U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

M

Utilização de Areia Regenerada no Fabrico de Machos

AUTOR: João Miguel Fernandes Lapa

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA

À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO em 2022

ORIENTADOR: Professor Doutor Carlos Silva Ribeiro

U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

CANDIDATO	João Miguel Fernandes Lapa	*Código*
TÍTULO	Utilização de Areia Regenerada no Fabrico de Machos	
DATA	25 de Julho de 2022	
LOCAL	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Sala F106 - 10:30h	

JÚRI	*Presidente*	Luís Filipe Malheiros	DEMM/FEUP
	Arguente	Rui Neto	DeMec/FEUP
	Orientador	Carlos Silva Ribeiro	DEMM/FEUP

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador na empresa, o Eng.º João Matos pelo apoio, orientação e incentivo sempre presentes, bem como ao Eng.º João Castro por todo o conhecimento transmitido e presença diária ao longo da realização desta dissertação. Também a todos os colaboradores da Funfrap, com maior relevância para a Eng.ª Marisa, Eng.º Rui, Eng.º Bruno, Mário Jorge, José Matos e Marina por mostrem disponibilidade e orientação constante para que fosse possível a realização deste trabalho.

Ao meu orientador na faculdade, o Professor Doutor Carlos Silva Ribeiro, gostaria de exprimir o meu enorme agradecimento por todos os ensinamentos, experiências e conselhos partilhados ao longo destes anos.

Por último, um grande agradecimento à minha família por todos os sacrifícios que fizeram ao longos dos anos, me permitissem começar esta nova etapa no mundo da engenharia.

RESUMO

A fundição em areia de macho constitui um papel significativo na indústria da fundição, especialmente na produção de componentes em ferro fundido para a indústria automóvel. Durante este processo, uma grande parte da areia de moldação e da areia de macho, irão sofrer processos de recuperação de modo a ser possível a sua reintrodução no sistema, reduzindo assim a quantidade de areia depositada em aterro e os respetivos custos e impacte ambiental associados, como também à diminuição da quantidade e dos custos relativos à compra de novas matérias-primas. Desta forma, e de acordo com o âmbito de realização de dissertação de mestrado em ambiente empresarial, foi realizado um estágio na Funfrap, tendo como principal objetivo a validação da utilização da areia regenerada no fabrico de machos.

Foram então realizados dois provetes para cada uma das 7 misturas (A0, A1, A2, A3, B0, B1, B2, no qual varia a percentagem de areia nova, areia bauxite ou areia regenerada) com o intuito de realizar ensaios de resistência à flexão e analisar se estes resultados são adequados para a utilização da areia regenerada para o fabrico de machos RO_2 (retornos de óleo). Concluindo estes ensaios de resistência à flexão, procedeu-se à fabricação industrial dos machos com a mistura B2 (50% areia regenerada e 50% areia bauxite), e posteriormente ao fabrico da peça final vazada, nomeadamente, blocos de motor 008.

Observou-se assim que a utilização da mistura B2 no fabrico de RO_2 permitiu uma diminuição significativa na quantidade de defeitos superficiais presentes (uma redução de 68% no RO Superior e 32% no RO Inferior), comparativamente com a mistura inicialmente utilizada pela Funfrap de 70% areia nova (sílica) e 30% areia bauxite. Além disso, disso foi realizada a análise dos custos desta substituição da areia nova, pelo que foi possível concluir que a adição de maior quantidade de areia bauxite promove um aumento significativo do custo da mistura de cerca de 52%, e por isso, não apresenta viabilidade económica. No entanto, a realização de novas misturas de areia regenerada com outros tipos de areia ou com menores quantidades de bauxite, mantendo as propriedades dos machos, é uma opção viável futuramente, requerendo assim um maior número de ensaios de modo a propor uma nova mistura com vantagens a nível económico e ambientais.

PALAVRAS-CHAVE

Ferro Fundido, Areia Verde, Processo de Caixa Fria, Areia de Macho, Regeneração de Areia

ABSTRACT

Sand casting plays a significant role in the foundry industry, especially in the production of cast iron components for the automotive industry. During this process, the percentage of the moulding sand and the core sand will undergo recovery processes in order to be possible its reintroduction into the sand system, thus reducing the amount of sand deposited in landfill and the respective costs and associated environmental impact, as well as reducing the amount and costs related to the purchase of new raw materials. In this way, and according to the scope of the realization of the master's thesis in a business environment, an internship was carried out at FunFrap, having as main objective the use of reclaimed sand in the manufacture of cores.

Two specimens for each of the 7 mixtures (A0, A1, A2, A3, B0, B1, B2, in which varies the percentage of new sand, bauxite sand or reclaimed sand) were made in order to perform bending strength tests and analyze if these results are high enough for the use of reclaimed sand for the manufacture of RO2 cores. After concluding these flexural strength tests, the cores were industrially manufactured with the B2 mixture (50% reclaimed sand and 50% bauxite sand), and then the final casting was manufactured, namely engine blocks 008.

It was observed that the use of mixture B2 in the manufacture of RO_2 allowed a significant decrease in the amount of surface defects presente (a reduction of 68% in top RO and 32% in bottom RO), compared to the mixture initially used by Funfrap of 70% new sand and 30% bauxite sand. Besides, the costs of this substitution of the sand were analysed, so it was possible to conclude that the addition of a greater amount of bauxite sand promotes a significant increase in the cost of the mixture of about 52%, and therefore, does not present economic viability. However, the realization of new mixtures of reclaimed sand with other types of sand or with smaller amounts of bauxite, maintaining the properties of the cores, is a viable option for the future, requiring a larger number of tests in order to propose a new mixture with economic and environmental advantages.

KEYWORDS

Cast Iron, Green Sand Casting, Coldbox Process, Core Sand, Regeneration Sand

ÍNDICE

1. Introdução teórica 1

1.1. Contextualização 1

1.2. Objetivos 1

1.3. Motivação 1

1.4. Estrutura do Trabalho 2

2. Descrição da Empresa 3

2.1. Introdução e História da Funfrap-Fundição Portuguesa Sa 3

2.2. Unidade Fabril e Localização 3

3. Síntese Bibliográfica 4

3.1 Fundição em Areia Verde 4

3.1.1. Material Refratário 4

3.1.2. Aditivos 5

3.1.3. Argila 5

3.1.4. Preparação da Areia Verde 6

3.2. Processo de Vazamento “All-In-Core” 7

3.3. Machos 7

3.3.1. Material Refratário 8

3.4. Processo Caixa-Fria 9

3.4.1. Agente de Cura-Amina 10

3.4.2. Mecanismo de Cura 10

3.4.3. Vantagens do Processo de Caixa Fria 11

3.5. Caraterísticas da Areia de Macho 12

3.5.1. Formato do Grão 12

3.5.2. Distribuição Granulométrica 13

3.5.3. Índice de Finura AFS 13

3.5.4. Tamanho do Grão 14
3.5.5. Permeabilidade 15
3.5.6. Tempo de Vida em Bancada e Tempo de Desmoldação 15
3.6. Fabrico de Machos 15
3.6.1. Humidade 16
3.6.2. Temperatura da Areia 17
3.7. Parâmetros de Produtividade no Fabrico de Machos 17
3.7.1. Quebra de Machos 17
3.7.2. Aderência à Caixa de Machos 18
3.8. Defeitos com Origem nos Machos 18
3.8.1. "Veining" 18
3.8.2. Penetrações de Metal 18
3.8.3. Desprendimentos 18
3.8.4. Presença de Gases 19
3.9. Pintura dos Machos 19
3.10. Processo de Regeneração da Areia 20
3.10.1. Tecnologias da Regeneração da Areia 20
3.10.2. Eficiência do Processo de Regeneração 26
4. Metodologia Experimental 28
4.1. Caraterização das Areias 28
4.1.1. Análise Granulométrica e Índice de Finura 28
4.1.2. Percentagem de Argila Ativa 30
4.1.3. Percentagem de Carbono 31
4.1.4. Percentagem de Humidade 31
4.1.5. Argila AFS 32
4.1.6. Percentagem de Voláteis 33
4.1.7. Coeficiente de Angularidade 34

4.1.8. Perda ao Fogo 35

4.2. Caraterização dos Provetes de Areia de Macho 36

4.2.1. Resistência à Flexão e Vida em Bancada 37

5. Apresentação e Discussão de Resultados 38

5.1. Caraterização das Areias 38

5.2. Caraterização dos Provetes de Macho 41

5.3. Ensaio Industrial com a Mistura B2 50

5.3.1. Análise de Custos 57

5.3.2. Previsão para o Futuro 57

6. Conclusões 58

7. Referências Bibliográficas 60

Anexos 62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Localização e respetiva vista da Funfrap.

Figura 2- Influência da relação parte I/parte II no tempo de vida de bancada e da resistência mecânica da areia [6].

Figura 3- Mecanismo de cura através da reação da resina fenólica (Parte I) com o poliisocianato (parte II) na presença da amina [9].

Figura 4- Variação da superfície específica de 1 kg de areia de sílica em relação ao seu tamanho médio AFS e ao seu grau de esfericidade "K" (Esferoidais: K=1; Arredondadas: K= 1.2-1.4; Angulares: K>1.4) [2].

Figura 5 – Influência da % de humidade presente na areia vs resistência à flexão obtida imediatamente após a cura e após 1 hora [6].

Figura 6 – Influência da temperatura da areia base na vida em bancada e resistência à flexão do macho do processo coldbox [6].

Figura 7- Equipamento de regeneração primária utilizado na Funfrap

Figura 8- Equipamento de regeneração secundária (à esquerda); pneumático de disparo da areia (à direita) utilizados na Funfrap

Figura 9- Comparação ilustrativa de um grão de areia regenerado mecanicamente e não regenerado [13].

Figura 10- Tambor rotativo com os cilindros utilizados na etapa de regeneração secundária na Funfrap [6].

Figura 11- Forno rotativo com aquecimento direto (A) e de aquecimento indireto (B) [14].

Figura 12- Exemplo ilustrativo de um forno de leito fluidizado com câmara de combustão imersa [14].

Figura 13- Fotografia do sistema utilizado no ensaio de distribuição granulométrica: TYLER Ro-Tap de agitação de peneiros e série de peneiros ASTM E 11.

Figura 14- Conjunto de equipamentos utilizados na determinação do teor de argila ativa (à esquerda); ultrassons utilizadas (à direita).

Figura 15- Equipamento Leco CS230 utilizado no ensaio de obtenção da percentagem de carbono.

Figura 16- Equipamento METTLER TOLEDO HE53 utilizado no ensaio de obtenção da percentagem de humidade presente na areia.

Figura 17- Balança analítica PIONEER OHAUS PA4102C (à esquerda); Autoclave DIETERT DETROIT NO. 534-A (à direita).

Figura 18- Mufla OCRAS ZAMBELLI ZA.

Figura 19- Equipamento Georg Fischer POF.

Figura 20- Mufla utilizada no ensaio de perda ao fogo.

Figura 21- Misturador Felino (a); Parte I e Parte II do sistema de resinas (b).

Figura 22- Gerador de DMEA (A), molde dos provetes de macho (B), máquina de disparo dos provetes (C).

Figura 23- Equipamento de ensaio da resistência à flexão dos provetes de macho.

Figura 24- Amostras da areia de sílica (A), areia de bauxite (B), areia pré-regenerada (C) e areia regenerada (D) observadas com auxílio de microscópio ótico.

Figura 25- Distribuição Granulométrica da areia regenerada e pré-regenerada.

Figura 26- Resistência à Flexão medidos nos provetes no imediato (3 minutos), 0.5 horas, 1 hora e 2 horas após a realização de cada mistura

Figura 27- Resistência à Flexão após 24 Horas para cada um dos tempos iniciais de 0.5 horas, 1 hora e 2 horas após a realização dos provetes para cada mistura

Figura 28- Variação dos valores da resistência à flexão (Delta-Δ) obtidos para as misturas realizadas

Figura 29- Comparação da resistência à flexão realizada imediatamente, 0.5, 1 e 2 horas em relação com os valores homólogos após 24 horas: a) mistura A0; b) mistura A1; c) mistura A2

Figura 30- Comparação da resistência à flexão realizada imediatamente, 0.5, 1 e 2 horas em relação com os valores homólogos após 24 horas: a) mistura A3; b) mistura B0; c) mistura B1

Figura 31-Comparação da resistência à flexão para a mistura B2 realizada imediatamente, 0.5, 1 e 2 horas em relação com os valores homólogos após 24 horas

Figura 32- Análise do efeito da utilização da areia branca comparativamente com areia regenerada, para a mesma percentagem de bauxite (70%) para os provetes de 24 horas: a) Imediato; b) 24 Horas

Figura 33- Análise do efeito da utilização da areia branca comparativamente com areia regenerada, para a mesma percentagem de bauxite (50%): a) Imediato; b) 24 Horas

Figura 34- Misturador FORDATH 3 utilizado para a mistura.

Figura 35- Exemplos de machos produzidos no qual ocorreram problemas de enchimento do molde/quebra dos machos.

Figura 36- Exemplos de Machos 008 produzidos com a mistura de 50% Bauxite e 50% Areia Regenerada: a) RO inferior; b) RO Superior.

Figura 37- Exemplos de Machos 008 produzidos com a mistura de 50% Bauxite e 50% Areia Regenerada após pintura: a) RO inferior; b) RO Superior.

Figura 38- Caixa de moldação utilizada para realizar o vazamento da peça 008

Figura 39- Bloco de motor 008: a) Vista Isométrica; b) Vista superior: RO inferior (azul); RO superior (laranja).

Figura 40- Bloco de motor 008: a) RO inferior (azul); b) RO superior (laranja).

Figura 41- Exemplos de defeitos encontrados em blocos de motor 008: a) penetração metal no macho; b) sinterização/inclusões de areia.

Figura 42- Secção cortada de um bloco de motor 008: a) e b) inclusão de areia; c) penetração de metal em fissura do macho.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Diferentes formatos e esfericidades possíveis de um grão de areia [2].

Tabela 2- Valores obtidos no processo de regeneração para os diferentes tipos de processos, equipamentos e areias [7].

Tabela 3 – Sequência de peneiros utilizados nos ensaios de determinação da distribuição granulometria e do índice de finura da areia regenerada

Tabela 4- Valores de coeficiente de angularidade, índice de finura e perda ao fogo das areias analisadas.

Tabela 5- Valores de argila AFS, humidade, carbono, argila ativa e voláteis da areia regenerada utilizada.

Tabela 6- Misturas e respetivas composições de areias.

Tabela 7- Medição da massa média dos RO produzidos pela mistura inicial e pela nova mistura utilizada

Tabela 8- Contabilização do número e tipos de defeitos observados nos blocos de motor 008 produzidos

Tabela 9- Aumento de custo associado à utilização da nova mistura B2

ÍNDICE DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIA

AFS - American Foundry Society

ASTM - American Society for Testing and Materials

ISO - International Organization for Standardization

DMEA – Dimetiletilamina

TEA - Trietilamina

TMA – Trimetilamina

1. INTRODUÇÃO TEÓRICA

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A presente Dissertação foi desenvolvida no âmbito do Mestrado em Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. O projeto foi desenvolvido em ambiente industrial, na Funfrap, empresa ligada à produção de peças em ferro fundido para a indústria automóvel. Com a atual diminuição de vendas da indústria automóvel a nível mundial provocada pela pandemia Covid-19 e pela pressão política relativamente à diminuição dos impactes ambientais bem como à necessidade da prática de uma economia circular, é necessário a redução ao máximo no consumo das matérias-primas utilizadas durante o processo, mais precisamente na areia, uma vez que a Funfrap consome diariamente cerca de 100 toneladas desta matéria-prima. Desta forma, este trabalho incidiu na avaliação do reaproveitamento da areia regenerada no fabrico de machos.

1.2. OBJETIVOS

Este trabalho teve como principal objetivo analisar o comportamento na utilização da areia nova comparativamente com areia regenerada no fabrico de machos para o componente RO_2, através do estudo das caraterísticas e propriedades mecânicas. Assim, os principais objetivos definidos para este trabalho foram:

- Realização de provetes de macho obtidos com diferentes misturas de areia regenerada, areia nova e de areia bauxite;
- Análise das propriedades mecânicas dos provetes de macho produzidos e comparação com as propriedades obtidas para a mistura atualmente utilizada;
- Testar o fabrico e utilização do macho obtido com a mistura escolhida e análise da presença de possíveis defeitos nas peças produzidas;
- Analisar a viabilização económica da utilização da areia regenerada no fabrico de machos.

1.3. MOTIVAÇÃO

Cada vez mais em qualquer setor industrial é essencial ter em conta não só os custos dos processos como também os impactes ambientais associados a esses mesmos processos. Desta forma, a utilização da areia regenerada no fabrico de machos é de grande interesse, uma vez que permite reduzir os custos associados à compra de novas matérias-primas bem como à minimização dos impactes ambientais e respetivos custos (associados à deposição das areias em aterro). Assim este trabalho foi ao encontro

destes fatores económicos e ambientais associados à prática de uma economia circular, tendo sempre em consideração a manutenção das propriedades mecânicas necessárias e requeridas para a utilização dos machos durante o processo de fundição.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho realizado está dividido em 6 capítulos. No primeiro capítulo é realizada a introdução e enquadramento à Dissertação através de uma apresentação dos objetivos da mesma. No segundo capítulo é designada a empresa onde foi possível ter realizado o trabalho desta Dissertação. O terceiro capítulo é referente à síntese bibliográfica necessária para o presente trabalho, relativamente à fundição em ferro fundido com utilização de areias de moldação, aos diferentes tipos de areias e as suas principais caraterísticas, ao processo de fabrico de machos e o processo de regeneração da areia, no qual incide no principal objetivo deste trabalho. No quarto capítulo estão referidos os ensaios práticos realizados na empresa. O quinto capítulo corresponde à discussão dos resultados obtidos, quer para os diferentes tipos de areias quer relativo à produção dos machos e respetivo vazamento da peça 008. Por último, no capítulo 6, estão presentes as conclusões nos quais são sumariados todos os pontos fulcrais que foram obtidos na realização desta Dissertação.

2. DESCRIÇÃO DA EMPRESA

2.1. INTRODUÇÃO E HISTÓRIA DA FUNFRAP-FUNDIÇÃO PORTUGUESA SA

Esta dissertação foi desenvolvida Funfrap, empresa ligada à indústria da fundição para o setor automóvel, que se dedica à produção de componentes automóveis em ferro fundido cinzento. A empresa, com sede na cidade de Aveiro, é pertencente ao grupo multinacional brasileiro Tupy (desde 2021), sediado em Joinville, Santa Catarina (Brasil). O grupo Tupy para além da sede no Brasil tem também unidades fabris em Mauá (São Paulo), Betim (Minas Gerais), nas cidades de Saltillo e Ramos Arizpe (México) e Aveiro (Portugal). Além disso, a Tupy tem escritórios no EUA e Alemanha. Este grupo está presente no mercado da indústria automóvel, infraestruturas, agricultura e geração de energia [1].

2.2. UNIDADE FABRIL E LOCALIZAÇÃO

A Funfrap (Figura 1) está situada na cidade da Aveiro (freguesia de Cacia) a 70km da cidade do Porto, a 16km do porto marítimo de Aveiro e a 80km do Aeroporto Internacional de Francisco Sá Carneiro.

Figura 1- Localização e respetiva vista da Funfrap.

3. SÍNTESE BIBLIOGRÁFICA

3.1 FUNDIÇÃO EM AREIA VERDE

A fundição em areia corresponde a uma versatilidade de diferentes processos pelo que é responsável por cerca de 70% da produção mundial de fundidos, sendo por isso atribuídos como principais atrações:

- Possibilidade de fundição de variadas ligas metálicas [2];
- Versatilidade na produção de peças com variadas geometrias e dimensões;
- Aplicação a séries de qualquer dimensão;
- Baixos custos de processamento [2].

A designação de areia verde está relacionada com o facto de se introduzir água durante o processamento. Desta forma, os principais constituintes da areia verde são o material refratário granular (areia propriamente dita), o ligante e os aditivos. Os requisitos na utilização deste tipo de areia são:

- Apresentar fluidez suficiente de modo a preencher todos os detalhes da moldação;
- Ter capacidade de deformação ligeira com o intuito de facilitar e possibilitar a desmoldação da placa molde simultaneamente com resistência mecânica suficiente para suportar a pressão metaloestática durante o vazamento do metal;
- Possuir permeabilidade suficiente para permitir o escoamento do ar e gases gerados durante o processo de vazamento de modo a não promover formação de porosidades nas peças;
- Exibir elevada estabilidade térmica uma vez que durante o vazamento vai ocorrer uma rápida expansão superficial no contacto areia/metal líquido, podendo por isso promover a formação de fissuras superficiais [2].

  Além destas vantagens referidas, também é possível realizar a recuperação e reutilização sucessiva da areia, apresenta um baixo custo associado à sua produção bem como simplicidade dos equipamentos, elevada versatilidade de materiais a fundir como também pela capacidade de obtenção de fundidos de qualquer geometria e dimensão.

3.1.1. Material Refratário

O refratário granuloso com maior gama de aplicação é a areia de sílica (areia branca), pelo que esta deve apresentar como caraterísticas boa estabilidade térmica e dimensional a elevadas temperaturas, não ser reativa quimicamente e possuir uma

reduzida molhabilidade pelo banho metálico, apresentar uma temperatura de fusão superior à temperatura de vazamento, não promover a formação de gases, apresentar uma composição química homogénea e uniforme e elevada compatibilidade com os restantes constituintes da areia [3].

3.1.2. Aditivos

Os aditivos mais vulgarmente utilizados são os carbonosos, nomeadamente o pó de carvão, com teores a rondar os 3% (razão pelo qual a areia verde no final da mistura apresentar uma cor preta). Assim, quando o metal entra na cavidade moldante, este aditivo por ser uma substância combustível, vai entrar em combustão parcial promovendo a formação de uma atmosfera redutora no qual diminui a reação do metal com a moldação. Para além disso, a utilização do pó de carvão tem como vantagens o amortecimento da dilatação da areia através da libertação de gases voláteis, permite um melhor acabamento superficial do fundido e evita a oxidação do metal na interface com a areia, podendo, no entanto, para teores mais elevados, diminuir a permeabilidade da areia de moldação. Além disso, uma outra função deste componente é fornecer carbono necessário que para reagir com o vapor de água formado durante o vazamento, segundo a reação 1:

$$C + H_2O \rightarrow CO + H_2 \qquad (1)$$

A formação de monóxido de carbono e de hidrogénio em conjunto com o vapor de água restante, promovem a formação de gases que são expelidos pelos respiros das moldações [2].

