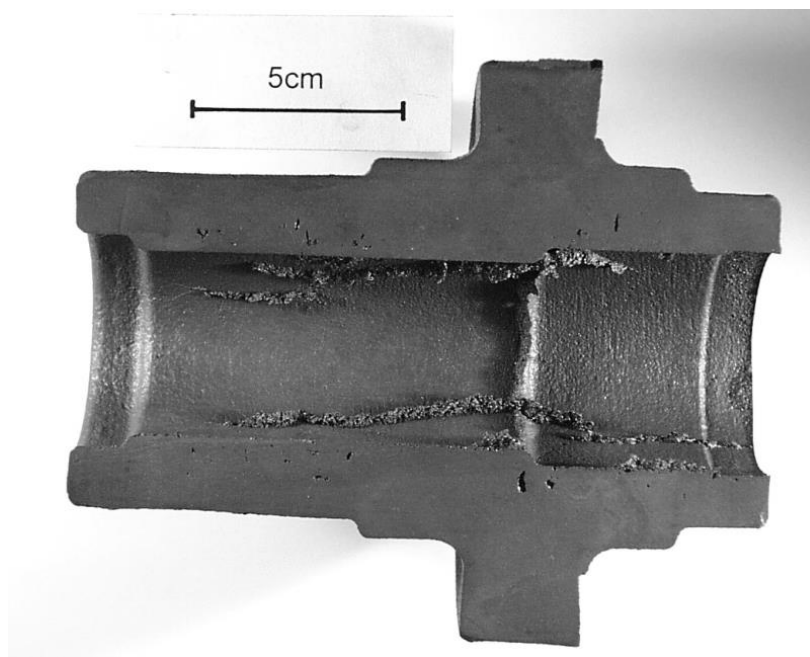


Figura 10 - Defeito de inclusões metálicas nos contornos interiores de um fundido [19].

A calor libertado, pelo metal líquido, gera um gradiente térmico no refratário, afetando a sua expansão térmica e criando tensões internas. A expansão do quartzo, uma consequência da transformação reversível do quartzo a 573 °C, origina tensões compressivas nas camadas superficiais do macho, que potenciam a formação de defeitos como inclusões metálicas. Tensões de tração na fronteira entre a camada aquecida e o interior, relativamente, frio. Se as tensões não forem absorvidas pelo macho, causarão a separação das camadas termicamente diferentes [18, 19].

O defeito de inclusões metálicas é principalmente afetado pelo comportamento a alta temperatura do ligante, como resistência à tração e

termoplasticidade, como pela molhabilidade e condutividade térmica do refratário. Os fatores decisivos para a ocorrência de inclusões metálicas são [19, 20]:

- O tamanho e distribuição dos grãos - um alto nível de uniformidade, permite que todos os grãos sofram a transformação ao mesmo tempo, originando tensões;
- A intensidade de compactação - quanto maior, maior será a densidade de compactação, e logo maiores tensões;
- Material base - influência a tendência para a formação de defeitos, pela uniformidade da expansão, como também a sua condutividade térmica;
- Aditivos - diminui as tensões, suprime a expansão da sílica devido à sua maior termoplasticidade;
- Temperatura de vazamento - quanto maior, mais rápido será a conversão da sílica, e maiores serão as tensões no macho.

Alternativamente as medidas para prevenir a formação do defeito são [19, 20]:

1. Uma distribuição homogênea da conversão da sílica através de uma distribuição de tamanhos de grão menos uniforme;
2. Uma intensidade de compactação mais reduzida;
3. O uso de um material base com maior condutividade térmica, que reduz os gradientes de tensões;
4. O uso de aditivos, minerais ou orgânicos.

3.4.4. Sinterizações

Um defeito comum entre todas as fundições de areia, mas quanto menor for as temperaturas empregues, como na fundição de alumínio, menor será a probabilidade de ocorrência do defeito [3, 21].

O defeito ocorre principalmente nas espessuras mais grossas de grandes fundidos, mas também pode ocorrer nos pontos de maior temperatura, como nos ataques do sistema de alimentação. Se o metal líquido poder facilmente penetrar a areia, pelos espaços entre os grãos, resultará numa superfície muito rugosa [3, 21].

A aparência característica é de crostas de areia finas, em alguns pontos da superfície do fundido (ou nas superfícies formadas pelos machos), como também pode revelar-se como uma camada de areia fina que cobre todo o fundido, como se observa na *figura 11*. Estas crostas são difícil remoção, não sendo possível com granalhagem, mas sim por ação de um martelo pneumático [3, 21].

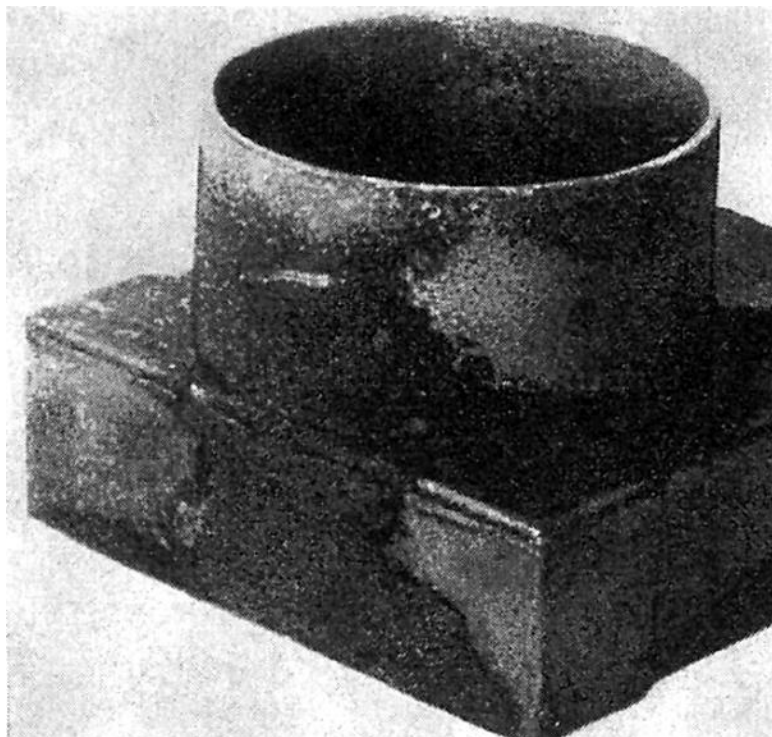


Figura 11 - Defeito de sinterizações num fundido de ferro fundido lamelar, devido a impurezas na areia de quartzo usada [21].

Existem várias possíveis causas para o fenómeno, estando entre elas [3, 21]:

- A compactação não uniforme da areia - possibilita a penetração do metal, nos espaços mal compactados;
- O tamanho do grão da areia ser muito grande - aumenta os espaços entre os grãos, facilitando a penetração do metal;
- A pressão metalostática estar muito alta - aumenta a pressão do metal no interior da cavidade moldante, facilitando a penetração do metal;
- A temperatura de vazamento ser muito alta - promove reações químicas entre o refratário e o metal;
- A temperatura de fusão do material de moldação base - facilita a ocorrência de reações metal/areia.

As medidas preventivas do defeito passam por [3, 21]:

1. Testar a densidade da areia de macho, a sua distribuição granulométrica, a sua permeabilidade, e o seu desempenho à sinterização;
2. Verificar a proporção de finos na areia de machos, reduzindo a quantidade de ligante necessário;
3. Assegurar que a compactação é uniforme, prevenindo diferenças locais no macho;
4. Prevenir temperaturas de vazamento excessivas, como também pressões metalostáticas elevadas;
5. Utilizar um revestimento adequado para as faces em risco;

3.4.5. Inclusões de Areia

Este defeito apresenta-se como partículas de areia, na superfície do fundido, ou permanentemente incluídas na estrutura do mesmo. No caso de areia não for suficientemente compactada ou endurecida, partículas de areia podem ser raspadas e permanecerem soltas na cavidade moldante. O defeito é difícil de diagnosticar, pois a natureza da sua formação, o desgaste pelo fluxo metálico, separa o ponto de ocorrência do de origem [3, 22].

As inclusões de areia são um dos defeitos mais comuns na fundição de areia. O defeito pode surgir durante o enchimento da moldação, em que o fluxo metálico causa abrasão nas paredes, provocando esforços termomecânicos. As tensões compressivas e de corte geradas podem conduzir, à rutura de grãos de areia individuais, ou ao arrancamento de secções maiores. Quando uma grande secção de areia é removida, uma protuberância metálica irá aparecer no fundido [3, 22].

Este defeito normalmente é acompanhado por libertação de monóxido de carbono (CO) e ocorrência de inclusões de óxidos. As inclusões de areia em combinação com inclusões de óxidos e de escória, podem permanecer sob a superfície do fundido e só serem reveladas após a etapa de acabamentos [3, 22].

Existem várias causas para a ocorrência de inclusões, entre elas [3, 22]:

- Moldação - se secções de areia forem rompidas em qualquer fase do processamento, ou se a compactação for desigual;
- Macharia - machos com pouca resistência à flexão, ou com muitos desalinhamentos;
- Vazamento - enchimento muito rápido ou muito demorado, ou a colher muito acima da bacia de enchimento.

Para remediar estas causas, existem as seguintes medidas [3, 22]:

- Moldação - soprar as cavidades moldantes, ou usar agentes desmoldantes nos moldes;
- Macharia - aumentar a resistência à flexão com mais ligante, ou assegurar a uniformidade da compactação e da gaseificação;
- Vazamento - evitar impactos fortes do fluxo metálico em paredes da moldação, ou melhorar a distribuição do fluxo pelos ataques do sistema de alimentação.

4. Metodologia Experimental

Para eliminar, ou reduzir, a ocorrência dos defeitos de bolhas, decidiu-se remover a etapa de pré-pintura, pelas razões salientadas no *capítulo 2.5*. Após resolver os defeitos de bolhas, apareceu outros defeitos como sinterizações e inclusões metálicas, nos interiores da culassa, que juntamente com os defeitos de macho partido promoveu a substituição do aditivo da areia de macho (areia de cromite) por areia de bauxite.

No *capítulo 2.5*, indicou-se que o custo adicional da areia de bauxite teria que ser compensado de alguma forma, sendo necessário a alteração a nível do processo de fabrico. No processo certas operações devem ser eliminadas ou simplificadas para retirar benefícios financeiros da sua modificação.

Para direccionar o foco dos ensaios a realizar, foram analisadas várias possibilidades. Na escolha das alternativas foram considerados os requisitos estabelecidos, na caracterização do problema, detalhados no *capítulo 2.5*. Todas as alternativas estudadas estão detalhadas na *tabela 2*.