3.1.3. Argila

É definido por ser um material inorgânico com propriedades plásticas e adesivas, atuando como ligante, sendo a bentonite o mais regularmente utilizado. Pertence à classe das argilas montmorilonite com origem em rochas vulcânicas efusivas, pelo que o principal constituinte desta é a montmorilonite que é um mineral cujo nome deve-se ao local de onde foi inicialmente descoberto em Montmoroillon (França). A montmorilonite é constituída essencialmente por sílica e alumina, com uma composição próxima de $M_y^+nH_2O(Al_{2y}Mg_ySi_4O_{10}(OH)_2$, no qual permite serem introduzidas moléculas de água entre as suas camadas estruturais e assim ocorrer a sua expansão de cerca 10 a 15 vezes o seu volume inicial, acompanhada por uma absorção de água equivalente a 5 a 6 vezes o seu próprio peso. Com esta adição de água, a bentonite altera o seu comportamento para um comportamento plástico e com propriedades adesivas e coesivas. Existem assim dois tipos de bentonites de origem natural, as bentonites sódicas (Western) e as bentonites cálcicas (Southern) [2].

A bentonite sódica apresenta maior plasticidade devido à maior percentagem de água, boa resistência a altas temperaturas, baixa sensibilidade à humidade, alta capacidade para aumentar o volume (também designado por inchaço) o que origina maior permeabilidade da areia, assim como uma necessidade de utilização de menor quantidade de bentonite para a obtenção da mesma resistência. Por outro lado, a bentonite cálcica apresenta um período de mistura mais curto para a obtenção da resistência máxima, boa fluidez, baixa resistência a temperaturas elevadas, mas boa capacidade de abate. Industrialmente é possível transformar a bentonite cálcica numa bentonite sódica através de um processo denominado por ativação, no qual consiste na adição de carbonato de sódio (Na_2CO_3) que vai promover a substituição parcial do catião cálcio (Ca^+) pelo catião sódio (Na^+) uma vez que é necessário a presença de um equilíbrio elétrico [2].

3.1.3.1 Desativação da Bentonite

Durante o processo de vazamento, a bentonite quando aquecida vai promover a evaporação da água adsorvida entre as suas lamelas, pelo que com o aquecimento contínuo, para uma certa temperatura e tempo, vai ocorrer a decomposição, oxidação, mineralização e transformação de fase. No caso da bentonite, sempre que ocorre modificação estrutural esta perde o poder de desenvolvimento das forças de adesão por absorção da água e passa a ter caraterísticas inertes, denominada por bentonite desativada. Este processo de desativação da bentonite pela ação do calor vai originar um revestimento cerâmico poroso inerte que envolve a superfície do grão, denominado por invólucro oolítico, no qual apresenta baixa resistência térmica e elevada capacidade de absorção da água, não contribuindo por isso para o aumento da resistência do produto gerado. Este é um parâmetro que permite avaliar o grau de envelhecimento da areia [2].

3.1.4. Preparação da Areia Verde

Para a realização da mistura dos constituintes da areia verde é utilizado um equipamento denominado de galga, no qual tem como principal objetivo promover a hidratação da bentonite de modo a formar o argilóide (mistura da água com a bentonite) bem como a homogeneização da mistura da areia com a argila, água e pó de carvão para envolver todos os grãos da areia. Na sequência da preparação da areia verde é possível diferenciar em três estágios distintos:

a) Dispersão da água pelos constituintes e formação do argilóide;

b) Homogeneização das relações entre os constituintes água/bentonite;

c) Revestimento dos grãos de areia com o argilóide.

Na etapa (c) é necessário a utilização de uma força de compressão, proporcionada pela galga no qual vai promover a que a areia e o argilóide deslizem entre os rolos e a

superfície da mesma, ocorrendo assim o esmagamento dos grãos. A eficiência da ligação grão de areia/bentonite é inversamente proporcional ao consumo de ligante necessário para se obter uma dada resistência, pelo que o tempo de preparação da areia não deve diminuir, de modo a não originar uma areia mais húmida ou de menor compatabilidade, e por isso uma areia de menor qualidade.

Para além das caraterísticas dos grãos de areia (distribuição granulométrica, formato e tamanho do grão, etc.), os fatores externos também vão afetar significativamente a qualidade da areia de moldação, pelo que a presença de humidade está relacionada com o tipo e quantidade do ligante, da percentagem de carbono e do tamanho das partículas, sendo por isso de extrema importância que a areia base durante a preparação da mistura seja previamente tratada, sem qualquer presença de humidade.

3.2. PROCESSO DE VAZAMENTO "ALL-IN-CORE"

Na Funfrap é utilizado o processo "all-in-core" durante a etapa do vazamento no qual o banho metálico é vazado no seio dos machos que estão introduzidos e fixados no interior da moldação de areia verde. É um processo que tem como vantagens:

- Permitir o fabrico de fundidos com espessuras de parede mais finas;
- Maior precisão geométrica e dimensional devido à elevada resistência mecânica do macho (comparativamente à areia verde);
- Melhor acabamento superficial do que na moldação com areia verde.

No entanto, este processo origina uma elevada percentagem de retornos de areia sob a forma de "core-buts", sendo por isso recomendável a presença de uma instalação capaz de produzir machos em quantidades compatíveis com a cadência de produção, uma grande área para amadurecimento e armazenamento dos machos bem como um sistema de montagem e movimentação de machos.

3.3. MACHOS

A seleção de um determinado processo de fabrico de machos vai ao encontro do custo e disponibilidade das matérias-primas (material refratário, ligantes, aditivos e outros consumíveis) assim como da produtividade no qual se destaca o ciclo de polimerização, distinguindo-se dois principais parâmetros: o tempo de vida em bancada da mistura e o tempo de desmoldação, e também de acordo com o tipo de peça a ser fabricada.

3.3.1. Material Refratário

Utiliza-se uma areia cujo principal objetivo é conferir uma elevada resistência mecânica do macho de modo a este não se deforme durante o processo de vazamento do metal na cavidade moldante, tratando-se por isso do constituinte de maior percentagem em toda a mistura da areia de macho (cerca de 98% em peso). O de maior gama de aplicação é a areia de sílica (SiO_2), não só pelas suas caraterísticas e propriedades como também pelo seu menor custo comparativamente com outras areias, sendo que preferencialmente deve ser distribuída por três peneiros de modo a promover uma diminuição do consumo de resina, melhor permeabilidade e fluidez da areia, como também da diminuição do tempo de cura [4].

Existe também a areia de cromite ($FeCr_2O_4$) a qual apresenta uma elevada resistência mecânica com pequeno tamanho de grão (compreendido entre 50 e 60 AFS) e uma baixa expansão térmica. Para além de possuir elevada massa volúmica, durante o seu processo de obtenção através da britagem apresenta-se com um grão angular e caso sofra algum processo de regeneração, não apresenta viabilidade uma vez que vai haver uma redução significativa da sua refratariedade.

Na Funfrap, é utilizado por vezes a areia de bauxite, sendo constituída maioritariamente por alumina (Al_2O_3) e por hematite (Fe_2O_3), com uma densidade a granel de 1900 kg/m^3. A principal vantagem da sua utilização está relacionada com a forma do seu grão ser perfeitamente arredondada resultando numa área superficial menor e por isso não originar um consumo tão elevado de ligantes, comparativamente com a areia de sílica, mantendo as propriedades mecânicas do macho. Além disso, a areia de bauxite apresenta uma baixa condutividade térmica e baixa taxa de expansão térmica comparativamente com a areia de sílica e de cromite, pelo que no momento do vazamento do metal líquido não vai haver a reação com o metal nem a formação de defeitos no macho (provenientes dos elevados choques térmicos e à pressão metaloestática durante o contacto do metal com a areia), pelo que vai permitir a produção de machos com um maior grau de precisão dimensional e com espessuras menores. Para além destas vantagens referidas, existem também outras, nomeadamente:

- A forma de grão esférica promove mais facilmente a separação entre o fundido e o macho;
- Não apresenta riscos para a saúde comparativamente com a areia de sílica (silicose);
- Permite utilizar cerca de 30 % menos de resina para a obtenção das mesmas propriedades mecânicas;
- Apresenta maior durabilidade comparativamente com outros tipos de areias;
- Permite a obtenção de peças com menor presença de defeitos superficiais.

3.4. PROCESSO CAIXA-FRIA

Este processo é geralmente utilizado para fabricar machos até 100 kg, oferecendo um elevado acabamento superficial e precisão dimensional, tendo também como vantagem a facilidade de recuperação da areia de macho utilizada. Desta forma, é realizada uma mistura da areia com ligantes químicos e um gás endurecedor (à temperatura de ambiente sem necessidade de qualquer fonte de aquecimento) [3][5]. O ligante é constituído por duas resinas (parte I e parte II), nos quais são dissolvidas em solventes orgânicos voláteis (têm como função diminuir a viscosidade das duas resinas). A parte I é constituída por uma resina de fenolformaldeído e na parte II é utilizado um poliisocianato (MDI) no qual vai atuar como solvente da resina da parte I.

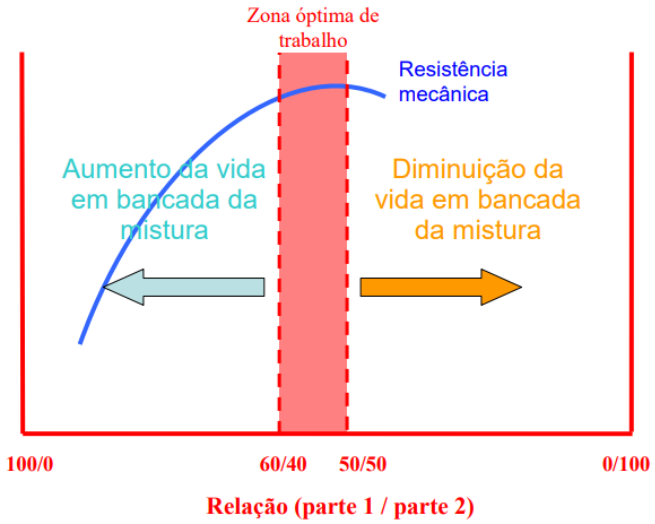


Figura 2- Influência da relação parte I/parte II no tempo de vida de bancada e da resistência mecânica da areia [6].

Relativamente à parte II do sistema de ligante, existem variados poliisocianatos sendo que o mais usual no fabrico de machos por caixa fria é o metileno difenil diisocianato (MDI), pelo que apresenta uma elevada reatividade na presença de grupos de cianato (NCO) no qual vai reagir com compostos que possuam átomos de hidrogénio (como é o caso da água), sendo que na presença de humidade no ar atmosférico, pode promover a formação de ureia e de dióxido de carbono no qual restringe a interação entre os dois constituintes do ligante, nomeadamente da parte I e da parte II, com consequências nefastas na resistência mecânica final do macho [3]. Por norma são utilizados teores iguais de cada parte das resinas (relação 1:1), podendo haver uma diferença de 10% nestes valores. A percentagem de resina adicionada à areia no fabrico de machos pode variar entre 0,8 e 2% o peso da areia, consoante as características pretendidas.

É de salientar que antes da adição do gás catalisador à mistura, existe um período de tempo limitado (tempo de vida em bancada) no qual o macho deve ser conformado de modo a ter a sua forma pretendida. Caso este tempo for maior que o desejado, vai provocar uma degradação das propriedades da mistura, diminuindo assim resistência dos

machos. No final da fabricação dos machos, estes devem ser alocados numa zona de amadurecimento (cerca de 24 horas em algumas situações) antes da sua utilização, de modo a garantir a reação completa da resina com o agente catalisador e não ocorrer a retenção de gases. Além disso, é essencial ter em consideração que as resinas orgânicas e os solventes promovem um aumento do teor de carbono do sistema formando assim uma atmosfera redutora na cavidade moldante durante o vazamento. Embora este aumento do teor de carbono na atmosfera contribua para uma boa qualidade superficial do produto, é necessário ter em consideração que um aumento excessivo deste elemento pode favorecer o aparecimento de defeitos superficiais e da captação do carbono no fundido, em situações em que não existe um controlo rigoroso do processo [8].

3.4.1. Agente de Cura-Amina

Existem três principais tipos de aminas: a primária (trietilamina-TEA), secundária (dimetilisopropilamina-DMIA) e a terciária (dimetiletilamina-DMEA). A mais usualmente utilizada é a dimetiletilamina (DMEA) no estado líquido sob a forma de aerossol devido a apresentar maior pressão de vapor e maior solubilidade no gás de transporte, originando uma maior produtividade. É de salientar que este gás de transporte deve ser seco de modo a impedir a reação da amina com a humidade.

A amina vai atuar como um catalisador, endurecendo assim a mistura da areia com o ligante (resina fenólica e poliisocianato) através da sua passagem pelo interior desta mistura. Tem a vantagem de promover tempos de cura relativamente baixos e de possuir uma baixa temperatura de vaporização, aumentando assim a eficiência e sendo por isso utilizado em produções de elevadas cadências. Como a amina atua apenas como catalisador e não é consumida na reação, após o mecanismo de cura esta vai permanecer na areia de macho sendo necessário recorrer à sua remoção, pelo que este período de extração deve ser cerca 10 a 15 vezes mais longo do que o tempo de injeção com o intuito de promover a sua extração eficazmente. A quantidade de amina necessário para a cura é de cerca 0.05% o peso da areia [3][8].

3.4.2. Mecanismo de Cura

A passagem do gás (agente de cura) tem necessariamente de ocorrer uniformemente por toda a mistura da areia, uma vez que as reações químicas que vão ocorrer são praticamente instantâneas e vão depender da homogeneidade do gás em toda a mistura. Como a resina de fenolformaldeído possui grupos de hidróxidos, estes vão reagir com os grupos de poliisocianato na presença do catalisador (amina), promovendo assim a formação da uma resina sólida de uretano, demonstrada na Figura 3:

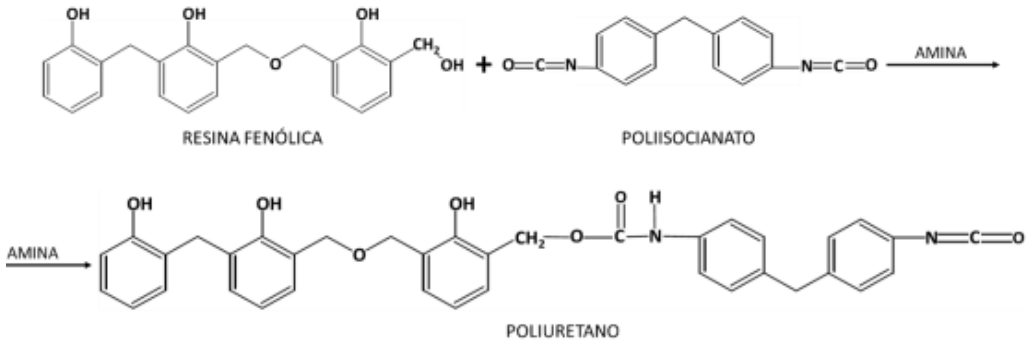


Figura 3- Mecanismo de cura através da reação da resina fenólica (parte I) com o poliisocianato (parte II) na presença da amina [9].

Um fator crucial para o mecanismo de cura está relacionado com a presença de humidade no ligante, uma vez que o poliisocianato presente na resina apresenta afinidade para a água, sendo que esta presença de humidade pode promover uma diminuição significativa da resistência à flexão nos machos produzidos.

Também é essencial a existência de aberturas na caixa de machos (*filtros*) para ocorrer a passagem da amina e também manter as caixas bem seladas de modo que não ocorra nenhuma fuga do gás e resultar no seu consumo excessivo ou à não realização total do processo de cura [9]. É de salientar ainda que não é aconselhável aumentar o tempo e quantidade de passagem do gás no processo de cura uma vez que a velocidade de cura não se altera, ocorrendo assim um aumento excessivo e desnecessário de amina nos machos, e consecutivamente um aumento dos custos associados.

3.4.3. Vantagens do Processo de Caixa Fria

A utilização deste tipo de processo no fabrico de machos é vantajosa devido ao aumento da resistência do macho, promovendo um baixo índice de quebra de machos, permitindo a obtenção de machos de geometrias de elevada complexidade, mantendo a elevada precisão dimensional e produtividade com tempos de ciclo curtos devido ao rápido endurecimento e a não necessidade de utilizar qualquer equipamento de aquecimento, reduzindo assim os custos associados ao mesmo. Também é de salientar que este processo se diferencia por fatores ecológicos, nomeadamente na diminuição do odor e diminuição da quantidade de poluentes nocivos para a atmosfera e de emissões de BTX (hidrocarbonetos de benzeno, tolueno e xileno); a nível da produtividade, com a diminuição dos tempos de ciclos de produção e dos danos dos equipamentos, promove assim um aumento do seu tempo de vida útil bem como uma redução do tempo de limpeza; também permite utilização de uma elevada gama de areias assim como no tipo de material a fundir [9]. No entanto, apresenta algumas desvantagens, nomeadamente no elevado custo dos ligantes, do agente de cura e dos sistemas de exaustão para a extração da amina e da necessidade da elevada qualidade e pureza da areia.

3.5. CARATERÍSTICAS DA AREIA DE MACHO

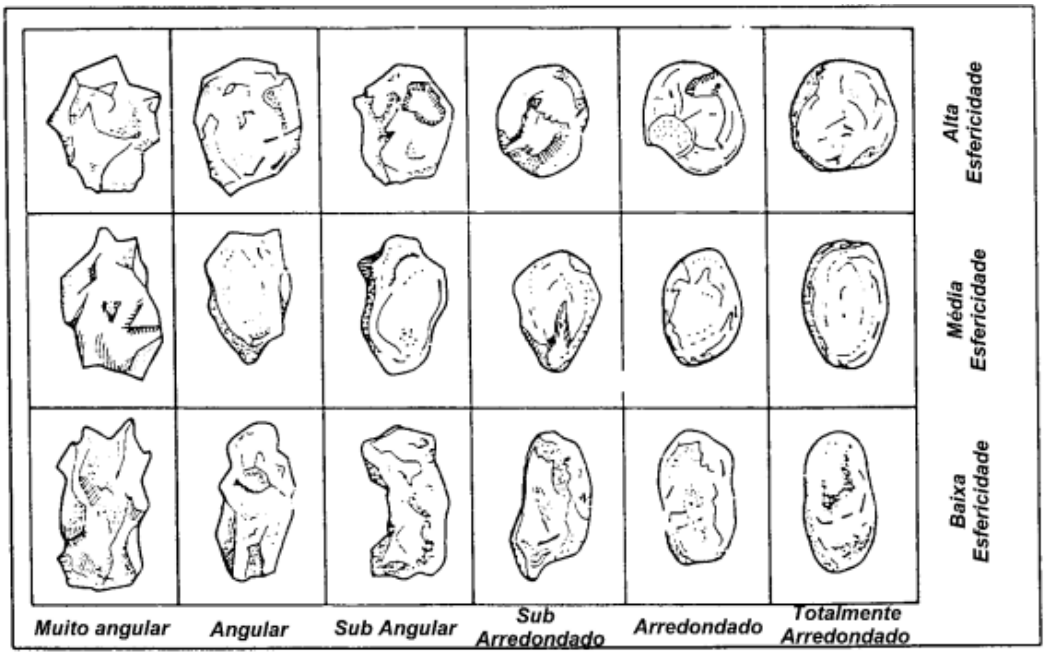
De modo a poder suportar as elevadas temperaturas associadas ao processo de vazamento, a areia deve apresentar uma elevada refratariedade no qual se reflete num ponto de vitrificação superior, de modo a não promover a fusão dos grãos e consequente formação de defeitos no fundido. Além disso, o calor libertado durante o vazamento, vai promover a uma rápida expansão da superfície de contacto da areia com o metal no estado líquido, pelo que é crucial que esta apresente elevada estabilidade térmica para que não origine fissuras na sua superfície.

3.5.1. Formato do Grão

É uma caraterística de extrema importância uma vez que vai ter influência direta na superfície específica do grão e por consequente no consumo de ligante que é necessário para promover o aumento da resistência da mistura. Desta forma, quanto mais arredondado for o grão de areia, menor será a sua superfície específica, e por isso a quantidade de ligante necessária para cobrir totalmente este mesmo grão e conferir as propriedades mecânicas requeridas é menor. Além disso, grãos mais arredondados apresentam maior compactabilidade e consequentemente vão promover um aumento da resistência mecânica e uma melhoria da capacidade de manuseamento e de moldação. No entanto, tem como desvantagens o facto do ligante apresentar maior dificuldade de adesão sendo por isso mais facilmente expelido e de possuir maior expansão térmica podendo levar à formação de fissuras [10].

Por outro lado, a utilização de grãos angulares (menos arredondados) que apresentam uma superfície específica superior, vão promover um maior consumo de ligante necessário para atingir a mesma resistência mecânica comparativamente com a utilização de grãos mais arredondados, e por isso vai ocorrer consequentemente um aumento dos custos associados à utilização desta maior quantidade de ligante. Além disso, vai existir uma maior probabilidade de ocorrência de formação de gases provenientes do elevado teor de ligante promovendo a formação de porosidade na peça durante o vazamento. No entanto, tem como vantagem a melhoria das dilatações e contrações dos grãos de areia [6].

Tabela 1- Diferentes formatos e esfericidades possíveis de um grão de areia [2]



3.5.2. Distribuição Granulométrica

Durante as etapas do processamento da areia, é possível que os grãos se agrupem em agregados pelo que estes tenderão a tornarem-se muito resistentes e de difícil destruição, promovendo heterogeneidade da mistura e diminuição da sua resistência. Por outro lado, a presença de partículas de pequenas dimensões, irá promover variações nas propriedades da areia, sendo por isso necessário manter uma distribuição dos tamanhos dos grãos dentro de uma gama de valores conhecida, de modo a haver um maior controlo do comportamento da areia durante a sua utilização.