Tabela 2 - Apresentação das alternativas consideradas para os ensaios.

	Exequibilidade	Custo	Benefício	B/C
1	Difícil	30 %Bauxite	Granalhadora Manual	1,96
2	Menos difícil	100 %Bauxite		0,33
3	Satisfatório	30 %Bauxite	OMD 4 Faces + Gran. Esp.	5,89
4	Mais fácil	100 %Bauxite		1

As alternativas, expostas na *tabela 2*, foram estudadas de acordo com a sua exequibilidade, ou seja, a facilidade com que podem ser implementadas no processo, a opção que trará custo, como também a opção que trará benefício. O fator decisivo entre as alternativas será o B/C, o indicador de eficiência considerado.

Na primeira alternativa, considerou-se uma substituição direta de bauxite por cromite, ou seja 30 %bauxite (em base de areia de sílica). A operação que se optou por eliminar é a da granalhadora manual, abordada no *capítulo 2.4.4.*, pois espera-se uma sanidade da peça suficiente para tal. Uma análise de B/C, revela que o investimento (**Custo**) efetuado, quando associado com o benefício, retorno ao processo um lucro em 96 %.

Na segunda alternativa foi considerado, que uma mistura de areia de macho com 100 %bauxite seria necessária para reduzir os defeitos. Se considerada com a eliminação da mesma operação, que a primeira alternativa, então o B/C seria de 0,33, e o projeto não seria rentável.

A terceira alternativa em vez da eliminação da granalhoradora manual, considera-se, a eliminação da operação da OMD e da granalhadora específica (abordadas no *capítulo 2.4.4.*), sendo expectável um bom acabamento superficial nas zonas dos machos camisa. Mantendo uma mistura de areia com 30 %bauxite, o B/C é 5,9, e logo muito mais rentável que as alternativas anteriores.

A razão porque ambas as operações de OMD e granalhagem específica são consideradas, é pelo facto de a última requer a execução da primeira. A operação de granalhagem específica tem como objetivo a limpeza do interior

da culassa. Esta operação é a que mais tempo demora, criando estrangulamento na etapa de acabamentos. Antes desta operação, é necessário executar o facejamento de quatro superfícies da culassa, para que a superfície exterior esteja limpa de areias e rebarbas que possam ser projetadas para o interior.

Como é expectada maior sanidade no interior da culassa, com o uso da areia de bauxite, a operação de granalhagem específica, é considerada para eliminação, removendo o estrangulamento mencionado, e aumentando a produtividade global da etapa de acabamentos. Como a operação de OMD só é executada por causa da granalhagem específica, esta também é considerada para eliminação, podendo a remoção de rebarbas e areias serem facilmente realizada na operação de fresagem, abordada no *capítulo 2.4.4*.

A quarta alternativa considera os benefícios da terceira alternativa, mas com o custo de utilizar uma mistura de areia com 100 %bauxite. O B/C mantém-se em 1, e concluiu-se a alternativa não traria benefícios para processo.

4.1. Planificação

Todos os ensaios foram realizados em condições de trabalho reais, pois a sua simples implementação o permitia. As alterações, das variáveis do processo, foram sinalizadas, e especial atenção foi tomada desde a conceção dos machos até ao fim da linha de acabamentos.

As variáveis dos ensaios realizados, são a quantidade de bauxite que se adiciona à mistura de areia, e as operações que devem ser eliminadas ou reduzidas, no processo de fabrico. Na *tabela 3*, expõe-se por ensaio as variáveis e parâmetros.

Tabela 3 - Apresentação da variáveis e ações dos ensaios.

	% Bauxite	Ação
Ensaio 0	0	Eliminar a etapa de pré-pintura
Ensaio 1	30	Substituir areia de cromite pela de bauxite
Ensaio 2	50	Aumentar quantidade de areia de bauxite; Eliminar etapas OMD 4 Faces e Granalhagem específica
Ensaio 3	50	Mantendo os parâmetros do ensaio 2; Aumentar 15 % resina

Na *tabela 3* estão sintetizados os ensaios que foram efetuados, com a quantidade de areia de bauxite (% Bauxite) indicada, como também a ação tomada nesses mesmo ensaio.

O ensaio 0, não foi considerado como uma alternativa viável, pois a sua realização pretendia determinar a influência sobre os defeitos de bolhas. A quantidade de bauxite em 0 %, é representativo do facto de não se ter alterado o aditivo da areia de macho, ou seja, esta foi misturada com 30 % de areia de cromite. No ensaio realizado os machos camisa não receberam a pré-pintura manual, abordada no *capítulo 2.4.2*. Esta alteração só necessitou da notificação dos operadores intervenientes, sem que outras medidas adicionais fossem tomadas.

O ensaio 1 foi realizado de acordo com a alternativa 3 da *tabela 2*, substituiu-se o aditivo da areia, cromite, por areia de bauxite. Neste ensaio não foi analisado a influência da eliminação das operações de acabamentos, de modo a isolar a influência da areia de bauxite.

No ensaio 2, devido aos resultados do ensaio 1, detalhados no *capítulo 6.2.*, decidiu-se aumentar a quantidade de bauxite na mistura de areia, de 30 para 50 %bauxite. Neste ensaio já se retirou as operações dos acabamentos, abordadas na alternativa 3 da *tabela 2*.

No ensaio 3, devido ao fato que durante o fabrico dos machos para o ensaio 2, a quantidade de machos sucitados foi superior à de série, foi

considerado aumentar a quantidade de resina em, aproximadamente, 15 %. Fora as alterações assinaladas, foi mantido os mesmos parâmetros do ensaio 2.