3.5.3. Índice de Finura AFS

Representa o número de malhas ("*meshes*") por polegada quadrada, por onde passaria toda a areia por um crivo fictício se os grãos apresentassem todos a mesma dimensão. Este índice é proporcional à área superficial por unidade de peso da areia antes da realização da sua mistura com o ligante, também designado por superfície específica. Isto significa que quanto mais fina for a areia, ou quanto menor for o seu tamanho de grão, maior será a superfície específica e por isso maior será o seu índice de finura.

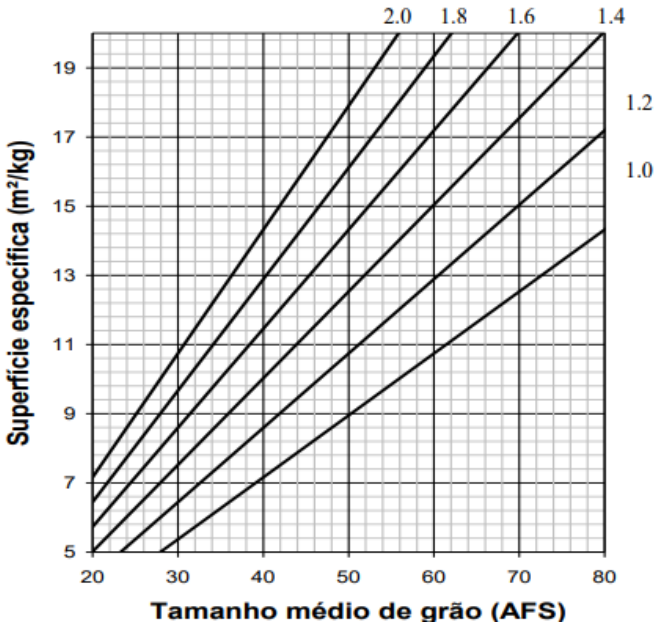


Figura 4- Variação da superfície específica de 1 kg de areia de sílica em relação ao seu tamanho médio AFS e ao seu grau de esfericidade "K" (Esferoidais: K=1; Arredondadas: K= 1.2-1.4; Angulares: K>1.4) [2]

3.5.4. Tamanho do Grão

O tamanho de grão da areia vai influenciar a qualidade superficial do fundido e a permeabilidade. Para grãos de menores dimensões vão promover a melhoria do acabamento superficial do fundido, com a contrariedade de diminuir a permeabilidade da areia na passagem de gases, podendo estes ficarem mais facilmente retidos na moldação. Além disso, grãos mais pequenos apresentam maior superfície específica e por isso são necessárias maiores quantidades de consumo de ligante. No entanto, para grãos de menores dimensões, a fluidez da mistura aumenta, o que permite que esta flua com maior facilidade no interior do molde e o preencha com maior detalhe, sendo, no entanto, recomendado um teor máximo de 2% de grãos de tamanho micrométrico presente na areia de macho (inferior a 20 μm, denominados por "finos") [3]. É de salientar ainda que com o processo de regeneração da areia os grãos vão ficando cada vez mais finos devido ao processo de moagem.

Por outro lado, grãos grosseiros apresentam uma maior facilidade de compactação dado que têm menor número de locais de contacto, grão a grão, mas promovem uma pior qualidade superficial do fundido. É de salientar que, se existir a presença de uma elevada quantidade de grãos finos em conjunto com grãos grosseiros, estes grãos mais pequenos vão-se alocar nos espaços entre os grãos maiores, dificultando o revestimento do grão com o ligante, sendo por isso necessário um aumento da quantidade de resina.

3.5.5. Permeabilidade

Durante o vazamento, o calor gerado vai promover a libertação de uma elevada quantidade de gases e de vapor de água, pelo que é importante que a moldação seja permeável de modo a permitir que ocorra a saída desses mesmos gases com o intuito de não promover a formação de porosidades no fundido. Um possível aumento da permeabilidade apenas se verifica para adições de uma quantidade significativa de areia mais grosseira, com a contrariedade de deteriorar a qualidade superficial do fundido. Na situação inversa, não é possível afinar a granulometria para melhorar a qualidade superficial, sem que, ao mesmo tempo se deteriore a permeabilidade.

3.5.6. Tempo de Vida em Bancada e Tempo de Desmoldação

O tempo de vida em bancada é um parâmetro no qual se define pelo tempo disponível após a preparação da mistura para poder proceder ao fabrico do macho, sem que ocorra a deterioração das propriedades mecânicas finais. Assim, quanto maior for o tempo de vida em bancada da mistura, melhor será o sistema de produção, uma vez que permite maiores tempos de moldação e até mesmo maiores tempos de armazenamento após realizada a mistura. Por outro lado, o tempo de desmoldação carateriza-se pelo tempo necessário para que o macho desenvolva resistência que possibilite a desmoldação, sem que ocorra a sua deformação ou quebra. Com estes dois parâmetros, é possível obter um índice do sistema, como evidenciado na equação 1:

$$Índice\ Sistema = \frac{Tempo\ de\ Vida\ em\ Bancada\ da\ Mistura}{Tempo\ de\ Polimerização} \quad (1)$$

Assim em condições ideais, seria desejável que este índice fosse o maior possível, dito por outras palavras, que o tempo de vida em bancada fosse o mais prolongado e o tempo de polimerização o mais curto. Também é de salientar que quanto maior for a relação entre os dois tempos, maior será a produtividade com o mesmo equipamento e consequentemente menores custos diretos associados à paragem e substituição ou manutenção do mesmo.

3.6. FABRICO DE MACHOS

Para além das caraterísticas mencionadas anteriormente, a presença de impurezas na areia vão promover uma difícil adesão do ligante à superfície dos grãos e por consequente um aumento do seu consumo para a obtenção das mesmas propriedades, bem como uma diminuição da resistência mecânica do macho e uma redução do seu tempo de vida em bancada.

O pH das resinas utilizadas deve ser o mais próximo possível de 7, uma vez que durante o mecanismo de cura vai ocorrer o endurecimento da mistura, sendo esta favorecida em meio neutro. Assim, se o pH for diferente de 7, pode promover um maior consumo dos constituintes da resina uma vez que não reagem totalmente devido à neutralização pela areia [3].

3.6.1. Humidade

Na Figura 5 é sugerida a influência do teor de humidade na resistência à flexão do macho, pelo que se observa então que quanto maior for a percentagem de humidade presente na areia de moldação, menor será a resistência à flexão da mesma, tendo por isso uma maior suscetibilidade à quebra do macho durante a sua produção e utilização.

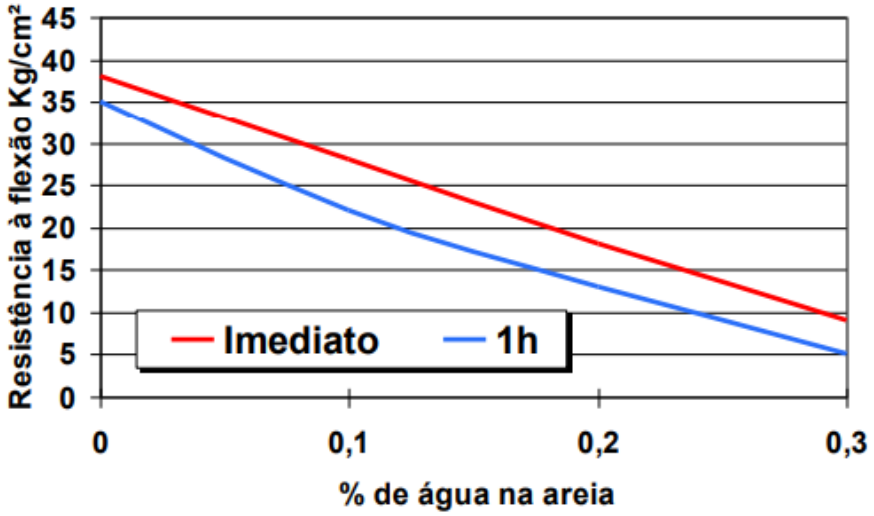


Figura 5 – Influência da % de humidade presente na areia vs resistência à flexão obtida imediatamente após a cura e após 1 hora [6].

Embora a presença de humidade tenha um efeito nefasto na resistência à flexão, em situações em que não é possível eliminar totalmente esta presença, esta deve ter um valor máximo de 0.2% para temperaturas de 21ºC. Para temperaturas mais elevadas, o teor máximo de humidade não deve ser superior a 0,1% de modo a não promover a degradação das propriedades mecânicas dos machos fabricados. Para ter uma ideia mais concreta da influência da presença da humidade, a utilização de uma areia com cerca de 0.5% de humidade promoveu uma diminuição do tempo de vida de bancada para um sexto comparativamente a uma areia com cerca de 0.25% de humidade. Este fenómeno ocorre uma vez que as moléculas de água têm uma elevada afinidade com o poliisocianato (parte II), reagindo rapidamente com este e deteriorando a reação entre as partes I e II e consequentemente uma diminuição da resistência à flexão dos machos. Com esta reação vai ocorrer a formação de ureia que vai reduzir a fluidez e compactação da areia preparada, da resistência mecânica, promovendo assim a deterioração das propriedades mecânicas mais rapidamente durante o armazenamento e

à formação de defeitos nas peças fundidas devido à presença de gases provenientes da evaporação da água durante o processo de vazamento [4].

3.6.2. Temperatura da Areia

Para a utilização da areia, a temperatura mais recomendada deve estar situada entre os 20 e 25ºC. Acima desta temperatura, vai ocorrer um aumento na reatividade da resina e resultar na sua diminuição da resistência à flexão do macho e do tempo de vida em bancada, sendo por isso de extrema importância garantir que as condições de armazenamento da areia não promovem um aumento da sua temperatura. Uma opção viável para que não ocorra este aumento de temperatura da areia, seria a utilização de um arrefecedor ("chiller"), no qual a areia ao passar por este equipamento promovia-se o seu arrefecimento. Também pode haver a evaporação dos dissolventes (caso estes apresentem um ponto de ebulição baixo) levando a uma diminuição da resistência do macho, conforme sugerido na Figura 6.

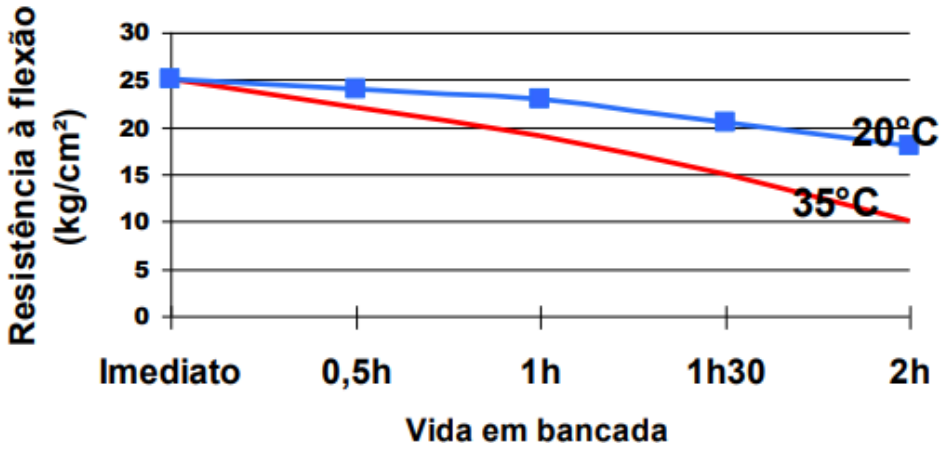


Figura 6 – Influência da temperatura da areia base na vida em bancada e resistência à flexão do macho do processo coldbox [6].

Geralmente um incremento de 10ºC na temperatura da areia base duplica a velocidade de reação dos ligantes. Quando a temperatura é inferior a 10ºC, existe uma diminuição da eficiência e homogeneidade da mistura, um maior consumo da quantidade do gás catalisador devido à condensação da amina bem como ao aumento do tempo necessário para o mecanismo de cura [10,11,13].

3.7. PARÂMETROS DE PRODUTIVIDADE NO FABRICO DE MACHOS

3.7.1. Quebra de Machos

Este tipo de falha está relacionado com a sua baixa resistência mecânica, influenciada pela qualidade de areia (impurezas, percentagem de finos e o próprio processamento), más práticas de limpeza ou mau posicionamento dos filtros na caixa de

machos. A temperatura e a humidade do ar também vão ter um papel crucial, uma vez que para o fabrico dos machos é utilizada uma resina que tem uma viscosidade específica a uma determinada temperatura, e que com o aumento ou diminuição da temperatura do ar (por exemplo com a mudança da estação do ano) vai variar a viscosidade e por isso nas propriedades mecânicas do macho [6].

3.7.2. Aderência à Caixa de Machos

Este é um parâmetro inevitável a qualquer processo de produção de machos, pelo que estes têm tendência a aderir às paredes da caixa de machos após o seu fabrico, sendo que é proporcional à resistência dos machos e à percentagem de ligantes utilizados. A geometria do macho também é um fator a ter em consideração uma vez que quanto mais complexa for esta geometria maior a probabilidade de este aderir à caixa. Desta forma, é essencial recorrer à limpeza da caixa de machos e à aplicação de um desmoldante de acordo com o processo.

3.8. DEFEITOS COM ORIGEM NOS MACHOS

3.8.1. "Veining"

Durante o processo de vazamento do banho metálico, por vezes pode ocorrer um defeito associado à expansão térmica da areia de macho no qual origina fissuras de pequenas dimensões na superfície do macho, sendo que é mais usual ocorrer em ângulos vivos, promovendo assim a penetração do metal líquido no seio do macho [4].

3.8.2. Penetrações de Metal

A penetração do metal nos machos está relacionada principalmente com a pressão metaloestática no momento em que o banho metálico é vazado na cavidade moldante, estando também relacionada com outros fatores tais como a granulometria da areia, pelo que quanto mais fino for o grão da areia mais dificilmente vai ocorrer penetração do metal no macho. A densidade da areia de macho também é um fator a ter em consideração uma vez que para baixas densidades há um aumento da probabilidade de ocorrerem penetrações do metal fundido durante o processo de vazamento [4].

3.8.3. Desprendimentos

Após realizado o revestimento dos machos com uma pintura à base de água, estes podem apresentar uma zona de concentração de condensação de água, devido a um mau procedimento da secagem do macho, levando a uma diminuição da sua resistência nessa zona de condensação de água ou zona húmida (Wet Tensile Strength), originando uma

falta de adesão de uma camada de areia, também designado por desprendimento. Estes também podem ter origem na insuficiente permeabilidade.

3.8.4. Presença de Gases

A presença de gases, nomeadamente de hidrogénio e de azoto, dentro da cavidade moldante pode promover a formação de porosidades nas peças fundidas. No entanto, pode ocorrer a dissolução e absorção do azoto para o interior do metal, explicado pelo facto de durante o processo de caixa fria, uma das partes constituintes (parte II), no qual contém azoto na sua composição química, poder promover a formação de ureia em detrimento da formação de uretano e consequentemente originar a formação de porosidades no interior das peças fundidas [4].

3.9. PINTURA DOS MACHOS

Os machos como consistem numa massa porosa no qual pode ocorrer a penetração do metal líquido durante o vazamento bem como a ocorrência de outro tipo de defeitos na interface areia/metal, é usual a aplicação de um revestimento refratário na superfície dos machos, designada de pintura. Este revestimento que tem como vantagens:

- **Aumento da resistência desgaste na interface macho/banho metálico**: Ocorrência de choques térmicos elevados durante o vazamento que simultaneamente com a pressão metaloestática poderá levar à deformação e deterioração do macho.
- **Melhoria da qualidade superficial do fundido**: A pintura dos machos confere propriedades refratárias e impermeabilizantes, ocorrendo o fecho dos poros presentes no macho. Caso contrário, a ocorrência da penetração do metal líquido na superfície do macho vai originar uma superfície irregular e rugosa do fundido, sendo que quanto mais profunda for esta penetração, maior a probabilidade de adesão do metal na superfície do macho (peça fica colada ao macho).

Além disso, não deve apresentar qualquer ocorrência de reação quando em contacto com o metal vazado durante o vazamento, ocorrer uma boa adesão ao macho e facilidade de aplicação em toda a sua superfície e não promover formação de defeitos no macho (porosidades e fissuras) [11]. É de salientar também que todos os machos são sujeitos a esta etapa de pintura, variando o tipo de tinta de acordo com o tipo de macho utilizado.

3.10. PROCESSO DE REGENERAÇÃO DA AREIA

Na indústria de fundição em areia, embora utilize grande percentagem de materiais metálicos reutilizados (sucata, retornos, sistemas de alimentação e gitagem) como matéria-prima, o seu principal excedente tem haver com as areias residuais, quer seja as areias de moldação ou as areias de macho. Assim surgiu a possibilidade da recuperação e regeneração destas areias, constituindo uma alternativa viável económica e ambientalmente, sendo por isso um processo muito utilizado neste tipo de indústria.

Assim é essencial a existência de processos de regeneração os quais vão permitir que esta areia seja novamente reintroduzida no processo e que apresente propriedades mecânicas e caraterísticas semelhantes à areia nova, de modo a poder ser utilizada na produção de machos, tornado viável e possível que ocorra a substituição parcial ou integral da introdução da areia virgem.

É de salientar ainda que a areia reutilizada sofre degradação das suas caraterísticas e propriedades mecânicas ao longo do seu processamento sendo por isso retirada do processo após um certo número de vezes que sofreu o processo de regeneração (areia residual de fundição), sendo que este resíduo é composto por partículas extremamente arredondadas e com elevado teor de partículas de menor dimensão (finos) devido à constante fratura dos grãos e à desativação da argila, sendo que estas partículas mais finas devem ser filtradas e recolhidas.

3.10.1. Tecnologias da Regeneração da Areia

Atualmente existem vários tipos de equipamentos e de processos diferentes para realizar todo o processo de regeneração da areia, pelo que podem-se diferenciar por serem tratamentos térmicos, mecânicos, químicos ou húmidos. Na Funfrap, o processo está dividido em dois sistemas de regeneração: um primário e outro secundário. No primário processa-se a desagregação dos aglomerados de areia seguida de uma etapa de secagem por leito fluidizado a cerca de 110ºC, no qual ocorre a evaporação da humidade presente na areia proveniente do processo (uma vez que para além da areia de macho também entra no processo de regeneração areia verde com cerca de 2% de humidade), seguindo-se um posterior arrefecimento (temperatura compreendida entre 36 e 38ºC). Existe ainda um equipamento magnético que separa as partículas metálicas que possam ter permanecido juntamente com a areia. Durante esta etapa primária de regeneração a parametrização do processo é realizada através do controlo da temperatura da areia, do fluxo de ar e da quantidade de areia que é transportada até à etapa secundária do processo de regeneração, cujo transporte é realizado através de um sistema pneumático no qual vai disparar a areia até um silo de armazenamento (cerca de 150 kg de areia/disparo).

Figura 7- Equipamento de regeneração primária utilizado na FunFrap

Na regeneração secundária, todo o processamento da areia é exclusivamente mecânico, uma vez que são utilizados tambores rotativos que vão promover o "esmagamento e moagem" dos grãos contra a superfície da parede interna do equipamento, ocorrendo simultaneamente a aspiração dos finos produzidos durante o processo. Existem 3 unidades nesta etapa no qual estão interligadas e entre cada uma vai haver aumento dos aros dos cilindros dos tambores (45, 55 e 65 mm) com o intuito de promover uma diminuição do tamanho de grão entre cada uma das etapas, como também a remoção do ligante presente na areia. A parametrização é realizada através da pressão dos tambores e do tamanho do aro do tambor do equipamento no qual vai definir o tempo de projeção da areia contra as paredes e desta forma estar diretamente relacionado com tamanho grão da areia. É de salientar que previamente ao arranque da instalação é crucial garantir que esta está limpa de modo a ocorrer o correto funcionamento. A eficiência total do sistema é de cerca de 70% (por cada 10 toneladas de areia que entra no sistema, 7 vão ser regeneradas e as restantes 3 estão destinadas aos finos).

Figura 8- Equipamento de regeneração secundária (à esquerda); enviador pneumático de disparo da areia (à direita) utilizados na Funfrap

3.3.1.1 Tratamento Mecânico

Esta técnica de regeneração é utilizada principalmente para a regeneração de areias no qual o ligante a ser removido apresenta uma elevada dureza e fragilidade, como é o exemplo do processo utilizado na Funfrap. Relativamente às vantagens deste tipo de tratamento é possível aplicar a uma vasta gama de diferentes areias de fundição, os equipamentos não necessitam de elevada manutenção e além disso é elevado o controlo do índice de finura e da quantidade de finos. No entanto, se os aglomerados possuírem dimensões inferiores a 3 mm são necessárias operações adicionais da sua desagregação e a utilização de forças de impacto e abrasão intensas demasiado elevadas podem promover a fratura dos grãos e consequentemente a produção de grãos de menor dimensão que o pretendido [7]. Na Figura 9 observa-se a comparação ilustrativa de um grão recuperado mecanicamente com um que não sofreu este tratamento, evidenciando-se que esta etapa é importante não só na desagregação de aglomerados de areia, mas também na remoção de ligante que possa ter permanecido em volta dos grãos.

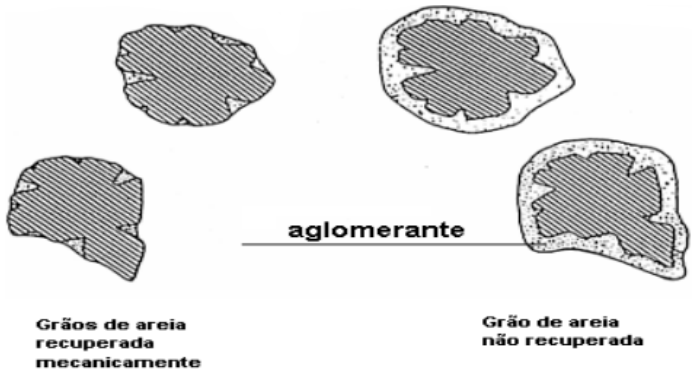


Figura 9- Comparação ilustrativa de um grão de areia regenerado mecanicamente e não regenerado [13]

Como o processo de regeneração da areia de macho ocorre por métodos mecânicos, vai promover a permanência de algum teor de ligante (resina que não foi combustada durante o vazamento), no qual vai levar à formação de gases e consequente porosidade nas peças, como também numa diminuição da resistência mecânica da própria areia de macho. A granulometria vai ser também ligeiramente menor quando recuperada, aumentando assim a superfície especifica e por isso quantidade de ligante necessária é maior.