4.2. Análise de Defeitos

Em cada ensaio foi retirada dois fundidos para estudar a sanidade das passagens criadas pelos machos. Para realizar o estudo, dois cortes foram efetuados o mais próximo possível dos planos assinalados a vermelho na *figura 12*.

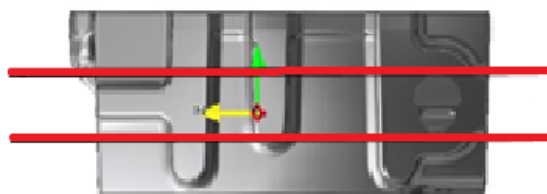


Figura 12 - Localização dos cortes, referente à superfície lateral da culassa.

Os machos camisa localizam-se em dois planos distintos, encontrando-se o macho camisa superior num, enquanto os quatro machos camisa inferiores encontram-se noutro. Os cortes são efetuados de modo a que seja possível observar a superfície do fundido que está em contacto direto com os machos camisa. O resultado final são quatro secções, expostas no *capítulo 5.1*.

O controlo da sanidade, em si, já é efetuado durante a etapa de acabamentos, exposta no *capítulo 2.4.4.*, através do controlo visual por vídeo endoscópico. Este controlo serve como uma garantia adicional para a sanidade dos interiores da culassa que são mais difíceis de aceder, como as passagens reproduzidas pelos machos camisa. Como o ensaio é de natureza destrutiva, e pode ser assegurado, de forma menos extensa, pelo controlo visual anteriormente referido, decidiu-se efetuar este controlo só em duas peças por ensaio.

5. Apresentação de Resultados

Neste capítulo estão expostos os resultados obtidos, de acordo com a metodologia abordada no *capítulo 4*.

É de salientar que nos ensaios 1 e 2, a nível da macharia, houve muitos machos sucitados. A rejeição de machos deveu-se, ou a má aglomeração da areia, o macho desfazendo-se com o seu manuseamento, ou por fratura do macho. O nível de machos sucitados, exigiu o aumento de resina, assinalado no ensaio 3, no *capítulo 4.1*.

5.1. Inspeção visual

Nas secções de corte efetuadas, avaliou-se a sanidade interior das peças, pela presença de defeitos, como inclusões metálicas e sinterizações. Nas *figuras 13, 14, 15 e 16*, apresentam-se os defeitos em cada um dos ensaios.

5.1.1. Ensaio 0

O resultado do controlo visual efetuado nas peças do ensaio 0 estão representados na *figura 13*.

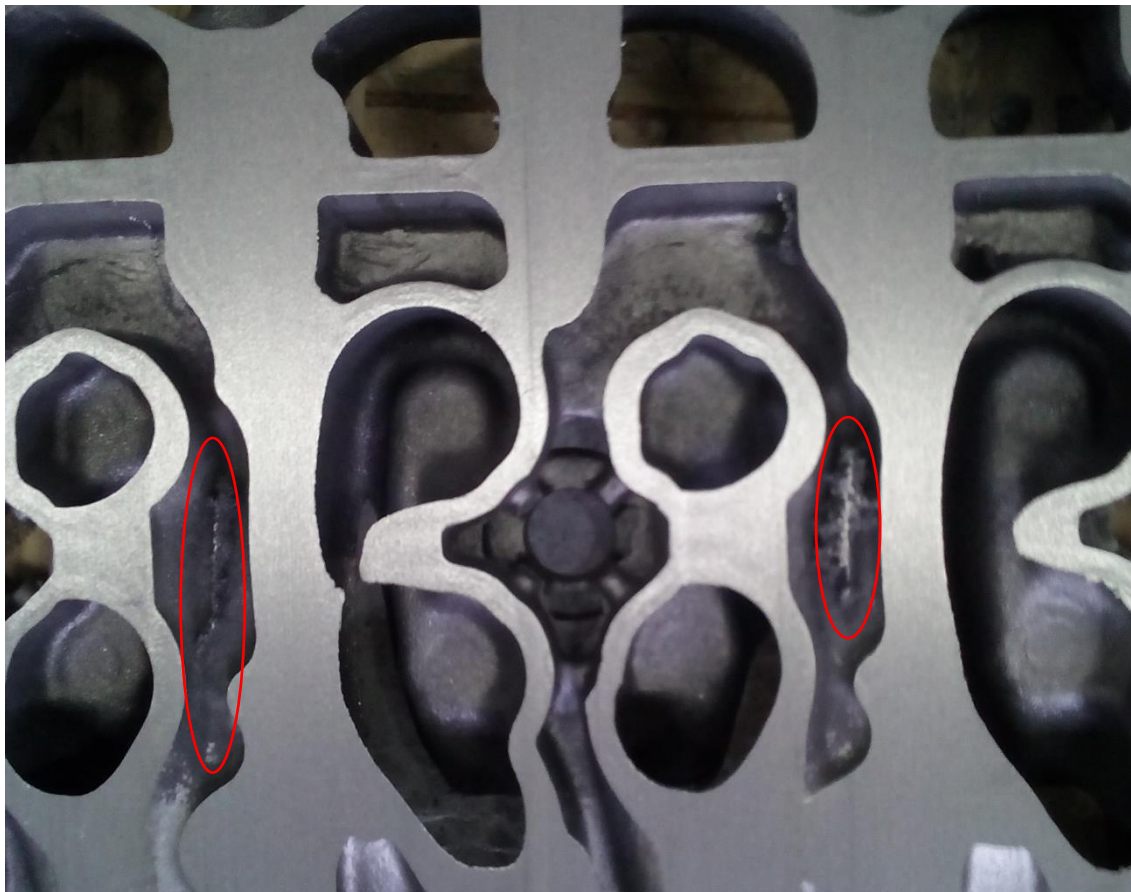


Figura 13 - Imagem representativa da inspeção visual realizada no ensaio 0.