Para a prática deste tratamento, pode-se utilizar dois tipos de equipamentos, sendo eles pneumático ou rotativo.

3.3.1.1.1 Pneumático

Consiste no transporte de uma corrente de ar contínua sob pressão (2 bar) ao longo de uma tubagem, sendo que no final desta existe um alvo no qual tem como função comportar-se como um obstáculo de modo que os grãos ao colidem entre eles e contra este alvo (cerca de 50 m/s) e promova a desagregação dos aglomerados e separação dos constituintes indesejáveis presentes na areia.

3.3.1.1.2 Rotativo

Este tipo de equipamento, conforme a Figura 10, é o mais utilizados principalmente para a regeneração de areias que contenham resíduos de resina e bentonite. Utilizam uma cuba que gira a velocidade de cerca 2000 a 2500 rpm, promovendo com que os grãos colidam entre si e a parede interna do rotor, ou em alguns casos, promover o arrasto da areia pelo rotor, promovendo a fricção entre os grãos e levar à desagregação dos aglomerados. É usual a utilização de um separador magnético no qual vai permitir a separação dos materiais metálicos que permaneceram na areia [3].

É de salientar que este processo apresenta maior eficiência comparativamente ao tratamento mecânico pneumático uma vez que vai permitir uma maior quantidade de remoção de contaminantes, bem como à obtenção de areia com propriedades mecânicas idênticas a uma areia nova, à diminuição da ocorrência de defeitos nos fundidos e ao controlo dos finos originados e da granulometria da areia.

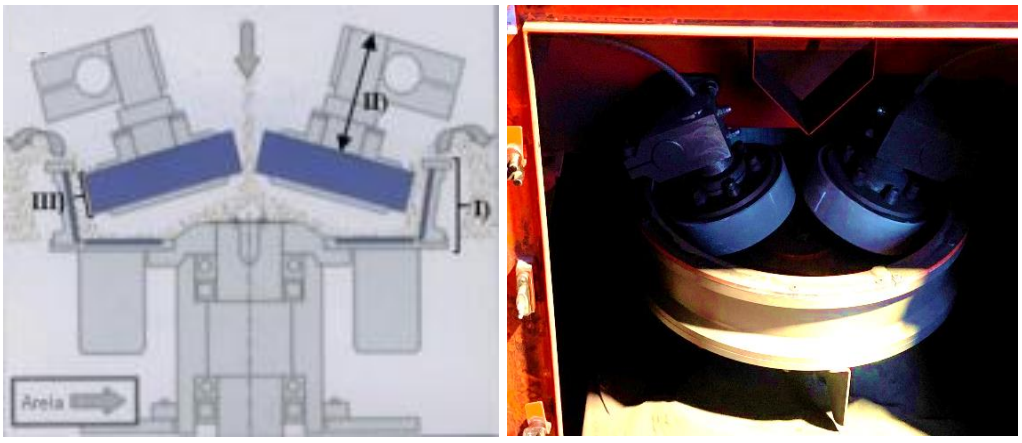


Figura 10- Tambor rotativo com os cilindros utilizados na etapa de regeneração secundária na Funfrap [3]

É de extrema importância que para a areia ser adequada ao processamento, deve estar seca, sendo por isso necessária uma fase de pré-secagem utilizando um forno de leito fluidizado ou outro secador para reduzir o teor de humidade para um nível inferior a 0,2% [8].

3.3.1.2 Tratamento Por Via Húmida

Utilizado sobretudo para areias cujos ligantes são solúveis na presença de água ou nos casos em que através da lavagem da superfície dos grãos da areia é possível que ocorra a sua separação, como é o exemplo da areia com silicato de sódio ou areia verde no qual utiliza sistema de resinas fenólicas alcalinas no qual apresenta uma elevada afinidade para a molécula da água (comportamento hidrofílico). Inicialmente ocorre a mistura da areia com a água para promover a remoção do ligante presente na superfície dos grãos de areia e respetiva separação, sendo que inclui etapas de desagregação dos aglomerados de areia e da separação magnética dos materiais metálicos, seguindo-se outras etapas de decantação, secagem e arrefecimento [8]. No entanto, é necessário garantir a elevada solubilidade do ligante na água em tempo útil, ter em consideração a elevada produção de resíduos e de consumo de elevadas quantidades de água (cerca de 8 toneladas de água por tonelada de areia processada), bem como a exigência de equipamentos de elevado porte e respetivos custos de manutenção e de obrigatoriedade de a areia necessitar de estar totalmente seca posteriormente ao processo [7].

3.3.1.3 Tratamento Térmico

O processo de regeneração por tratamento térmico consiste em utilizar a elevada temperatura (compreendida entre 500ºC e 600ºC) de modo a promover a queima, decomposição e volatilização ocorrendo assim à remoção dos ligantes presentes na areia. Desta forma, este processo divide-se em duas categorias, os que utilizam fornos de leito fluidizado e os fornos rotativos.

3.3.1.3.1 Fornos Rotativos

Neste tipo de equipamentos, conforme a Figura 11, existe uma diferenciação no tipo de aquecimento, podendo ser direto ou indireto. Nos equipamentos de aquecimento direto, o queimador está situado na mesma extremidade onde a está a areia a ser alimentada. No de aquecimento indireto é realizada a queima do combustível no interior de uma câmara no qual está conectada a um tubo de aço com elevada resistência a altas temperaturas e que vai insuflar o ar quente proveniente da combustão diretamente para a areia, promovendo assim a combustão da matéria orgânica presente na mesma. De modo a garantir a combustão total do ligante, é usual utilizar um excesso de ar quente proveniente da combustão ou injetar ar ou oxigénio com o auxílio de uma lança, em locais do forno estratégicos.

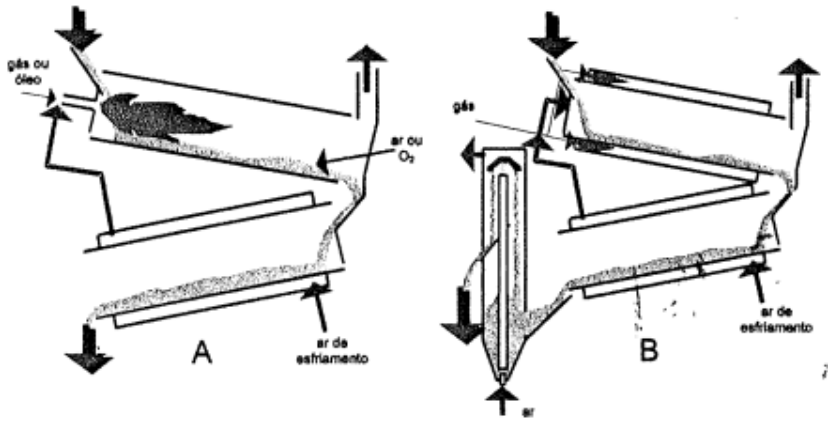


Figura 11- Forno rotativo com aquecimento direto (A) e de aquecimento indireto (B) [14].

3.3.1.3.2 Fornos De Leito Fluidizado

Este processo, esquematizado na Figura 12, é o de maior eficiência (próximo de 100%) no qual permite remover praticamente todos os resíduos de resina que permaneceram na superfície do grão, através da formação de uma suspensão da areia que através de fluxo de ar quente no interior de uma câmara no qual a matéria orgânica vai sofrer processos de combustão, pelo que o aquecimento pode ser efetuado através da combustão de gás natural ou a partir de resistências elétricas. O mesmo princípio é aplicado para o arrefecimento da areia, sendo evidentemente o ar quente substituído por ar frio.

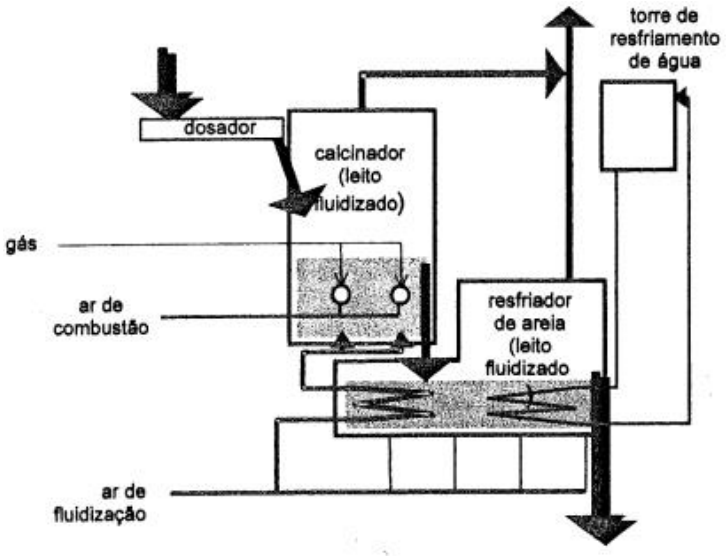


Figura 12- Exemplo ilustrativo de um forno de leito fluidizado com câmara de combustão imersa [14]

3.3.1.4 Tratamento Químico

Existem vários processos de tratamento químico sendo a principal diferença o agente de oxidação que é utilizado. Assim, o mais utilizado é o denominado como processo *Fenton* (processo de oxidação avançada) no qual é caraterizado pela utilização de uma mistura resultante da reação do peróxido de hidrogénio (H_2O_2) com um ião de ferro (Fe^{2+}) em meio ácido, no qual vão gerar radicais hidroxil com elevada reatividade para a matéria orgânica presente na areia, sendo que estes radicais vão promover a oxidação das moléculas orgânicas e promover a sua destruição, sem necessitar de elevadas pressões ou temperaturas. Este processo pode ser dividido em quatro etapas, nomeadamente o ajuste do pH, reação de oxidação, neutralização e precipitação [7].

3.10.2. Eficiência do Processo de Regeneração

O grau de eficiência da regeneração da areia vai variar de acordo com o tipo de processo de regeneração utilizado, estando diretamente relacionado com a quantidade e qualidade superficial dos grãos de areia após a regeneração e com a quantidade de ligante e outros constituintes que possam ter permanecido. Na Tabela 2 são sugeridos os valores obtidos para o rendimento dos vários tipos de processos, equipamentos e areias utilizados para o processo de regeneração da areia [7].

Tabela 2- Valores obtidos no processo de regeneração para os diferentes tipos de processos, equipamentos e areias [7].

Tipo de Tratamento	Areia ligada quimicamente	Areia verde
Térmico (leito fluidizado)	96 a 99%	não recomendado
Térmico (forno rotativo)	90 a 92%	90 a 92%
Pneumático	~ 80%	não recomendado
Termo-pneumático	70 a 80%	90 a 95%
Mecânico (alta intensidade)	80 a 95%	65 a 75%
Pneumático-térmico-pneumático	não recomendado	90 a 92%
Moinho atritor	70 a 75 %	—

O grau de limpeza pode então ser definido pela quantidade de contaminantes, quer seja impurezas ou ligantes, que permaneceram aderidos aos grãos de areia após o processo de regeneração. Assim, tendo em conta este critério, existem 3 classes, as quais foram obtidas de acordo com resistência à tração calculada após uma hora à realização da mistura da areia com a resina, nomeadamente:

- Classe 3: Apresentam elevada quantidade de contaminantes e cujos valores de resistência à tração correspondem até 1/3 dos valores obtidos para a areia nova correspondente.
- Classe 4: Valores intermédios de resistência à tração compreendidos entre um 1/3 e 2/3 dos valores obtidos para uma areia nova.
- Classe 5: Menor percentagem de elementos contaminantes que permaneceram envolvidos nos grãos de areia, sendo que este tipo de areia regenerada apresenta valores de resistência à tração de 2/3 comparativamente a uma areia nova [7].

4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.1. CARATERIZAÇÃO DAS AREIAS

A caraterização da areia foi realizada nos quatro tipos de areia (nova, bauxite, regenerada e areia que foi utilizada e removida do sistema antes de sofrer o processo de regeneração, denominada por areia pré-regenerada), uma vez que é necessário analisar e comparar as suas propriedades e quais os efeitos na utilização em machos. Desta forma, para a areia regenerada foram realizados os ensaios de maior relevância na Funfrap, nomeadamente a avaliação da percentagem de humidade, carbono, perda ao fogo, voláteis, argila AFS, argila ativa, distribuição granulométrica, índice de finura e coeficiente de angularidade. A areia nova e a areia bauxite apenas foi necessário a realização do ensaio de perda ao fogo uma vez que as outras caraterísiticas são disponibilizadas pelo fornecedor, e para a areia pré-regenerada realizou-se o ensaio de coeficiente de angularidade, análise granulométrica e índice de finura. É de salientar que todos os ensaios laboratoriais foram realizados de acordo com os procedimentos internos da Funfrap.

4.1.1. Análise Granulométrica e Índice de Finura

Uma areia é constituída geralmente por três frações distintas: grosseira, volúmica e fina. A parte fundamental é constituída pelos peneiros em que a fração retida em cada um é consecutivamente maior que 10% em cada um deles. O número de peneiros de uma areia é definido pelo número de peneiros consecutivos em que há mais de 10% do total da areia em cada deles. As séries de peneiros utilizadas estão de acordo com as normas internacionais, nomeadamente a norma americana ASTM E11-87 (AFS) ou a norma Alemã DIN 4188 (peneiros GF), sendo que a primeira possui 11 peneiros nº 6, 12, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 140, 200 e 270. A cada série corresponderá um conjunto de coeficientes multiplicativos para o cálculo do índice de finura. O ensaio de granulometria é realizado sobre amostras sem a fração de argila (fração granulométrica com menos de 20 μm) e secas a peso constante, depois de sujeitas a 105ºC [8].

Para a determinação destes dois parâmetros foram utilizados 11 peneiros com abertura de malha sequenciais e normalizadas segundo a norma ASTM E11 (Tabela 3). Inicialmente foi necessário a lavagem prévia e remoção dos finos tal como descrito posteriormente no ponto 4.1.5. De seguida, os peneiros são sobrepostos por ordem de abertura de malha decrescente e a amostra é colocada no peneiro superior e todo o sistema de peneiros é agitado durante 10 min com o auxílio *TYLER Ro-Tap*. Por último, é calculada a fração da amostra inicial que permaneceu retida em cada um dos peneiros através da pesagem da mesma. É de salientar que neste ensaio a diferença entre o peso total da amostra retida nos peneiros e o peso da amostra total não ultrapasse ± 0,2 %.

Figura 13- Fotografia do sistema utilizado no ensaio de distribuição granulométrica: TYLER Ro-Tap de agitação de peneiros e série de peneiros ASTM E 11.

$$Índice\ de\ Finura = \frac{Soma\ dos\ Produtos}{Total\ das\ Frações\ Retidas} \qquad (2)$$

A soma dos produtos obtém-se através da soma da multiplicação de cada uma da fração retida em cada peneiro, pelo coeficiente multiplicativo indicado na Tabela 3. É de salientar ainda que aos peneiros com menor abertura da malha estão associados coeficientes multiplicativos elevados uma vez que estas partículas de menor dimensão vão ter um maior efeito no comportamento e nas propriedades da areia.

Tabela 3 – Sequência de peneiros utilizados nos ensaios de determinação da distribuição granulometria e do índice de finura da areia regenerada

Nº Peneiro *ASTM E 11*	Abertura da malha (μm)	Coeficiente Multiplicativo
6	3350	3
12	1700	5
20	850	10
30	600	20
40	425	30
50	300	40
70	212	50
100	150	70
140	106	100
200	75	140
270	53	200
Fundo	0	300

4.1.2. Percentagem de Argila Ativa

O ensaio que permite obter a percentagem de argila ativa é denominado pelo ensaio de azul de metileno, uma vez utiliza um corante de cor azul de metileno o qual vai ser dissolvido na argila (Figura 14). Esta argila consegue absorver até uma certa quantidade de azul de metileno, pelo que quando atingir esse valor máximo esta vai estar saturada e expulsar o corante. Retirado este valor máximo, é feita a correspondência a um valor de argila ativa. Para a areia regenerada, que apresenta um teor de humidade desprezável devido aos processos de regeneração, foi realizada a secagem e praticamente toda a humidade foi evaporada. Utiliza-se assim uma fórmula (equação 3) para a obtenção da argila ativa, no qual as letras Y e X correspondem ao valor padrão de azul metileno para a areia regenerada e o valor de azul de metileno utilizado no ensaio respetivamente:

$$Argila\ Ativa\ (\%) = \frac{Y * 8}{X} \qquad (3)$$

Desta forma, foram retirados 5 g de areia regenerada aos quais foram adicionados 50 ml pirofosfato de sódio, de concentração 20 mg/L, que vai atuar como decapante e juntamente com os ultrassons e vibração (cerca de 10min), vão promover a desagregação dos aglomerados de areia que possam existir, de modo que a absorção do azul de metileno seja maximizada na argila. Feito isto, são adicionados 2 ml de ácido sulfúrico [H_2SO_4] com auxílio de uma pipeta.

Figura 14- Conjunto de equipamentos utilizados na determinação do teor de argila ativa (à esquerda); ultrassons utilizadas (à direita)

4.1.3. Percentagem de Carbono

A determinação da percentagem de carbono é obtida com o intuito de verificar a quantidade de pó de carvão presente na areia. Assim foi utilizado um espectrómetro o *Leco CS230* (Figura 15) que possui um forno de indução no qual vai promover a combustão direta e consequente reação de oxidação do carbono originando dióxido de carbono, sendo a quantidade deste gás medida através da absorção de radiação infravermelha.

Após garantir a calibração do equipamento através de amostras padrão, é realizada a pesagem de areia compreendidas entre 0,3 g a 0,5 g para o interior de um cadinho com adição de tungsténio que vai promover a aceleração e combustão necessárias para o procedimento. Realizada esta mistura, o cadinho é colocado no interior do forno. Previamente à utilização do equipamento, na câmara de combustão ocorre um processo de purificação a adição de oxigénio de modo a promover a remoção de gases atmosféricos que possam estar presentes no seu interior, e com isto formar uma atmosfera propícia para formar o dióxido de carbono. Foram realizados 2 ensaios para cada amostra e confirmando que a diferença entre os 2 valores não excede os 2%, concluindo-se assim com a obtenção da média aritmética.

Figura 15- Equipamento Leco CS230 utilizado no ensaio de obtenção da percentagem de carbono

4.1.4. Percentagem de Humidade

O ensaio para determinar a percentagem da humidade da areia foi realizado através do equipamento *METTLER TOLEDO HE53* como observado na Figura 16, no qual foram utilizados cerca de 15 g de areia regenerada. Durante o ensaio, a amostra foi submetida a uma temperatura de cerca de 105ºC durante 10 minutos, sendo que o resultado da percentagem de humidade será a diferença de peso antes e após este procedimento de aumento da temperatura.

Figura 16- Equipamento METTLER TOLEDO HE53 utilizado no ensaio de obtenção da percentagem de humidade presente na areia

4.1.5. Argila AFS

Este ensaio permite caraterizar a percentagem de finos presente na areia regenerada (partículas com tamanho de grão inferior a 20 μm) e sendo que estes vão ter um papel de extrema importância, uma vez que durante o processo de regeneração vai ocorrer a formação de finos e por consequente aumentar a área superficial dos grãos de areia, o que leva à necessidade de aumentar a quantidade de resina necessária para obtenção das propriedades mecânicas requeridas, bem como à diminuição da permeabilidade no qual diminui o escoamento de gases pelo interior da areia.

Desta forma, o procedimento é determinado pelo método da sedimentação através da Lei de Stoke's com auxílio de um autoclave (Figura 17) no qual vai realizar sucessivamente ciclos de decantação e sifonagem durante cerca de 6 horas, de modo que no final do processo a água esteja completamente transparente e sem presença de finos. Assim, foi necessário pesar 100 g de areia sem presença de humidade com auxílio de uma balança analítica *PIONEER OHAUS PA4102C* no qual esta sofreu um processo de secagem na estufa *PROLABO* a 105ºC. De seguida, adicionou-se cerca de 0,05 gramas de pirofosfato de sódio (Na4P2O7) com cerca de 150 ml de água destilada no qual seguiu-se a agitação por ultrassons durante 10 min através do equipamento *Georg Fischer PMS*. Por último, esta mistura foi colocada no autoclave *DIETERT DETROIT NO. 534-A* onde foi iniciado o processo de lavagem, pelo que após a sua conclusão a percentagem de finos é determinada através usando a equação 4, no qual P1 e P2 correspondem ao peso inicial da amostra e ao meso da amostra após ser submetida ao autoclave respetivamente:

$$Finos\ (\%) = \frac{P1 - P2}{P1} * 1000 \qquad (4)$$

Figura 17- Balança analítica PIONEER OHAUS PA4102C (à esquerda); Autoclave DIETERT DETROIT NO. 534-A (à direita)

4.1.6. Percentagem de Voláteis

Para a realização deste ensaio foi necessário calcular a variação do peso da amostra quando submetido a um aquecimento a cerca de 900ºC. Para tal, foi pesado 1 g de areia regenerada num interior de um cadinho de platina no qual foram posicionados no interior da mufla *OCRAS ZAMBELLI ZA* (Figura 18) durante 7 minutos. Após realizado o aquecimento, é necessário retirar o cadinho do interior da mufla e colocá-lo num exsicador de modo que a areia não absorva humidade. É de salientar que este ensaio é realizado previamente à adição de ligantes.

Figura 18- Mufla *OCRAS ZAMBELLI ZA*

Para o cálculo da percentagem de voláteis a amostra de areia com o cadinho é pesada prévia e posteriormente à sua colocação no interior da mufla, correspondendo respetivamente a P1 e P2 na seguinte equação:

$$\text{Material Volátil } (\%) = \frac{P1 - P2}{P1} * 100 \qquad (5)$$

4.1.7. Coeficiente de Angularidade

Este parâmetro está relacionado com a forma das partículas, indicando o desvio relativamente à forma esférica. É obtido através do cálculo do quociente entre os valores da superfície específica real e da superfície específica teórica, sendo que esta última é obtida através da análise granulométrica enunciada no subcapítulo 4.1.1. A superfície específica real foi calculada através do princípio de Blaine, no qual se utiliza ar transportado através de uma coluna de areia, sendo que esta deve estar o mais compactada possível através do batimento nas paredes do tubo onde está inserida. Para tal, foi previamente pesados, lavados e secos 50 g de areia regenerada e pré regenerada, e posteriormente colocados num tubo graduado do equipamento Georg Fischer POF (Figura 19). Após a leitura e registo do volume na escala do tubo graduado onde se encontra a areia, a torneira é rodada para a posição A (aspiração), e com auxílio de uma pera de sucção, o petróleo que se encontra no interior do tubo de medida irá ultrapassar uma determinada posição predefinida no tubo (marca superior negra), pelo que neste momento a torneira é colocada na posição R (repouso). Por último, volta-se a rodar a torneira para a posição B (serviço), pelo que quando nível do petróleo atingir uma determinada posição (marca vermelha superior), a contagem do tempo de descida é iniciada até atingir a marca inferior vermelha. Com a obtenção deste tempo de descida e com o volume inicial de areia é possível calcular a superfície especifica real através da leitura corresponde ao gráfico que se encontra na Figura A1 disponível no capítulo Anexos.

Figura 19- Equipamento Georg Fischer POF

4.1.8. Perda ao Fogo

Este ensaio é realizado após a produção da mistura da areia com os ligantes, estando relacionado com a variação de peso do material após o processo de calcinação, uma vez que os produtos voláteis, nomeadamente a resina será evaporada. Inicialmente são pesadas cerca de 10 a 15 g do material da amostra e colocados num cadinho, com propriedades refratárias, no qual é retirado o valor total do peso, seguindo-se a colocação no interior de uma mufla *Nabertherm B 180* (Figura 20) submetendo-se à calcinação a 900ºC durante cerca de 1 hora. Por último, é realizada a pesagem após este processo, no qual se determina a perda ao fogo através da equação 6, sendo que P1 corresponde ao peso do cadinho, P2 ao peso do cadinho com o material no seu interior antes do processo de evaporação e P3 ao peso do cadinho com a amostra após a evaporação:

$$Perda\ ao\ Fogo\ (\%) = \frac{P2 - P3}{P2 - P1} * 100 \qquad (6)$$

Figura 20- Mufla utilizada no ensaio de perda ao fogo.

4.2. CARATERIZAÇÃO DOS PROVETES DE AREIA DE MACHO

Com o intuito de analisar a variação das propriedades mecânicas dos machos com a utilização dos diferentes tipos de areias, foram produzidos dois provetes para cada uma das misturas realizadas (A0, A1, A2, A3, B0, B1, B2 caraterizadas posteriormente no capítulo 5.2). Também, de modo a utilizar as mesmas condições do processo de fabrico, foi utilizado cerca de 1.6% de ligante do sistema de resina fenólico uretano, sendo dividida 52% na parte I e 48% na parte II, pelo que para os 10 kg de areia utilizadas para a realização do ensaio foram adicionados 83,2 g da parte I e 76,8 g da parte II. Para a mistura e homogeneização recorreu-se ao misturador *Felino* (Figura 21) seguindo-se a preparação dos provetes nas mesmas condições às do processo de fabrico de machos.

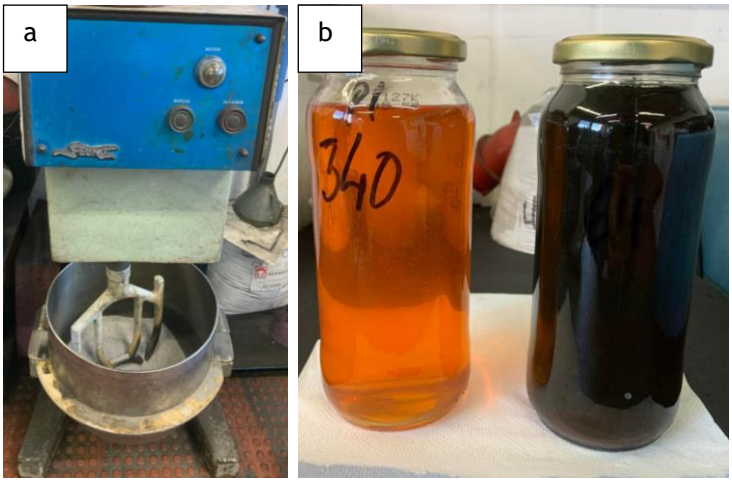


Figura 21- Misturador Felino (a); Parte I e Parte II do sistema de resinas (b).

Por último, procedeu-se ao enchimento da camisa de disparo da mistura através de ar comprimido (pressão de 6 bar) no qual promoveu que a mistura seja direcionada para o interior da caixa de provetes (Figura 22). Seguiu-se a remoção da camisa de disparo e colocação da cabeça de gaseificação sobre a caixa de provetes de modo a injetar o DMEA durante cerca de 20 segundos. Realizado este procedimento, a cabeça de gaseificação remove-se e a caixa é aberta para remover os provetes com secção retangular de dimensões de 175 x 22,4 x 22,4 mm.

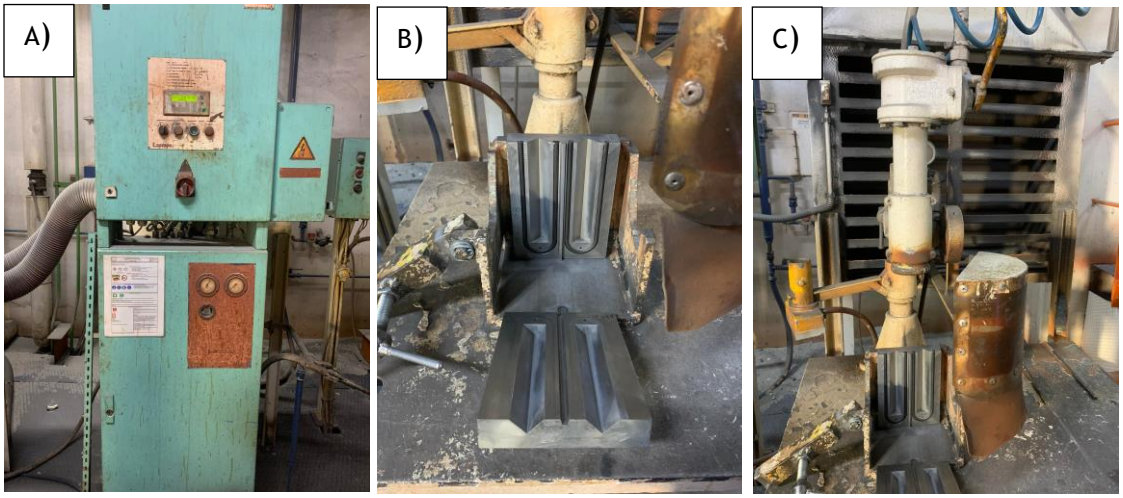


Figura 22- Gerador de DMEA (A), molde dos provetes de macho (B), máquina de disparo dos provetes (C).

4.2.1. Resistência à Flexão e Vida em Bancada

Os ensaios de caraterização da resistência à flexão dos provetes de areia de machos foram realizados através da medição da carga de rotura máxima em esforço de flexão após 3 min (considerado imediato), 30 min, 1 h, 2 h, com o intuito de analisar o tempo de vida em bancada de cada mistura (norma nº ME0034). Também foram realizados ensaios após 24 h cada um destes tempos, de modo a proceder à análise da evolução dos valores obtidos através dos ensaios de resistência à flexão (norma nº ME0039). Assim cada provete foi colocado numa posição horizontal numa prensa manual com manivela rotativa *Georg Fischer PFG* (Figura 23) que possui um manómetro com um ponteiro de arrasto, o qual tem como função de indicar a força no momento da rotura à flexão do provete. É de salientar que para cada condição de mistura foram realizados dois ensaios sendo obtido o resultado pela média aritmética dos dois valores.

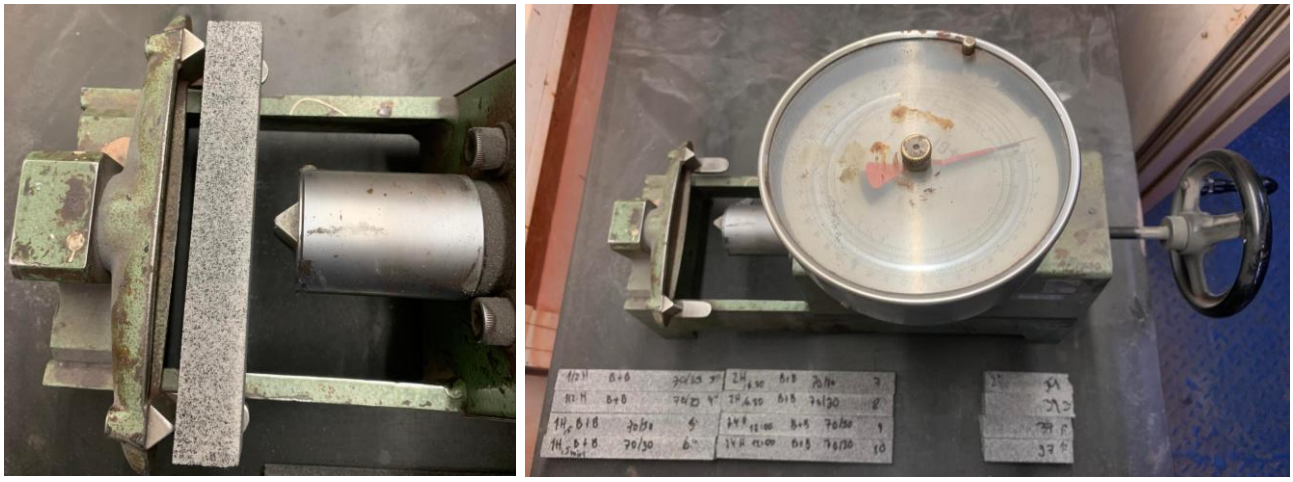


Figura 23- Equipamento de ensaio da resistência à flexão dos provetes de machos.

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1. CARATERIZAÇÃO DAS AREIAS

Inicialmente foi realizada a caraterização da morfologia dos grãos de areia dos diferentes tipos de areia utilizados (Figura 24), nomeadamente a areia de sílica (A), a areia de bauxite (B), areia pré- regenerada (C) e areia regenerada (D) com auxílio de um microscópio ótico, de modo a avaliar qualitativamente o grau de angularidade da areia, no qual representa um papel crucial durante a sua utilização. É de salientar que a areia pré-regenerada (areia utilizada no processo de vazamento e antes de ser submetida ao processo de regeneração) foi removida do circuito de areias após a sua utilização na linha de moldação.

De acordo com as imagens retiradas dos quatro diferentes tipos de areia, é possível observar uma diferença significativa na morfologia e no tamanho de grão dos grãos entre cada uma das areias. A areia de bauxite (B) é a que apresenta um grão mais esférico, seguindo-se a areia regenerada (D) com uma morfologia sub-esférica a sub-angular e a areia de sílica (areia nova) (A) com um grão sub-angular a angular. A areia pré-regenerada para além de apresentar grãos de areia mais angulares também se observa uma maior irregularidade de tamanhos dos grãos bem como à existência de aglomerados, nos quais serão destruídos durante o processo de regeneração, como mencionado no capítulo 3.10.

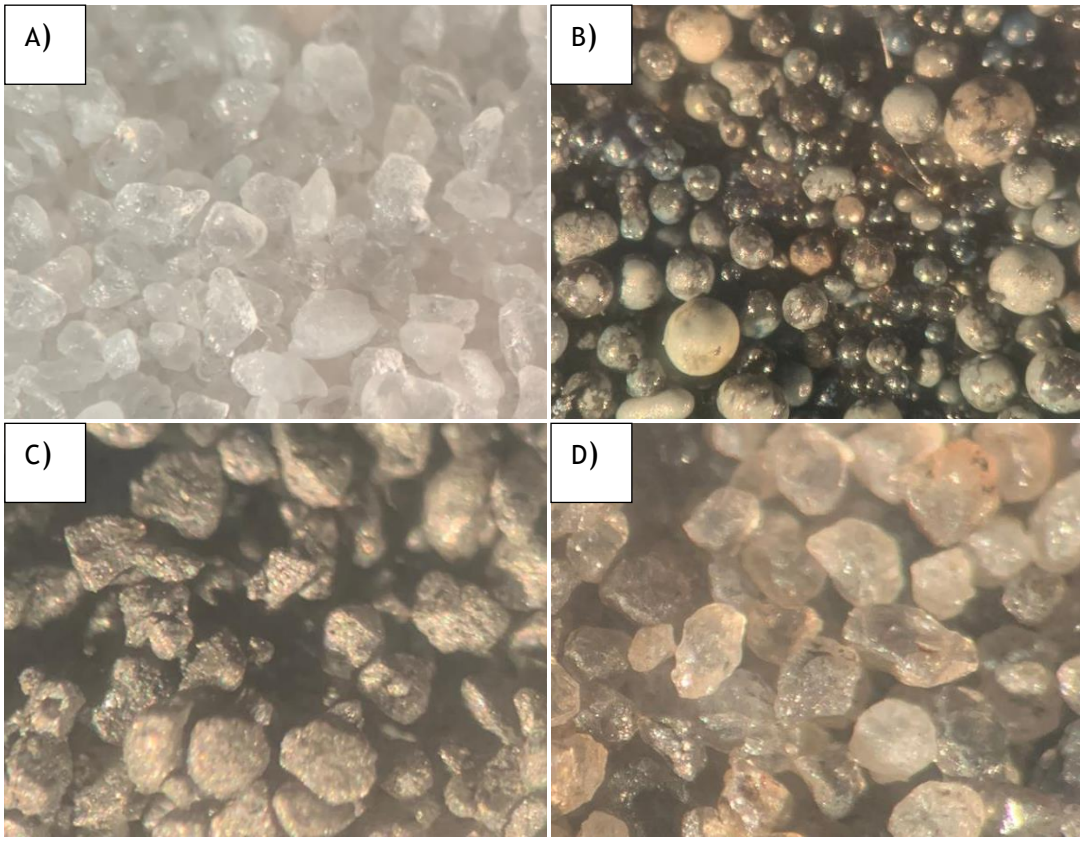


Figura 24- Amostras da areia de sílica (nova) (A), areia de bauxite (B), areia pré-regenerada (C) e areia regenerada (D) observadas com auxílio de microscópio ótico.

Para além de ser necessário quantificar a angularidade dos grãos dos quatro tipos de areia através do coeficiente de angularidade, foram também realizados ensaios de distribuição granulométrica no qual permitiu avaliar o tamanho dos grãos de cada areia, seguindo o procedimento descrito no capítulo 4. Para a areia de sílica e a de bauxite tal não foi necessário devido ao coeficiente de angularidade ser mencionado na carta de compra ao fornecedor. Como descrito em capítulos anteriores, quanto mais arredondado e maior for o tamanho do grão da areia, menor será a sua superfície específica.

Tabela 4- Valores de coeficiente de angularidade, índice de finura e perda ao fogo das areias analisadas.

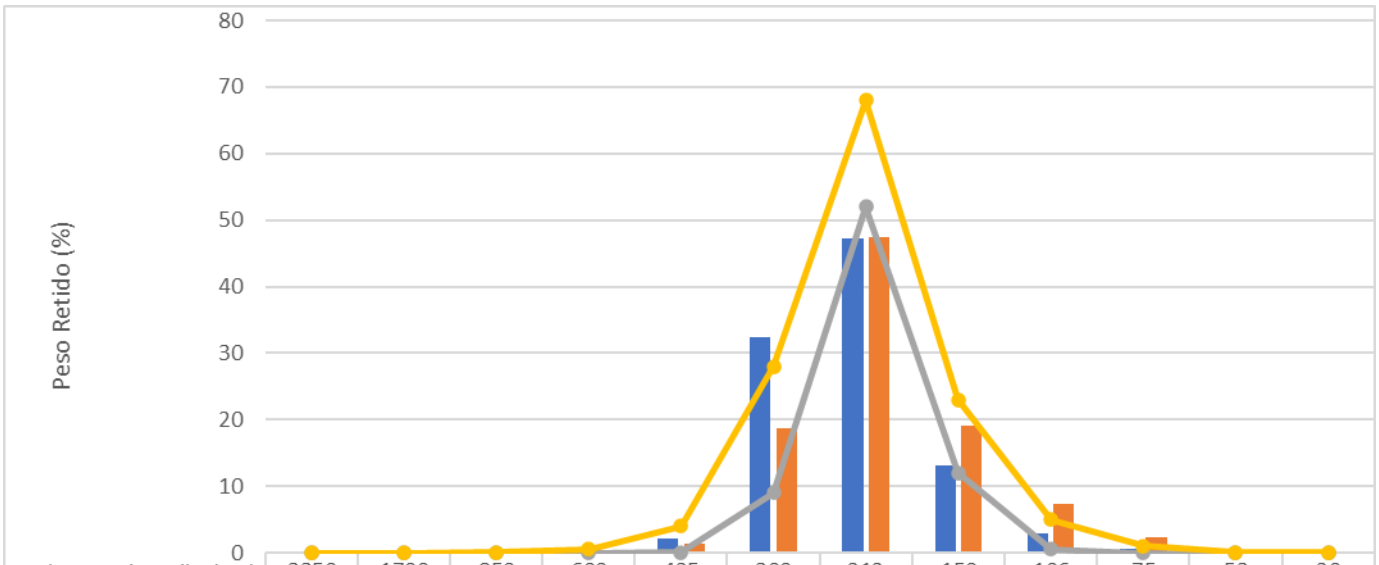
Tipo de Areia	Coeficiente Angularidade	Índice Finura	Perda ao Fogo (%)
Areia Nova (Sílica)	1.41	51	0.06
Areia Regenerada	1.15	59	0.20
Areia de Bauxite	1.02	55	0.08
Areia Pré-Regenerada	1.36	51	0.96

Os resultados descritos na Tabela 4 vão de encontro aos resultados observados na Figura 24, no qual a areia de bauxite é a que apresenta o grão mais arredondado, sendo quase 100% esférico (índice do coeficiente angularidade igual a 1 corresponde ao máximo de esfericidade que um grão de areia pode apresentar), seguindo-se a areia regenerada, também esta com um índice de coeficiente de angularidade pequeno, mas para a areia nova e pré-regenerada este índice já aumenta significativamente. A areia pré-regenerada apresenta uma diferença considerável do coeficiente de angularidade comparativamente à areia regenerada, uma vez que esta última já sofreu o processo de regeneração no qual ocorre a moagem dos grãos e estes começam a arredondar. Por outro lado, sendo o índice de finura uma propriedade indicativa do tamanho do grão da areia e este é inversamente proporcional ao tamanho do grão, ou seja, quanto maior o índice de finura, menor o tamanho do grão, conclui-se assim que a areia regenerada e a areia bauxite são as que apresentam menor tamanho do grão, seguindo-se a areia nova e a areia pré-regenerada. A diferença entre o índice de finura da areia pré-regenerada e regenerada é explicada pelo facto da areia durante a etapa de regeneração, no qual ocorre moagem dos grãos, vai promover a sua diminuição do tamanho do grão.

Por último, com os valores obtidos para o ensaio da perda ao fogo das diferentes areias, observa-se que, tal como esperado, a areia nova e areia bauxite apresentam valores muito próximos de zero (inferiores a 0.1%), uma vez que não se utilizou nenhuma resina em contacto com estas areias. No caso da areia regenerada, os valores de perda ao fogo são insignificantes uma vez que esta o ligante presente na areia foi removido durante o processo de regeneração, tendo por isso sido efetuado com eficácia. Por outro lado, a areia pré-regenerada, como possui areia de macho que por sua vez apresenta ligantes e não sofreu o processo de regeneração, os seus valores de perda ao fogo são superiores aos outros tipos de areia.

Na Figura 25 está apresentada a distribuição granulométrica das areias C e D, pré-regenerada e regenerada respetivamente, bem como os valores limites máximo e mínimo estabelecidos pela Funfrap relativo à percentagem de areia em peso que deve estar contida em cada um dos peneiros utilizados durante o ensaio, de modo a promover um maior controlo da areia utilizada para o fabrico dos machos.

É possível observar também que a areia pré-regenerada apresenta maior granulometria uma vez que cerca de 80% do seu peso retido está compreendido entre os 425 e 300 μm, contrariamente com a areia regenerada que contém 66% para as mesmas aberturas de malha. Além disso, a areia pré-regenerada, apresenta uma quantidade finos (partículas finas com tamanhos de grão inferiores a 75 μm) menor (0,86%) do que a areia regenerada (2,85%), o que é explicado pelo facto de esta última sofrer o processo de regeneração e por isso ser promovido a formação de finos. Para os restantes peneiros, a areia regenerada apresenta uma maior correspondência com os intervalos estabelecidos pela Funfrap, comprovando assim a capacidade de esta areia poder ser utilizada no fabrico de machos.



Abertura da malha (μm)	3350	1700	850	600	425	300	212	150	106	75	53	20
Pré-Regenerada	0	0	0,06	0,125	2,04	32,39	47,28	13,17	2,89	0,56	0,16	0,14
Regenerada	0	0	0	0,21	1,32	18,69	47,45	19,11	7,37	2,24	0,44	0,17
Limite Min	0	0	0	0	0,1	9	52	12	0,5	0	0	0
Limite Máx	0	0	0,1	0,5	4	28	68	23	5	1	0,1	0,1

Figura 25- Distribuição Granulométrica da areia regenerada e pré-regenerada.

Para além da morfologia e tamanho dos grãos de areia, uma outra caraterística de extrema importância das areias de machos está relacionada com o seu grau de humidade e com o teor e natureza das impurezas que se encontram presentes. Assim, caso a areia apresente valores elevados de humidade vai promover um difícil escoamento da areia bem como na redução da resistência à flexão dos machos produzidos e uma maior

quantidade de gases gerados durante o vazamento das peças fundidas, nos quais pode levar à ocorrência de um maior número de defeitos. Na Funfrap o valor máximo estabelecido para o teor de humidade é de 0,20%, sendo que de acordo com a Tabela 5, a areia regenerada utilizada para a realização dos ensaios encontra-se abaixo deste valor, o que representa uma eficácia no processo de secagem durante a etapa de regeneração. É de salientar, no entanto, que as condições de armazenamento da areia podem influenciar o seu teor de humidade. A argila AFS que é indicativo do teor de finos presente na areia, pelo que este se encontra abaixo do valor estabelecido pela empresa (2%).