Na *figura 13* é possível observar um defeito de inclusão metálica (esquerda) e um de sinterização (direita), destacados com elipses a vermelho. Os defeitos encontram-se na superfície de contacto entre o fundido e os machos camisa. A ocorrência simultânea dos defeitos evidencia a falta de proteção que os machos possuem, contra as altas temperaturas sofridas durante o vazamento.

5.1.2. Ensaio 1

O resultado do controlo visual efetuado nas peças do ensaio 1 estão representados na *figura 14*.

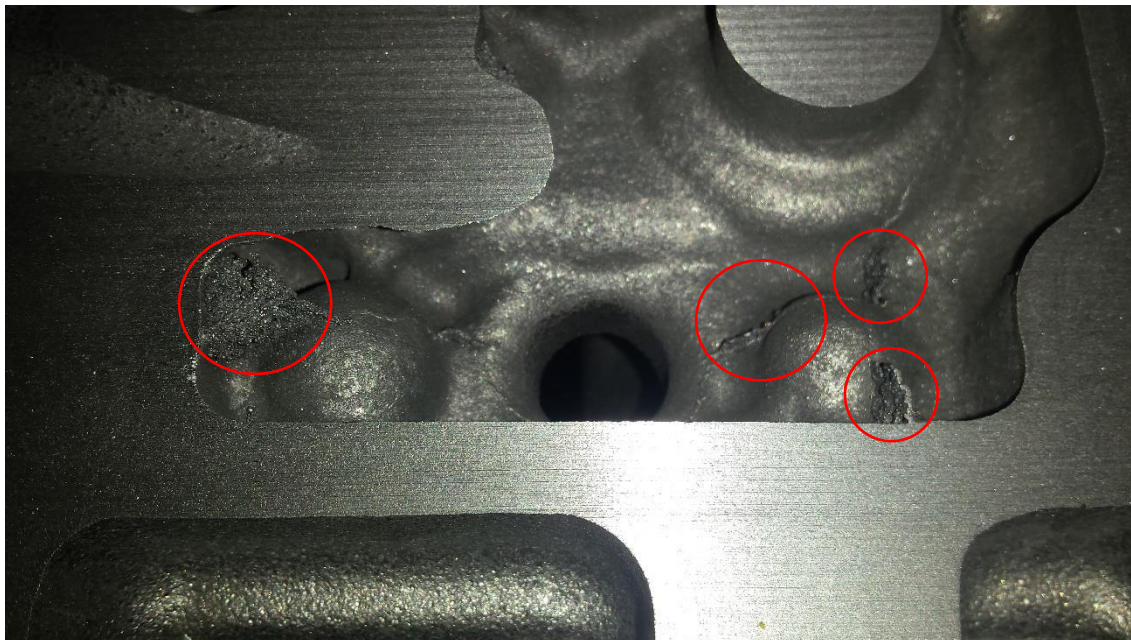


Figura 14 - Imagem representativa da inspeção visual realizada no ensaio 1.

Na *figura 14* é possível observar um defeito de sinterização (esquerda) e vários de inclusões metálicas (direita), destacados com círculos a vermelho. O número observado de defeitos de inclusões metálicas demonstra uma considerável severidade, como também a insuficiência da proteção às temperaturas altas da areia de bauxite. O defeito de sinterização, aparenta ter sido promovido pela ocorrência de um defeito de inclusão metálica, que se encontra à sua direita. A inclusão metálica, causada pela fratura do macho, enfraqueceu a areia na zona da fratura, contra o fluxo metálico, possibilitando a formação do defeito de sinterização.

5.1.3. Ensaio 2

O resultado do controle visual efetuado nas peças do ensaio 2 estão representados na *figura 15*.

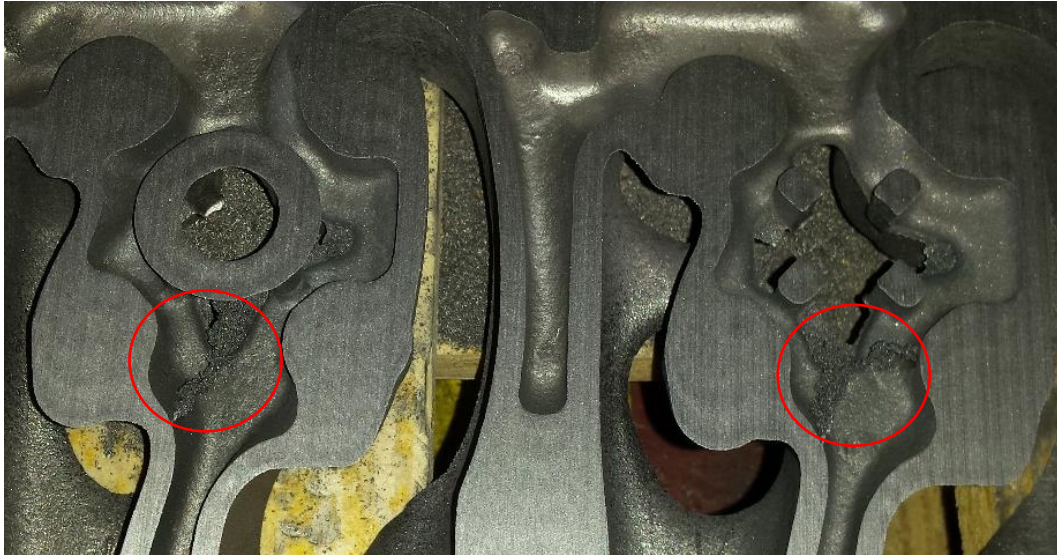


Figura 15 - Imagem representativa da inspeção visual realizada no ensaio 2.

Na *figura 15* é possível observar vários defeitos de inclusões metálicas, destacados com círculos a vermelho. A ausência de defeitos de sinterização, demonstra que o aumento da quantidade de areia de bauxite fornece mais proteção às temperaturas.

5.1.4. Ensaio 3

O resultado do controlo visual efetuado nas peças do ensaio 3 estão representados na *figura 16*.

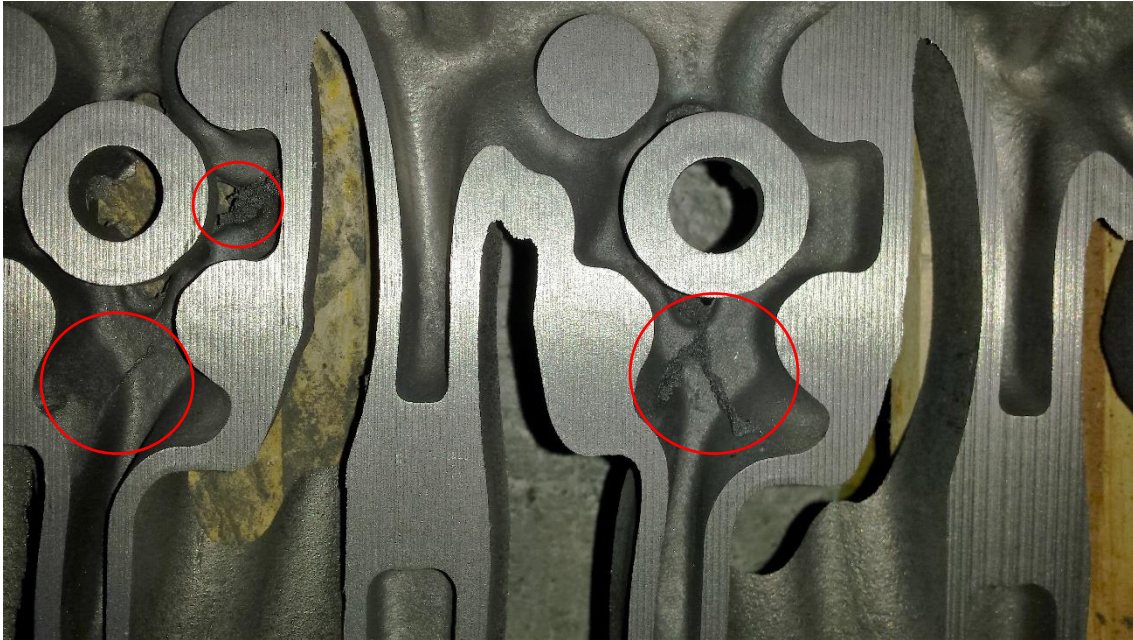


Figura 16 - Imagem representativa da inspeção visual realizada no ensaio 3.

Na *figura 16* é possível observar vários defeitos de inclusões metálicas, destacados com círculos a vermelho. Os defeitos aparentam ser de menor severidade do que na *figura 15*, sendo possivelmente explicados pela estabilização do processo do fabrico com a quantidade de areia de bauxite.

5.2. Análise de Sucata

Na separação entre as peças defeituosas e as sãs, o operador que as observa classifica-as de acordo com o defeito mais proeminente. Na *tabela 4* apresenta-se a categorização das peças defeituosas de acordo com o seu defeito mais crítico.

Tabela 4 - Principais resultados dos ensaios realizados, com os valores relativos de sucata.

Defeitos	Ensaio 0	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Total	-1%	-34%	-67%	-51%
Bolhas	-30%	-76%	-100%	-74%
Inclusões	56%	-61%	-100%	25%
Macho Partido	29%	-84%	-100%	-71%

Na *tabela 4* os defeitos salientados são aqueles que se revelavam prioritários antes do decorrer deste trabalho. O total dos defeitos engloba tanto os defeitos considerados, como os que são, remediáveis, e os que não são influenciados pelas variáveis do trabalho. O defeito de bolha embora esteja resolvido a partir do ensaio 0, este é ainda controlado de forma a garantir que não reincida. O defeito de inclusões engloba a ocorrência, tanto das inclusões de areia, como das inclusões metálicas.

Os valores apresentados, na *tabela 4*, são diferenças relativas entre a quantidade de sucata depois dos ensaios e da série do processo, ou seja, revela o impacto que cada ensaio teve em cada defeito, sendo os valores negativos (a verde), reduções no defeito, e os valores positivos (a vermelho), aumentos no defeito.