Tabela 5- Valores de argila AFS, humidade, carbono, argila ativa e voláteis da areia regenerada utilizada.

Propriedade	Areia Regenerada
Argila AFS (%)	0.59
Humidade (%)	0.04
Carbono (%)	0.14
Argila Ativa (%)	0.25
Voláteis (%)	0.19

5.2. CARATERIZAÇÃO DOS PROVETES DE MACHO

Procedeu-se então à caracterização dos provetes de macho através dos ensaios de resistência à flexão, nos quais foram realizados através da medição da carga de rotura máxima em esforço de flexão após 3 min (considerado imediato), 30 min, 1 h, 2 h e 24 h após a realização das misturas. O intuito de realizar o ensaio após cada um dos tempos, é de analisar a evolução dos valores obtidos da resistência à flexão.

Desta forma, foram definidas 7 misturas como se apresenta na Tabela 6: misturas A com areia nova e as misturas B com areia regenerada. Para todas as misturas foi utilizada a mesma percentagem de resina (em peso), nomeadamente 52% da parte I e 48% da parte II. É de salientar que o máximo teor de areia regenerada utilizada para este trabalho é de 50% uma vez que acima deste valor, o fabrico de machos para retornos de óleo é pouco viável devido à menor resistência desta areia.

Tabela 6- Misturas e respetivas composições de areias.

Nome da Mistura	Composição da Mistura
A0	100% Areia Nova
A1	70% Areia Nova + 30% Areia Bauxite
A2	50% Areia Nova + 50% Areia Bauxite
A3	30% Areia Nova + 70% Areia Bauxite
B0	100% Areia Regenerada
B1	70% Areia Bauxite + 30% Areia Regenerada

B2	50% Areia Bauxite + 50% Areia Regenerada

Após a produção dos provetes para cada uma das misturas estes foram sujeitos a ensaios de flexão (Figura 26). As misturas A0 e B0 foram as que se obtiveram menores valores de resistência à flexão devido a serem constituídas inteiramente por areia nova ou areia regenerada, e estas apresentarem maior tamanho de grão e uma presença de finos, respetivamente. Também, por a areia de bauxite promover uma elevada resistência à flexão, a mistura que evidenciou valores mais elevados desta propriedade foi precisamente a que apresenta maior teor de bauxite, nomeadamente a mistura A3. Além disso, seria de esperar valores de resistência à flexão menores para as amostras de areia regenerada e areia bauxite (B1, B2) comparativamente às misturas de areia nova e areia bauxite (A1, A2), pelo que tal se observou para todos os tempos, à exceção da mistura B1 no qual apresentou valores similares de resistência à flexão, sendo, no entanto, este efeito promovido pela presença de maior quantidade areia bauxite. É de salientar ainda que se observou para a maior parte das misturas um aumento dos valores da resistência à flexão até 0.5 ou 1 hora após a realização da mistura, seguindo-se um decréscimo, pelo que o tempo de espera da mistura após a sua produção não deve ultrapassar estes valores.

Embora a obtenção dos valores de resistência à flexão para as misturas B não sejam os mais promissores comparativamente com os valores obtidos para outras misturas, estas podem ser utilizadas na produção de machos que não requeiram a necessidade de elevada resistência à flexão ou que não apresentem geometrias complexas ou de paredes de pequena espessura.

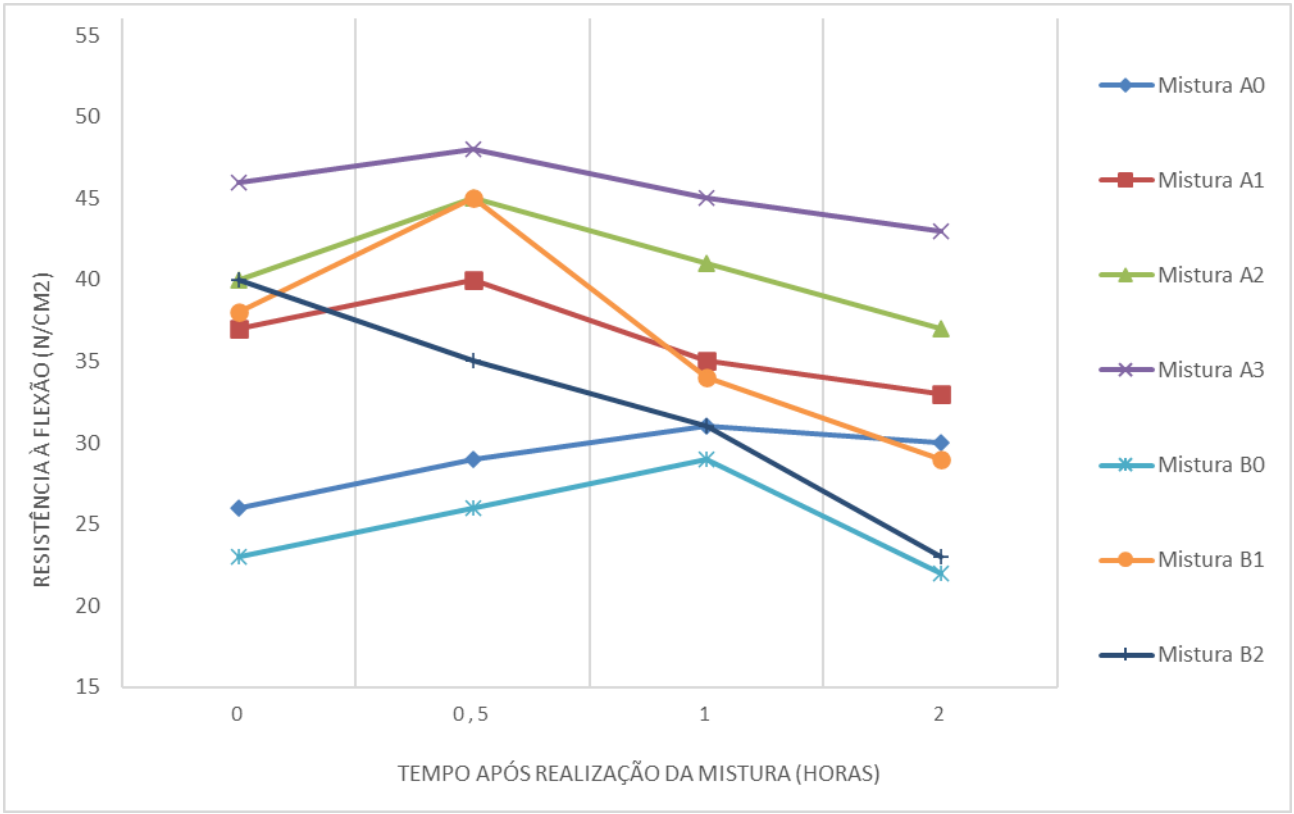


Figura 26- Resistência à Flexão medidos nos provetes no imediato (3 minutos), 0.5 horas, 1 hora e 2 horas após a realização de cada mistura

Para além de os provetes de cada uma das misturas serem analisados até duas horas, também foram analisados 24 horas após a sua produção, com o intuito de avaliar qual a influência do tempo de armazenamento na resistência à flexão dos provetes de machos, uma vez que existem inúmeras situações nos quais os machos são armazenados por períodos de tempo superiores a 24 horas, e por isso é importante garantir que estes mantêm as suas propriedades mecânicas de modo a não produzir defeitos nas peças durante o processo de vazamento. Desta forma, observou-se em todas as misturas um aumento da resistência à flexão, sendo os resultados um pouco semelhante aos obtidos anteriormente, isto é, os valores de resistência à flexão serem proporcionais à quantidade de bauxite presente na mistura.

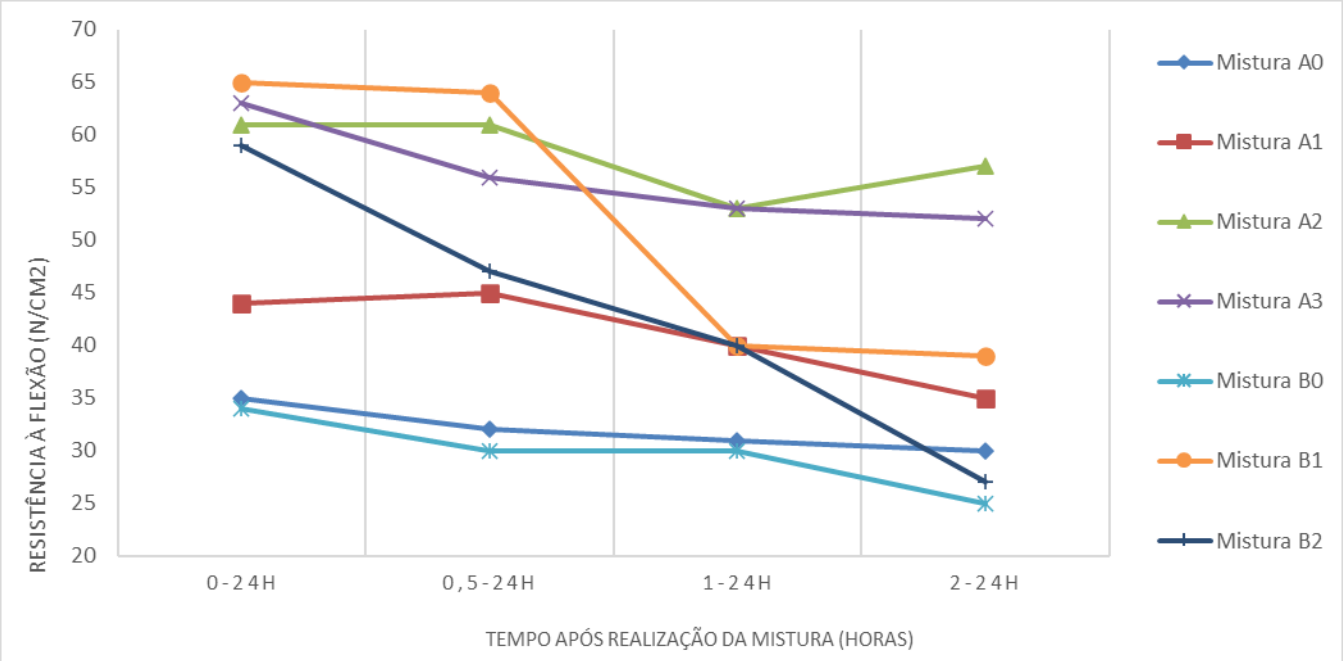


Figura 27- Resistência à Flexão após 24 Horas para cada um dos tempos iniciais de 0.5 horas, 1 hora e 2 horas após a realização dos provetes para cada mistura

Com a obtenção dos valores da resistência à flexão realizados no dia e após 24 horas a produção da mistura, é possível calcular *delta* (Δ), um parâmetro de garantia que a mistura das areias com as resinas foi homogénea pelo que consiste na diferença entre os valores obtidos após 24 horas e os valores obtidos no imediato, para cada uma das misturas. Como ocorre um aumento dos valores de resistência à flexão após 24 horas, seria de esperar em todas as misturas um delta superior ou igual 0, como se observa na Figura 28.

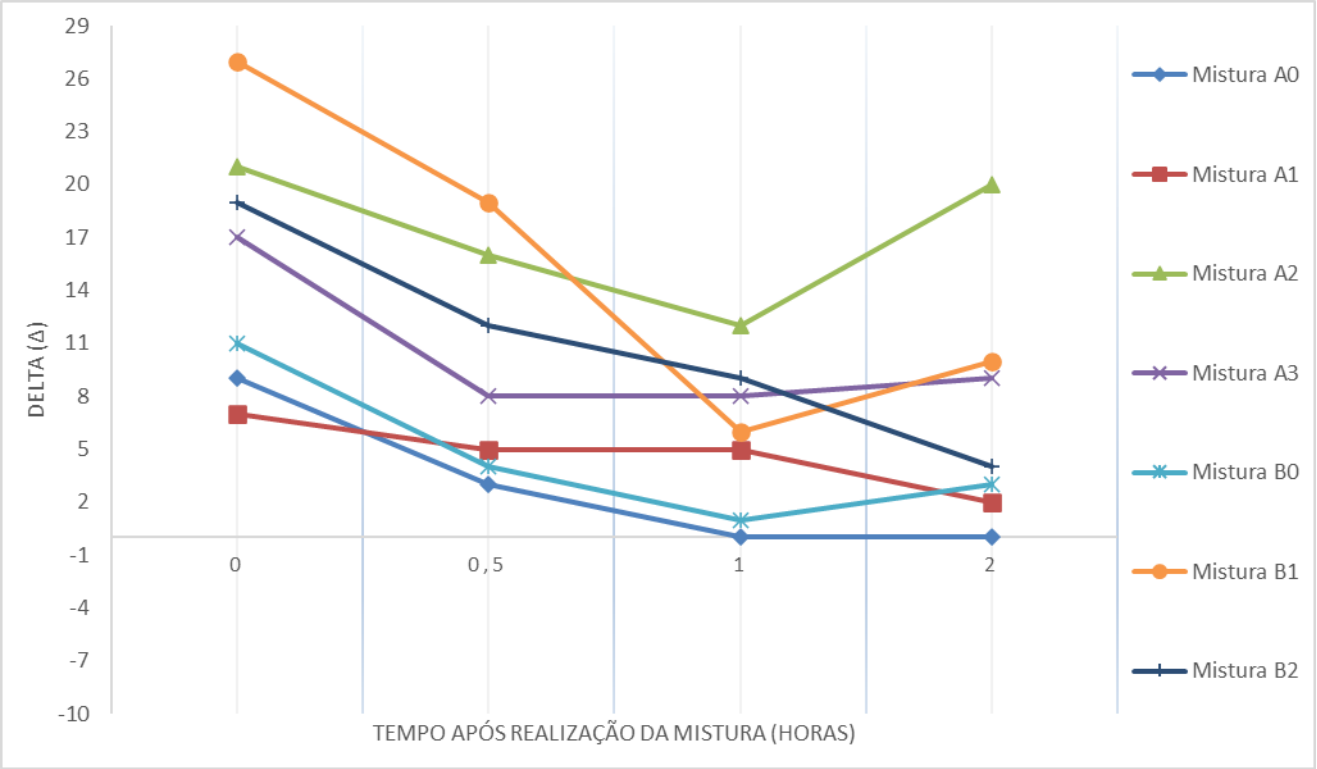


Figura 28- Variação dos valores da resistência à flexão (Delta-Δ) obtidos para as misturas realizadas

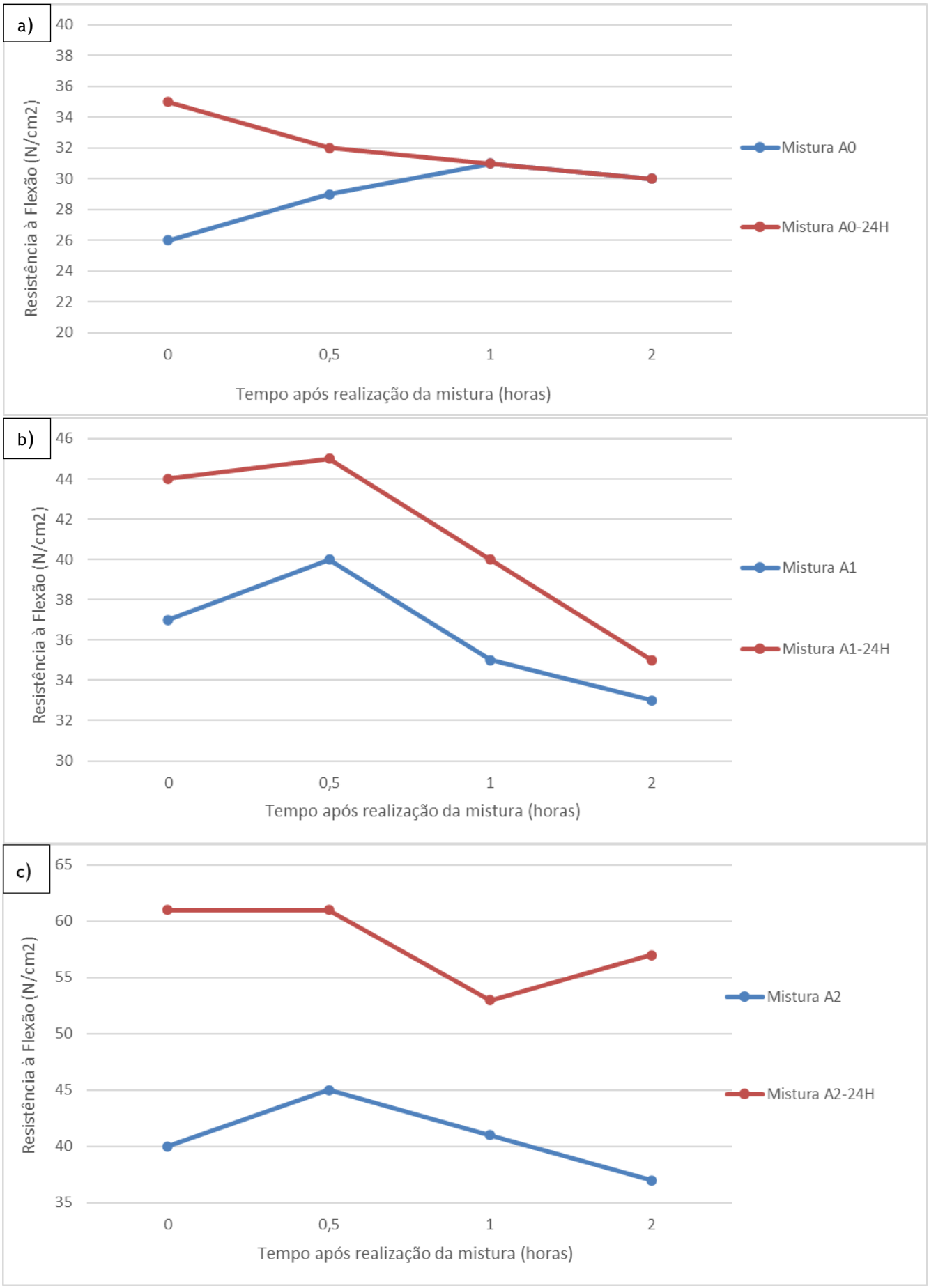


Figura 29- Comparação da resistência à flexão realizada imediatamente, 0.5, 1 e 2 horas em relação com os valores homólogos após 24 horas: a) mistura A0; b) mistura A1; c) mistura A2

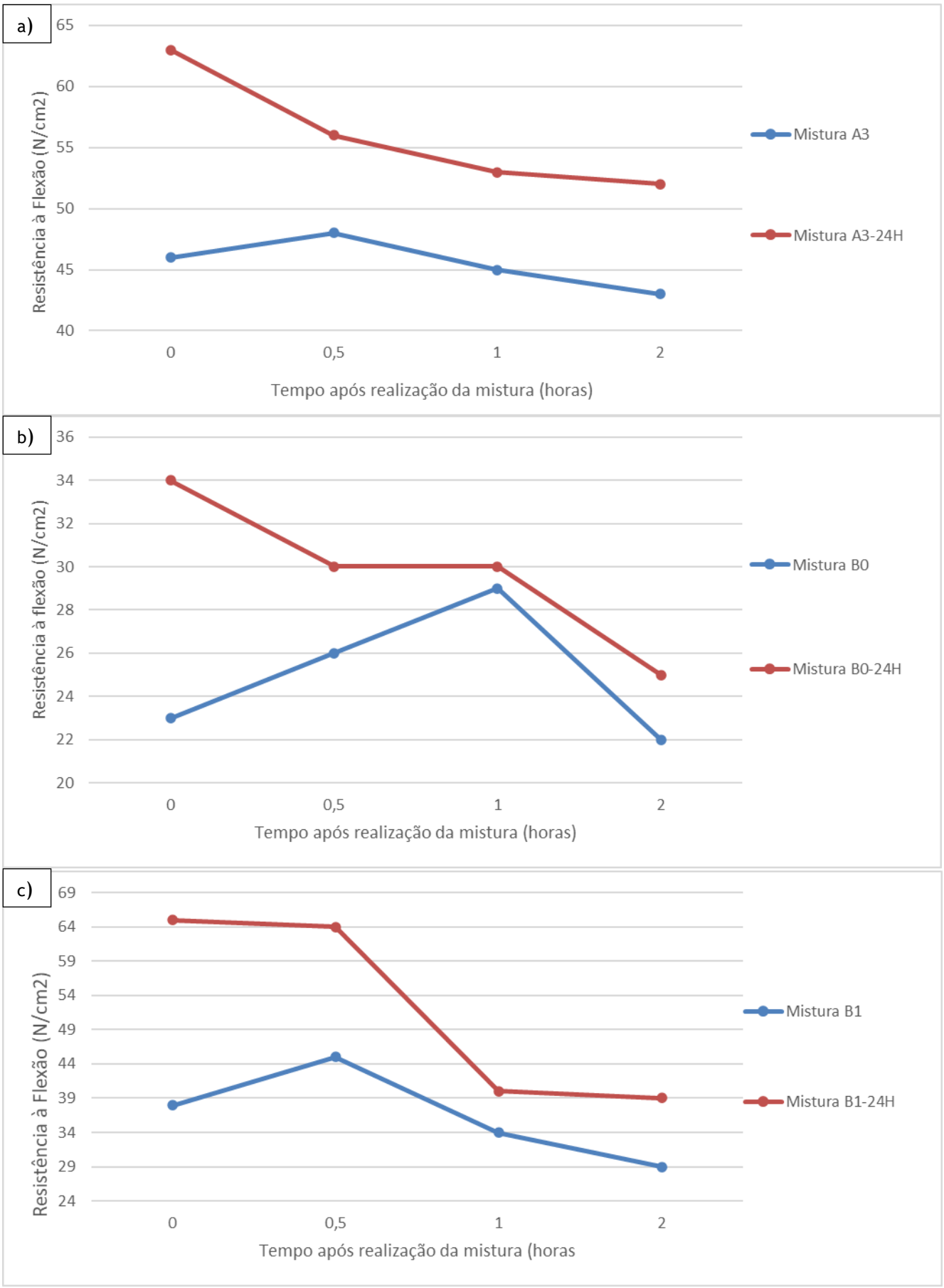


Figura 30- Comparação da resistência à flexão realizada imediatamente, 0.5, 1 e 2 horas em relação com os valores homólogos após 24 horas: a) mistura A3; b) mistura B0; c) mistura B1