6. Discussão de Resultados

Neste capítulo pretende-se analisar os resultados obtidos no decorrer deste trabalho, e que estão expostos no *capítulo 5*.

6.1. Ensaio 0

O ensaio 0 corroborou a noção de que a pintura dos machos camisa influenciava a ocorrência dos defeitos de bolhas, pelas várias razões enunciadas no *capítulo 3.3.6*. Do ensaio também se concluiu que a remoção da pré-pintura em si, não é suficiente para reduzir todos os defeitos, havendo acréscimo dos defeitos de inclusões e macho partido, e a ocorrência de novos, como inclusões metálicas e sinterizações observadas na *figura 13*.

A redução dos defeitos de bolhas, revela que a presença de gases dentro da cavidade moldante diminui. Como a operação de pré-pintura foi eliminada, a fonte dos gases que provocavam as bolhas seria, a humidade e os voláteis da própria tinta usada.

A presença de inclusões metálicas revela que a ausência de pré-pintura enfraqueceu a resistência a altas temperaturas do macho, pois este perde uma barreira de proteção e o fortalecer das ligações, dos grãos de areia, que a adesão da tinta provia.

Os defeitos de sinterização podem influenciar os defeitos de inclusões, assinalados na *tabela 4*, no sentido em que as areia que são removidas pela penetração do fluxo metálico, são arrastadas por este e aglomeram-se em inclusões.

Na *tabela 4* foi registado um aumento no defeito de macho partido. Como abordado no *capítulo 3.4.2*, o impacto do fluxo metálico influencia a ocorrência dos defeitos de macho partido, e por isso pode-se argumentar que, embora não sendo a sua principal função, a tinta (da pré-pintura) teria uma ação de amortecimento contra o embate do fluxo metálico na superfície do macho.

6.2. Ensaio 1

O ensaio 1 demonstrou que a bauxite traz melhorias no desempenho dos machos. Como se pode observar na *tabela 4*, a sucata em modo geral diminui, como também os defeitos que estavam a ser controlados.

O defeito de bolhas diminui ainda mais do que no ensaio 0, sendo esta redução, provavelmente, associada ao maior tamanho de grão da bauxite, que aumenta a sua permeabilidade à passagem de gases.

Defeitos como as sinterizações observadas aparecem, mas com menor frequência, o que resulta numa diminuição em defeitos de inclusões.

Os defeitos de inclusões metálicas, embora presentes são menos pronunciados, devido à maior refratariedade da bauxite, do que a cromite. Ao observar a *figura 14* denota-se que embora os defeitos de inclusões metálicas sejam menores, estes potenciaram a formação de sinterizações.

A forma de grão da bauxite poderá conferir ao macho superior resistência à flexão, pois retira maior proveito da resina presente.

6.3. Ensaio 2

O ensaio 2 comprovou a influência do aumento da quantidade de bauxite. Neste ensaio houve uma maior redução de sucata, do que o ensaio anterior. A nível de sanidade, ainda persiste os defeitos de inclusões metálicas e sinterizações, como se observa na *figura 15*.

Embora não haja defeitos registados, a presença de sucata é devida à ocorrência de outro tipo de defeitos. Os defeitos responsáveis pela sucata, são de natureza remediável, pois são faltas de material que ocorrem em zonas não críticas, para o desempenho do componente, e são reparáveis por soldadura.

Como no ensaio 1, as inclusões metálicas que se formaram aparentam de tamanho reduzido, mas potenciaram a formação de sinterizações.

6.4. Ensaio 3

No ensaio 3 apresenta um sucesso menor, do que quando comparado com o ensaio 2, relativamente à redução de sucata. Os defeitos de inclusões metálicas e sinterizações, observados na *figura 16* aparentam ter reduzido em severidade, em relação aos ensaios anteriores.

Como no ensaio 3 se introduziu mais resina, relativamente aos parâmetros do ensaio 2, pode-se argumentar que este aumento teve alguma influência no aumento de defeitos, em relação ao ensaio 2, como os de bolhas, pois a resina contém voláteis, geradores de gases.

Os defeitos de inclusões metálicas e sinterizações, como anteriormente dito, aparentam ter reduzido em severidade, e de uma forma geral, em frequência.

O aumento de inclusões, embora coincida com o aumento de resina, estes acontecimentos não poderiam estar relacionados, pois o aumento de resina tem o intuito de aumentar a resistência à flexão do macho, e evitar que areias se desagreguem, prevenindo a formação de inclusões. Se o defeito foi esporádico, então a normalização do processo de fabrico, com os novos parâmetros, deve apresentar uma redução nos defeitos de inclusões, caso contrário deve ser prestada especial atenção às etapas de moldação e de vazamento.

O ensaio 3 demonstra menor sucesso, a nível de redução de sucata, do que o ensaio 2. Baseando a decisão somente nos resultados de sucata, o ensaio 2 seria o escolhido. Tomando em conta as razões que levaram à execução do ensaio 3, nomeadamente o aumento da quantidade de macho sucitado durante o ensaio 2, então o risco de obter peças defeituosas por macho partido é demasiado, e os parâmetros do ensaio 3 devem ser seguidos. Ao escolher os parâmetros do ensaio 3, cumpre-se o objetivo pretendido, reduzir a sucata, e assegura-se que não se produz peças defeituosas, com causa em etapas iniciais.