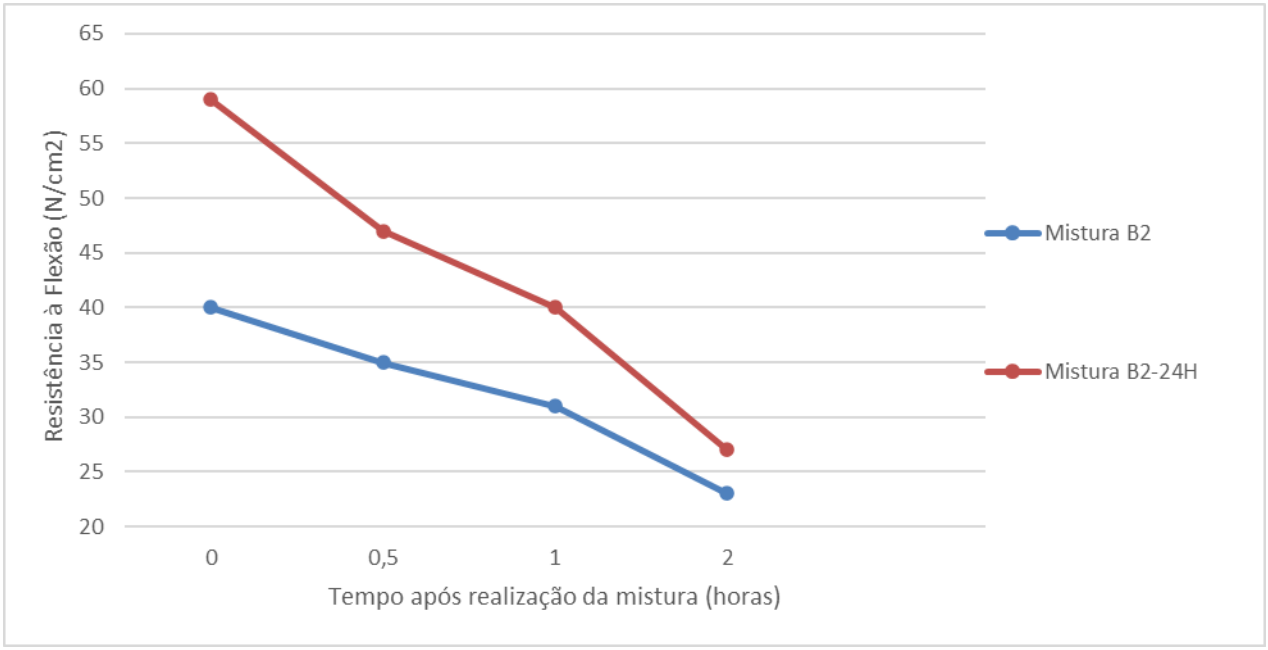


Figura 31-Comparação da resistência à flexão para a mistura B2 realizada imediatamente, 0.5, 1 e 2 horas em relação com os valores homólogos após 24 horas

De acordo com as Figuras 29, 30 e 31 é possível concluir que para todas as misturas realizadas, o aumento do tempo de armazenamento dos provetes de machos, promove um incremento dos valores de resistência à flexão. Assim, sempre que possível e seja necessário que o macho apresente maiores valores de resistência, estes devem ser armazenados durante 24 horas de modo a atingirem maiores valores de resistência à flexão.

Com o intuito de analisar com maior detalhe o efeito da utilização da areia regenerada em vez de areia nova, para os mesmos teores em peso de areia bauxite, nas Figura 32 e 33, estão apresentadas comparações entre as misturas A3 (30% Areia Branca + 70% Areia Bauxite) com a mistura B1 (30% Areia Regenerada + 70% Areia Bauxite), e entre as misturas A2 (50% Areia Nova + 50% Areia Bauxite) com a mistura B2 (50% Areia Regenerada + 50% Areia Bauxite), respetivamente.

A mistura de areia nova apresenta, no imediato, valores superiores de resistência à flexão, mas este resultado não é observado nas misturas produzidas 24 horas depois, podendo ser resultante de más condições de fabrico dos provetes, como por exemplo uma fraca homogeneidade na mistura das resinas com a areia ou tempo insuficiente de passagem do gás endurecedor (amina).

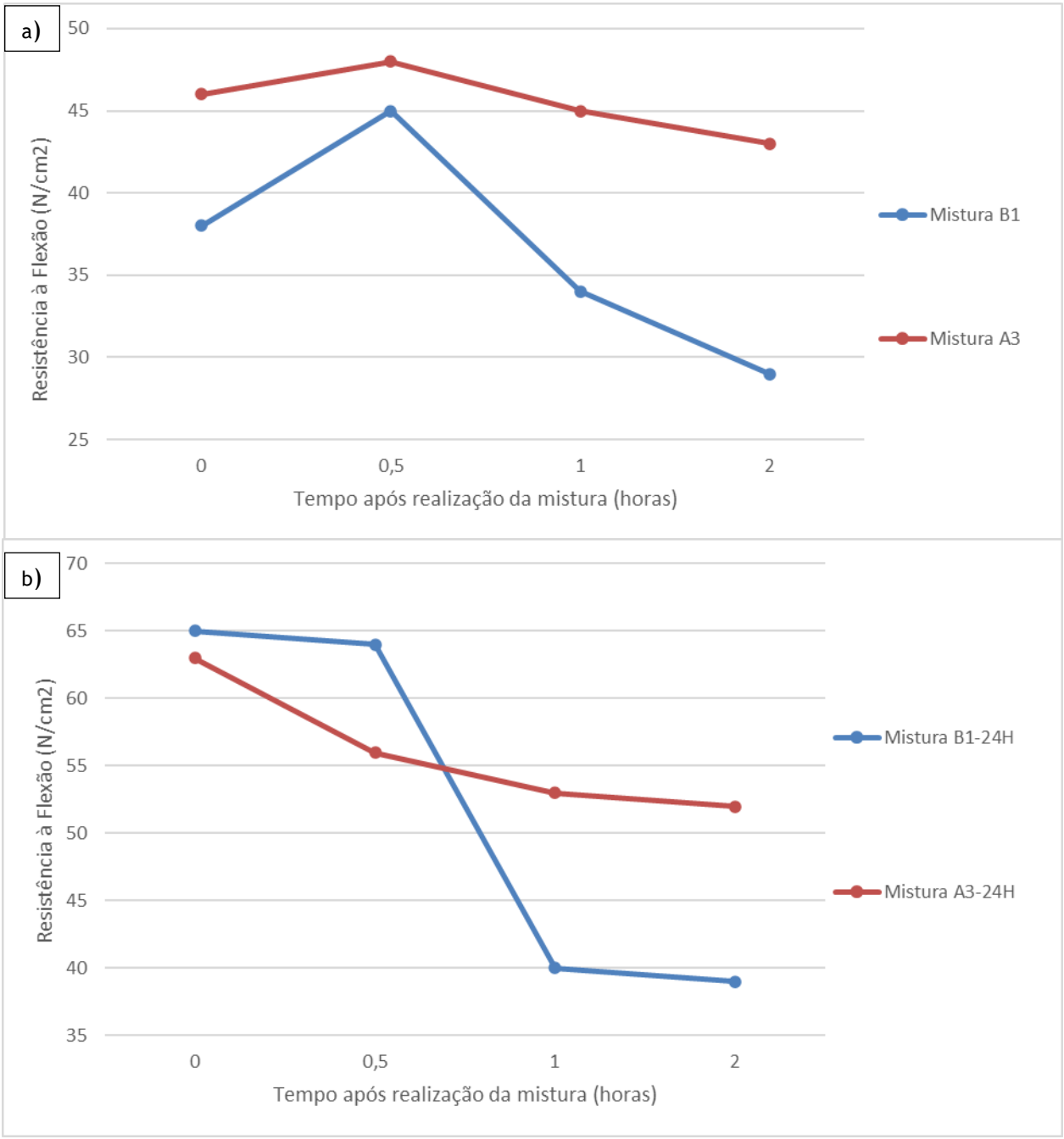


Figura 32- Análise do efeito da utilização da areia nova comparativamente com areia regenerada, para a mesma percentagem de bauxite (70%) para os provetes de 24 horas: a) Imediato; b) 24 Horas

Por outro lado, para as misturas de 50% de areia bauxite os resultados vão ao encontro do esperado, uma vez que se observa que a utilização de areia nova promove um aumento da resistência à flexão dos provetes, tanto para a análise no imediato como após 24 horas a realização dos provetes. No entanto, a gama de valores obtidos para a mistura B2 está dentro dos limites estabelecidos para a Funfrap para a produção de machos de geometrias menos complexas, como é o caso dos retornos de óleo (RO_2).

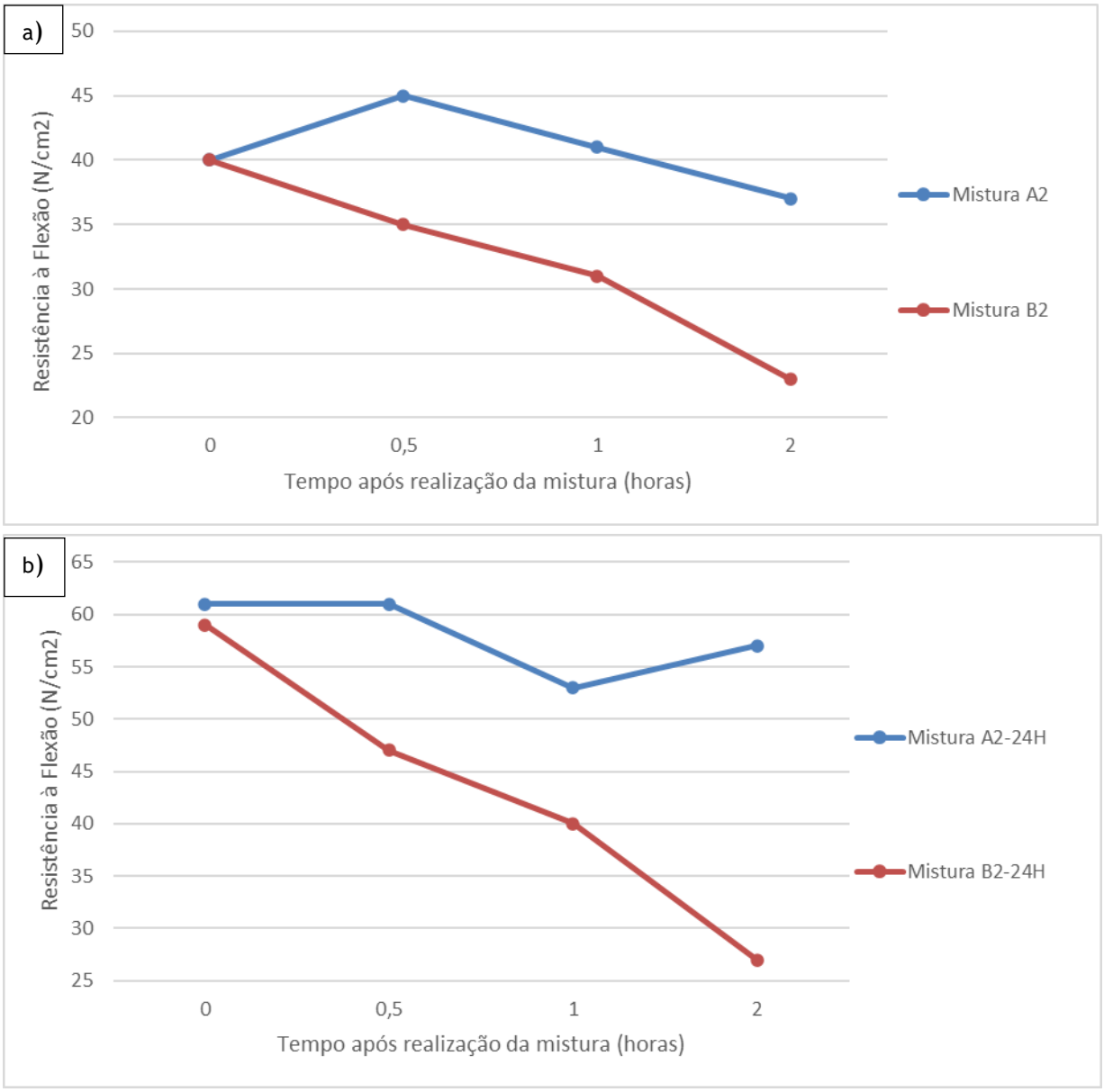


Figura 33- Análise do efeito da utilização da areia branca comparativamente com areia regenerada, para a mesma percentagem de bauxite (50%): a) Imediato; b) 24 Horas

5.3. ENSAIO INDUSTRIAL COM A MISTURA B2

De acordo com os melhores resultados de resistência à flexão, utilizando areia regenerada, foram então produzidos pelo setor da macharia o macho designado por retorno de óleo (RO2) da peça 008. A escolha deste tipo de macho, esteve relacionado com o facto de tentar substituir a mistura inicial constituída por 70% areia nova e 30% areia bauxite, com a utilização de areia regenerada. Além disso, este macho não apresenta paredes de pequena espessura, não estando por isso tão sujeito à ocorrência de fissuras durante o contacto do metal líquido na etapa de vazamento. Assim, foi realizada uma mistura constituída por 50% areia bauxite, utilizando o misturador *FORDATH 3* como na Figura 34, utilizando 100 kg de areia regenerada, 100 kg de areia de bauxite e 1,6 % do conjunto das resinas (52% parte I e 48% parte II).

Figura 34- Misturador FORDATH 3 utilizado para a mistura.

O grande desafio deste ensaio industrial esteve relacionado com a produção dos machos e não com a produção da peça vazada. Foram efetuadas várias tentativas de produção dos machos, tendo surgido dois problemas distintos:

- Quebra dos RO inferiores, devido ao facto de estes possuírem paredes mais finas e não suportarem o próprio peso;
- Fraco enchimento da cavidade da caixa de machos com a produção de machos porosos, como se evidencia na Figura 35, podendo este fenómeno ser explicado pelo facto de se utilizar uma quantidade bauxite superior à quantidade habitual. Como esta apresenta uma baixa fluidez, bem como a presença de grãos de areia mais pequenos proveniente da utilização de areia regenerada, resulta assim numa mistura menos permeável, comparativamente à utilização de areia nova, e por isso ocorre uma menor passagem de ar entre os grãos de areia promovendo um enchimento da caixa de machos insuficiente.

É de salientar que com o passar do tempo, e estando a mistura realizada à espera de ser utilizada num canal denominado por tremonha, a sua resistência vai diminuindo pelo que o ideal seria preparar menores quantidades de mistura de cada vez de modo a evitar tempos de vida em bancada dos machos muito prolongados e assim não ocorrer a diminuição da resistência.

Figura 35- Exemplos de machos produzidos no qual ocorreram problemas de enchimento do molde/quebra dos machos.

Desta forma, na realização deste ensaio industrial com a mistura de 50% areia regenerada e 50% areia de bauxite, e de modo a minimizar a ocorrência de defeitos durante a produção dos machos, recorreu-se à utilização de um outro equipamento com maior fiabilidade (máquina 11) bem como a um aumento do teor de resina em cerca de 12,5%, nomeadamente de 1.6% para 1.8% (em peso) de modo a promover um maior endurecimento dos machos produzidos bem como no enchimento da caixa de machos mais homogéneo. Desta forma, a produção dos machos ocorreu com elevada eficácia, pelo que foi possível a obtenção de um total de 60 machos, 30 RO superior e 30 RO inferior como se apresenta na Figura 36.

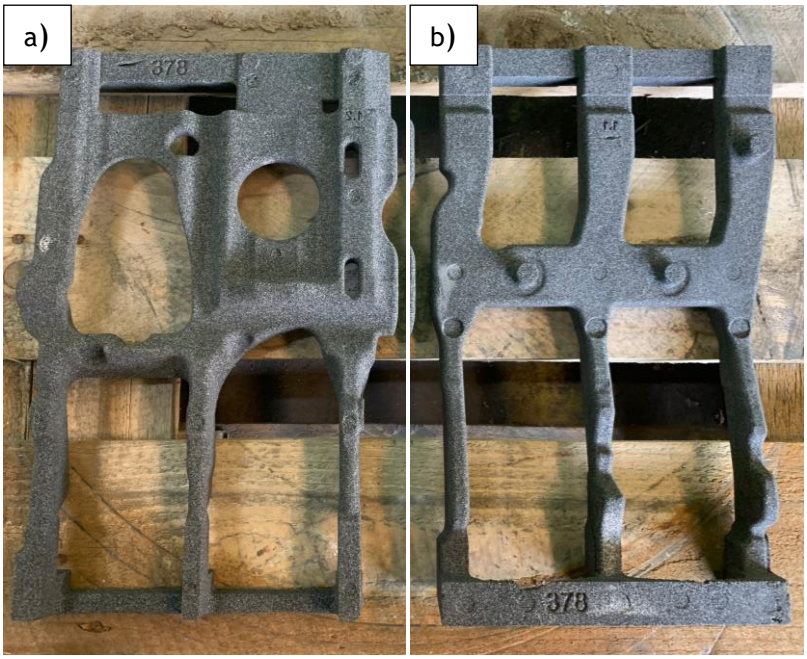


Figura 36- Exemplos de Machos 008 produzidos com a mistura de 50% Bauxite e 50% Areia Regenerada: a) RO inferior; b) RO Superior.

Após a produção dos machos, estes foram colocados numa área de amadurecimento onde permanecem durante pelo menos 24 horas, de modo que os seus valores de resistência à flexão aumentassem, e por isso, não ocorresse a sua quebra durante as etapas de pintura e secagem. Posto isto, estes foram colocados em gabaris, onde foi realizada a sua pintura seguida de secagem, como apresentado na Figura 37:

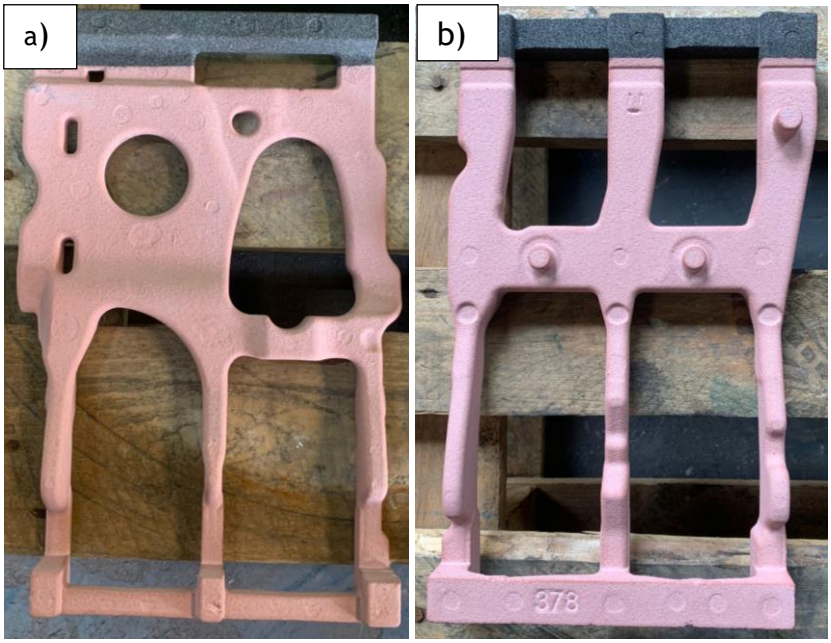


Figura 37- Exemplos de Machos 008 produzidos com a mistura de 50% Bauxite e 50% Areia Regenerada após pintura: a) RO inferior; b) RO Superior.

A pesagem dos machos foi realizada com uma amostra de 40 unidades, 10 RO Superior e 10 RO Inferior tanto para a mistura inicial como para a nova mistura utilizadas, pelo que a média das pesagens se encontra descrita na Tabela 7 (os resultados detalhados de cada uma das pesagens de cada macho encontram-se na Tabela A6 presente no capítulo Anexos). Observa-se assim que existe um aumento de massa dos machos produzidos com a nova mistura, explicado pelo facto de esta apresentar uma maior quantidade de bauxite comparativamente com a mistura inicial (70% areia nova e 30% areia bauxite). No capítulo 5.3.1 será abordado qual o efeito deste aumento de massa ao nível dos custos de produção.