7. Conclusões

Dos resultados deste trabalho é possível concluir que a tinta utilizada para a pré-pintura dos machos camisa, embora fornecesse um melhor acabamento superficial ao interior da culassa, teve influência na formação de defeitos de bolhas, e conseqüentemente foi eliminada. A razão para tal encontra-se no facto de aumentar a quantidade humidade e voláteis presentes, dentro do conjunto de machos.

A areia de bauxite, em quantidades semelhantes, revelou ser um melhor aditivo do que a areia de cromite, ao nível de resistências térmica e à flexão. A sua forma de grão arredondada rentabiliza mais a resina utilizada, permitindo ou reduzir a quantidade de resina (em 30 %), ou aumentar a resistência à flexão. A sua alta refratariedade fornece resistência, a temperaturas elevadas, e a sua baixa expansão térmica, permite melhorar a precisão dimensional no fundido.

Ao aplicar a areia de bauxite como aditivo, a 30 % na mistura de areia de macho, não foi suficiente para reduzir completamente a ocorrência de defeitos, necessitando de aumentar a quantidade de areia de bauxite para 50 %. O emprego da bauxite, em 50 % na mistura de areia de macho, permitiu reduzir a rejeição de fundidos em 51 %, relativamente aos valores de série do processo.

O uso da areia de bauxite, em vez de areia de cromite, forneceu ao interior da culassa um melhor acabamento superficial, e logo maior sanidade. Esta vantagem permitiu a eliminação das operações de acabamentos, nomeadamente, a de OMD de 4 faces e de granalhagem específica, pois esta última já não é tão necessária com o aumento da sanidade do interior da culassa, nem a primeira operação, que só era necessária com a execução da última. A eliminação das operações resultou tanto na redução de custos, como também no aumento da produtividade, e conseqüentemente num aumento de eficiência do processo de fabrico da culassa.

8. Sugestões para Trabalhos Futuros

Com a alteração do aditivo da areia de macho, é sugerido explorar outras variáveis do processo para melhorar a produtividade. A velocidade de enchimento e a temperatura de vazamento, são duas variáveis referidas que detêm influência nos defeitos de sinterizações e inclusões metálicas. Uma hipótese, mais complicada, mas com o seu mérito, seria explorar o uso de arrefecedores a nível dos machos, pois aumentando a condutividade térmica aparente dos machos, poderá reduzir os gradientes de tensões nos mesmos.

9. Referências Bibliográficas

- [1] American Foundry Society. (13 março 2017). *Cores' Role in Casting Design*. Disponível em: <http://www.afsinc.org/content.cfm?ItemNumber=6926>
- [2] J. Campbell, *Complete Casting Handbook - Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design*, 2011, pp. 183-185, 443, 635-641, 920.
- [3] 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.
- [4] Teksid. (17 fevereiro 2017). *Aveiro*. Disponível em: <http://www.teksid.com/it/iron/stabilimenti/aveiro>
- [5] 2CarPros, Inc. (2017, 21 fevereiro 2017). *How A Cylinder Head Works*. Disponível em: <https://www.2carpros.com/articles/how-a-cylinder-head-works>
- [6] Perkins Engines Company Ltd. (3 março 2017). *The role of your cylinder head*. Disponível em: https://www.perkins.com/en_GB/aftermarket/overhaul/overhaul-components/major-components/cylinder-head.html
- [7] Foseco, *Foseco Ferrous Foundryman's Handbook*: Butterworth Heinemann, pp. 151, 167-169, 192, 226-227, 234-235, 2000.
- [8] A. A.-C. Ltd. (14 março 2017). *Core Minerals*. Disponível em: http://www.ashokalcochem.com/global_trading_division.html

- [9] Refractory Engineers, Inc. (27 março 2017). *Foundry Sand*. Disponível em: <http://www.refractoryeng.com/foundry-sand>
- [10] LKAB Minerals. (19 março 2017). *MinSand*. Disponível em: <http://www.lkabminerals.com/Products/MinSand/>
- [11] Tinker Omega. (2013, 5 abril 2017). *The Different Methods of Core Making*. Disponível em: <https://tinkeromega.wordpress.com/2013/10/04/thedifferentmethods ofcoremaking/>
- [12] *ASM Specialty Handbook - Cast Irons*, pp. 163, 1996.
- [13] *Principles of Foundry Technology*, pp. 133 2003.
- [14] Foundry Lexicon. (11 abril 2017). *Cold Box Process*. Disponível em: <http://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/cold-box-process-3202/>
- [15] Corefon International, "Scheda Dati di Sicurezza - Isokote 590," 2010.
- [16] Corefon, "Sheda Tecnica - Isokote 590," 2003.
- [17] F.LLI MAZZON, "Thecnical Data Sheet - Hydro Cover ARP/32.5 HC," 2005.
- [18] Foundry Lexicon. (28 abril 2017). *Scab*. Disponível em: <http://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/scab-2822/?cHash=68b1c2edb1e79aa046b50daa0b398483>
- [19] Foundry Lexicon. (28 abril 2017). *Veining*. Disponível em: <http://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/veining-2472/>
- [20] ASK Chemicals. (29 abril 2017). *Veining: Defect Pattern & Causes*. Disponível em: <http://www.ask-chemicals.com/pt/fundicao/prevencao-de-defeitos/veining.html>
- [21] Foundry Lexicon. (30 abril 2017). *Burnt-on sand*. Disponível em: <http://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/angebrannter-sand-1194/>
- [22] Foundry Lexicon. (30 abril 2017). *Sand Inclusion*. Disponível em: <http://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/sand-inclusion-2817/>