Tabela 7- Medição da massa média dos RO produzidos pelo leito inicial e pelo novo leito utilizado

Tipo de Mistura Utilizado	RO Inferior (g)	RO Superior (g)
008 Mistura Inicial	1062,5	1067,4
008 Nova Mistura	1107,4	1109,9
Aumento de Massa	4,2%	3,9%

Por último, após garantir a secagem dos machos de retornos de óleo produzidos, foram colocados na linha de moldação, juntamente com todos os restantes machos necessários para a produção da peça vazada (cilindros, galetes, camisas e tetos de água), seguido do vazamento na cavidade moldante. Na Figura 38 apresenta-se a disposição dos machos na cavidade moldante:

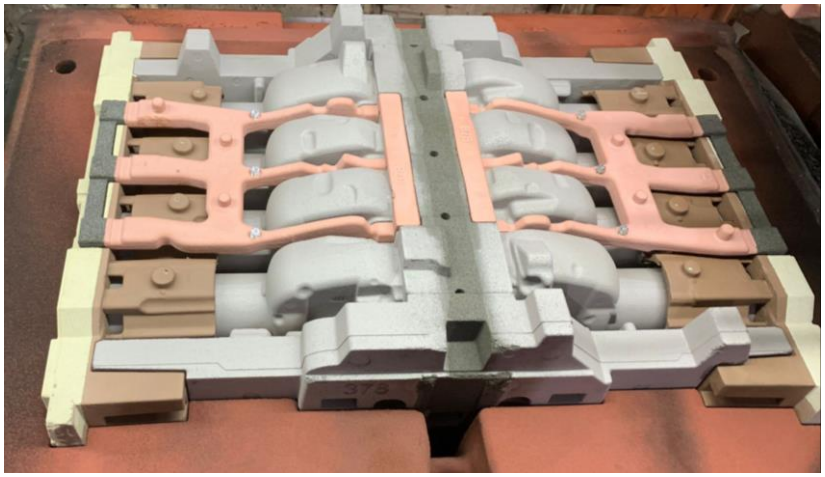


Figura 38- Caixa de moldação utilizada para realizar o vazamento da peça 008

Realizado o vazamento, foi necessário proceder ao abate da moldação e respetiva separação da bacia de vazamento e dos gitos de descida da peça final. Posteriormente a peça vazada seguiu para os locais acabamento, onde ocorreu a granalhagem, retificação e remoção do excesso de areia e de metal que possam ter ficado no exterior e interior da peça vazada, seguindo-se as etapas de pintura e secagem, obtendo-se assim a peça final, como se apresenta na Figura 39:

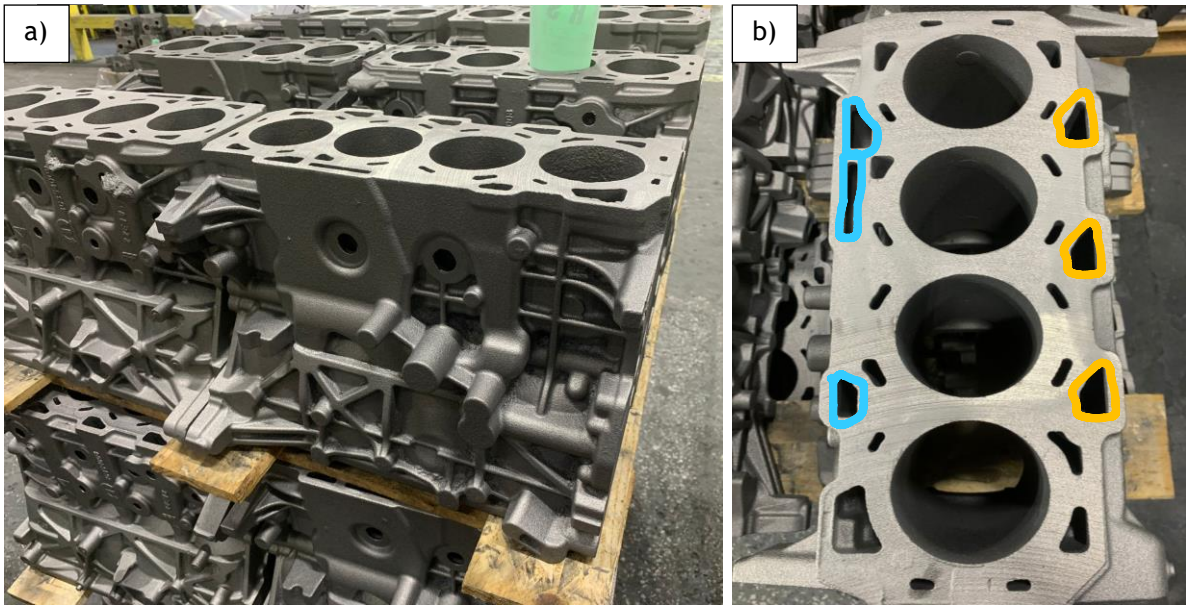


Figura 39- Bloco de motor 008: a) Vista Isométrica; b) Vista Superior: RO inferior (azul); RO Superior (laranja).

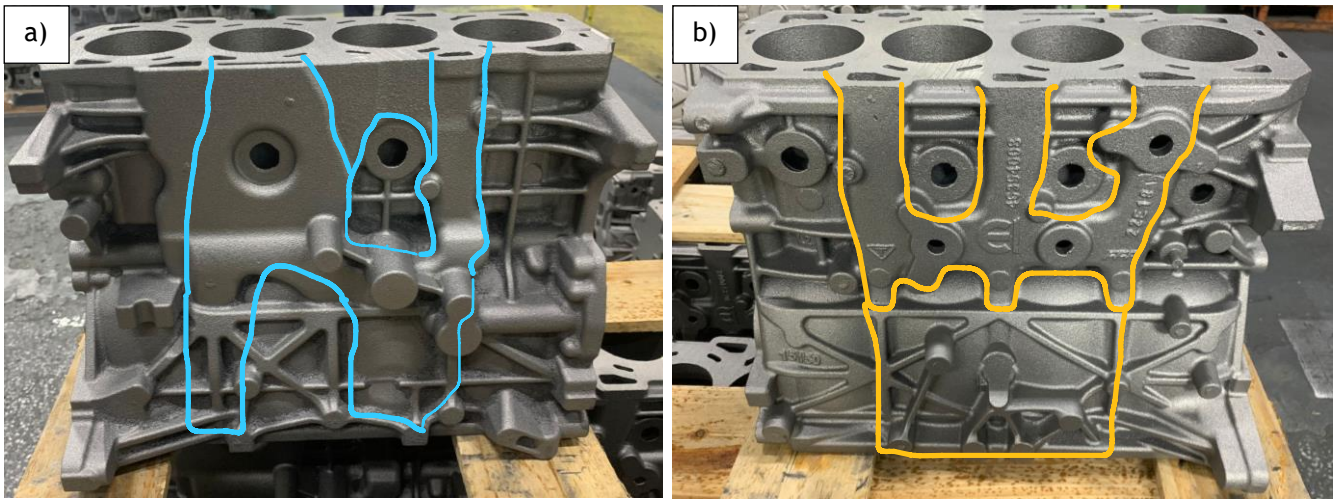


Figura 40- Bloco de motor 008: a) RO inferior (azul); b) RO Superior (laranja).

Para uma comparação mais detalhada da utilização da mistura de areia regenerada com bauxite nos retornos de óleo, procedeu-se à produção de blocos de motor 008 nos quais foram utilizadas misturas habituais da empresa, nomeadamente uma mistura de areia nova com areia de bauxite. Desta forma, foram contabilizados todos os blocos produzidos e os respetivos tipos e números de defeitos encontrados nos locais onde se situam os retornos de óleo. Num total de 30 peças vazadas com a mistura de areia regenerada, 5 foram rejeitadas por não cumprirem os requisitos de qualidade. Na Tabela 8 encontra-se o registo do número total de defeitos quer de penetração de metal líquido em fissuras presentes no macho (Figura 41a) quer de sinterização da própria areia de macho (Figura 41b), sendo que estes defeitos são posteriormente removidos pelo setor dos Acabamentos assegurando assim a garantia de qualidade da peça obtida.

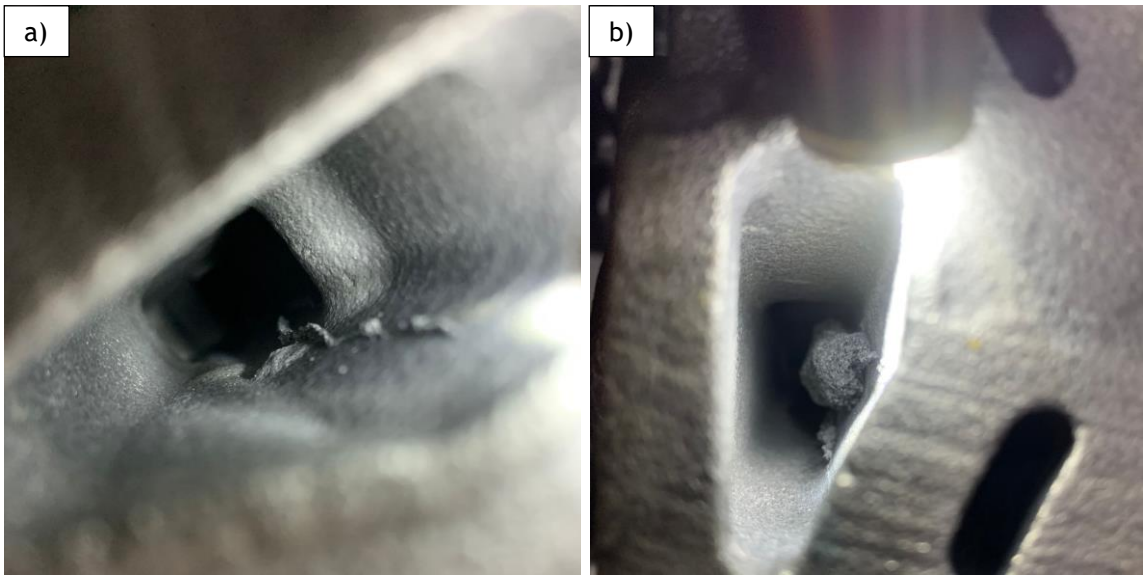


Figura 41- Exemplos de defeitos encontrados em blocos de motor 008: a) penetração metal no macho; b) sinterização/inclusões de areia.

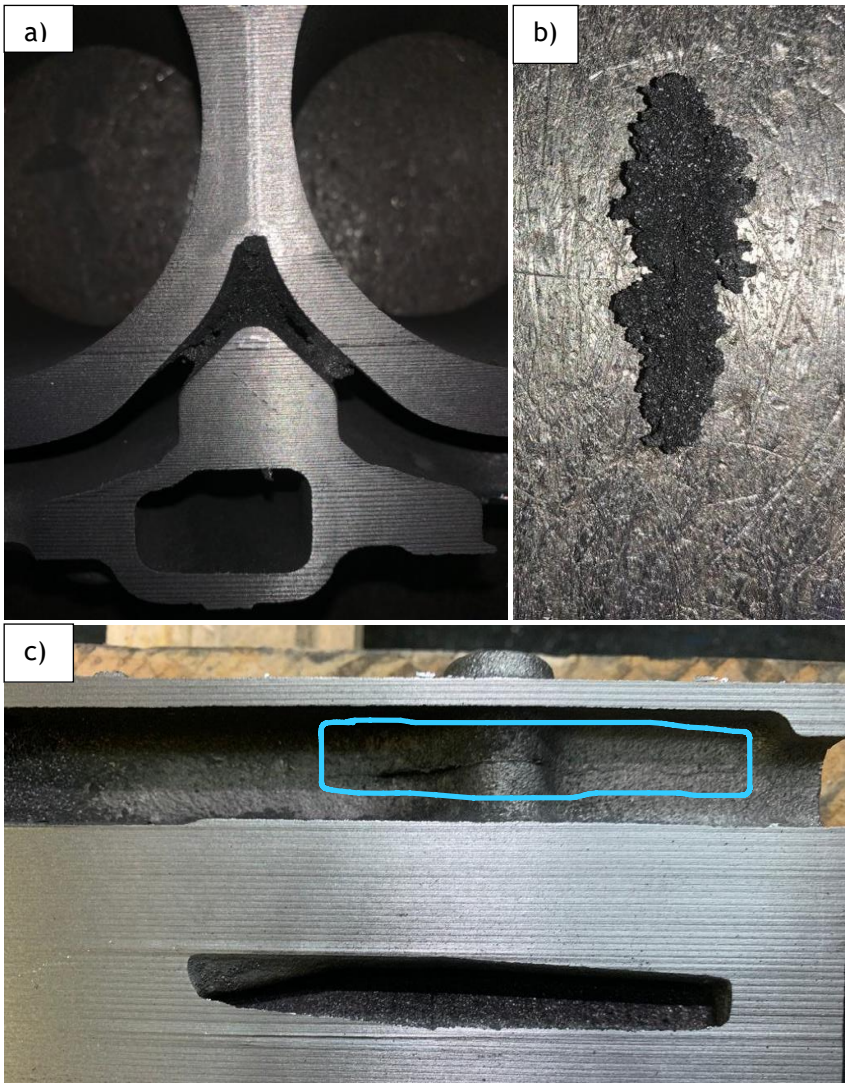


Figura 42- Secção de um bloco de motor 008: a) e b) inclusão de areia; c) penetração de metal em fissura do macho.

De modo a ser possível avaliar o efeito da utilização da nova mistura utilizada na peça final, foram contabilizados o número de defeitos (penetração de metal líquido numa fissura do macho e sinterização da areia de macho), sendo contabilizadas 25 peças produzidas com a nova mistura e 53 com a mistura inicial. Para o cálculo da percentagem de peças com defeitos, foi necessário ter em conta o facto de cada RO Superior e o RO Inferior apresentarem 3 e 2 orifícios respetivamente, e por isso o número de defeitos é superior ao número de peças no caso da mistura de areia nova e areia bauxite.

Tabela 8- Contabilização do número e tipos de defeitos observados nos blocos de motor 008 produzidos

Tipos de Defeitos	Areia Regenerada + Areia Bauxite		Areia Nova + Areia Bauxite	
	RO Superior	RO Inferior	RO Superior	RO Inferior
Penetração metal no macho	17	4	90	27
Sinterização	7	0	75	18
Nº Total de Peças	25		53	
% Peças com Defeitos	32 %	8%	100%	42%

De acordo com a Tabela 8 é evidente que a utilização da mistura de areia regenerada com areia bauxite promove uma redução significativa no número de defeitos que surgem no interior dos retornos de óleo, tanto RO inferior como no RO superior. Este efeito pode ser explicado devido ao facto da quantidade de areia de bauxite que se utilizou ser maior comparativamente com a mistura inicial, uma vez que esta areia evita a reação térmica no contacto com o banho metálico, não ocorrendo assim a sinterização da areia de macho promovendo uma melhoria da qualidade superficial da peça. Além disso, como se utilizou uma maior quantidade de ligante, este vai atuar como um amortecedor e diminuir a ocorrência de defeitos superficiais no macho.

Por outro lado, como a areia regenerada é constituída por sílica no qual esta já sofreu a sua expansão térmica durante o processo de vazamento, previamente a sofrer o processo de regeneração, seria de esperar igualmente que a quantidade de defeitos por penetração do metal líquido no macho fosse menor, comparativamente com a areia nova que nunca sofreu processo de expansão térmica da sílica.

5.3.1. Análise de Custos

A análise dos custos associados à utilização da mistura de areia regenerada com areia de bauxite em proporções de 50% juntamente com o aumento de resina para 1.8% ao invés de 1.6% (em peso), está apresentada na Tabela 9. Não foram considerados os custos associados à manutenção, utilização do equipamento da regeneração de areia nem o custo/poupança associados à deposição da areia em aterro.

Tabela 9- Aumento de custo associado à utilização do novo leito B2

Leito	Aumento de Custo
Leito Inicial (70% Areia Nova + 30% Areia Bauxite)	-
Novo Leito (50% Areia Regenerada + 50% Areia Bauxite)	52%

A utilização da nova mistura apresenta um aumento de custo de 52% devido ao facto de se utilizar areia de bauxite numa maior proporção comparativamente com a mistura inicial. Deste aumento de 52%, cerca de 90% está associado à utilização de areia bauxite uma vez que esta matéria-prima apresenta um custo significativamente superior ao custo da aquisição de areia nova (cerca de 30 vezes superior). É de salientar ainda que o custo associado ao processo da areia regenerada é cerca de metade do custo de aquisição de areia nova.

No entanto, embora o aumento de custo da nova mistura seja significativo, a presença de areia bauxite é essencial uma vez que esta aumenta a resistência térmica da mistura e reduz a ocorrência de defeitos superficiais no interior dos ROs, nomeadamente a presença de "veining" e sinterização, diminuindo assim a necessidade de etapas de acabamento e aumentando a eficiência do processo.

5.3.2. Previsão para o Futuro

A utilização de areia regenerada, para além de apresentar um custo inferior ao da aquisição de areia nova, também tem benefícios associados à poupança a nível económico e à diminuição do impacte ambiental relativos à deposição da areia nova, depois de utilizada, em aterro. Assim, para um trabalho futuro, seria de elevado interesse, de um ponto vista económico e ambiental, realizar ensaios de produção de misturas de areias de macho com maior incorporação de areia regenerada de modo a abranger um maior número e gama de peças, quer seja com adição de areia de bauxite e/ou outros aditivos, de modo a reduzir o custo associado à aquisição da areia bauxite, quer seja com o aumento do teor de areia regenerada em peso próxima dos 100%, garantindo evidentemente a integridade e as propriedades mecânicas, físicas e químicas dos machos e a não ocorrência de defeitos nas peças vazadas.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi analisada a viabilidade da utilização de areia regenerada para a produção de machos para o processo de fundição, sendo possível constatar as seguintes conclusões:

- Relativamente aos ensaios de perda ao fogo, foi possível observar que, tal como esperado, a areia nova e areia de bauxite apresentam valores residuais, possivelmente devido à presença de impurezas (inferiores a 0.1%). Também, para a areia regenerada, os valores obtidos para este ensaio são insignificantes, o que demonstra a eficácia do processo de regeneração, uma vez que durante este ocorre a destruição do ligante.

- Para todas as misturas realizadas, conclui-se que o aumento do tempo de armazenamento dos provetes, promove um aumento dos valores de resistência à flexão, pelo que, sempre que seja necessário os machos apresentarem maiores valores de resistência, estes devem ser armazenados durante 24 horas. Por outro lado, o aumento do tempo de vida em bancada da mistura promove uma diminuição dos valores de resistência à flexão do macho.

- A utilização de areia regenerada para o fabrico de machos RO_2 apresentou dificuldades sobretudo durante a sua produção e a posterior etapa de pintura, uma vez que esta areia apresenta uma menor fluidez, pelo que é essencial garantir todas as condições de processo adequadas, como por exemplo, no aumento da pressão do ar de injeção de areia de modo a garantir que esta consegue preencher todos os detalhes do caixa de macho como também em aumentar a frequência de limpeza da caixa de machos.

- Os valores da resistência à flexão dos provetes produzidos com a mistura de areia regenerada e areia bauxite (em proporções de 50% em peso) embora sejam inferiores aos valores de resistência à flexão relativos à mistura utilizada inicialmente pela Funfrap, devido ao menor coeficiente angularidade do grão da areia regenerada, é, contudo, viável a utilização desta nova mistura em machos que não apresentem geometrias complexas ou que não possuam paredes com baixa espessura.

- No entanto, a substituição da mistura inicial pela nova mistura de areia regenerada com areia bauxite permite a obtenção de peça final com uma quantidade de defeitos, nos retornos de óleo, significativamente menor (uma redução de 68% no RO Superior e 32% no RO Inferior), quer seja inclusões de partículas metálicas quer seja a sinterização da própria areia do macho, e por isso uma redução de recursos (energia, espaço de trabalho, mão de obra) pelo facto de não ser necessário recorrer à remoção tão frequente destes defeitos pelo setor dos acabamentos, contribuindo para uma maior eficiência neste processo.

- Com a incorporação de areia regenerada, embora permita uma diminuição do impacte ambiental e dos custos associados à redução significativa da deposição de areia em aterro, a utilização desta nova mistura constituída por 50% (em peso) por areia de bauxite, não é viável economicamente uma vez que ocorreu um aumento de custo de 52% comparativamente com a mistura inicial. No entanto, existe potencial futuro de testar o comportamento dos machos constituídos por novas misturas de areia regenerada com outros tipos de areias, de modo a incorporar cada vez mais neste processo a areia regenerada.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Tupy. 2022. “Sobre a Tupy.”

https://www.tupy.com.br/sobre-a-tupy

[2] Carlos Silva Ribeiro. 2019. “Processo de Fundição em Areia Verde”. Apontamentos da Unidade Curricular Fundição, lecionada na FEUP, MIEMM.

[3] Conceição, Marisa Sofia Monteiro Dias da. 2019. “Utilização de Areia de Moldação Regenerada Na Produção de Machos Para Fundição.” Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica, Universidade de Aveiro

https://ria.ua.pt/handle/10773/28059.

[4] AISA – Auxiliar Industrial, S.A, “Manual de Instrucciones – Caja Fría” Acedido em novembro de 2021.

[5] Heydari, Farhad, 1990. “Mechanisms of sand flow and compaction in core-blowing”. Dissertação Mestrado, University of Warwick.

http://wrap.warwick.ac.uk/130613/

[6] Vilhena, Pedro. 2009. “Resinas de Caixa-Fria Modificadas Estruturalmente Com Propriedades Técnicas e Meio Ambientais Melhoradas-Sistema Biodiesel”. Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.

https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/57778/1/000136150.pdf

[7] Scheunemann, Ricardo. 2005. “Regeneração de areia de fundição através de tratamento químico via processo fenton”. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Florianópolis.

https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/102093.

[8] BREF, “Documento de Referência das Melhores Técnicas de Fundição Disponíveis” maio 2005.

[9] P.R. Carey, J. Archibald: Ask Chemicals, “Sand Binder Systems- The Phenolic Urethane Amine Cold Box System”

https://www.askchemicals.com/fileadmin/user_upload/Download_page/professional_articles/EN/FMT_Article_part10.pdf

[10] Silva, Bruno. 2018. “Custeio para um processo de fabrico de machos”. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.

https://sigarra.up.pt/feup/pt/pub_geral.pub_view?pi_pub_base_id=277146

[11] Brown, John R. 2000. Foseco Ferrous Foundryman´s Handbook. Butterworth Heinemann.

https://docplayer.net/53923309-Foseco-ferrous-foundryman-s-handbook.html

[[12] Adegas, Roseane Gonçalves. 2007. “Perfil Ambiental dos Processos de Fundição Ferrosa que utilizam areias no estado do Rio Grande do Sul”. Programa de Pós-Graduação, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

http://hdl.handle.net/10183/11199

[13] Augusto D’elboux, Engo Francisco, Gilberto Martins, Santa Bárbara D’oeste. 2000. “Minimização de Descarte de Areias de Fundição”. Programa de Pós-Graduação, Faculdade de Engenharia Mecânica e de Produção, Universidade Metodista de Piraciaba.

https://iepapp.unimep.br/biblioteca_digital/pdfs/docs/25052012_162421_francisco_delboux.pdf

[14] Claudio L. Mariotto. 2000. “Regeneração de areias: uma tentativa de discussão sistemática”, Fundição & Matérias-primas, Associação Brasileira de Fundição, São Paulo.

http://foundrygate.com/upload/artigos/Regenera%C3%A7%C3%A3o%20de%20areias%20-%20Uma%20tentativa%20de%20discuss%C3%A3o%20sistem%C3%A1tica.pdf

ANEXOS

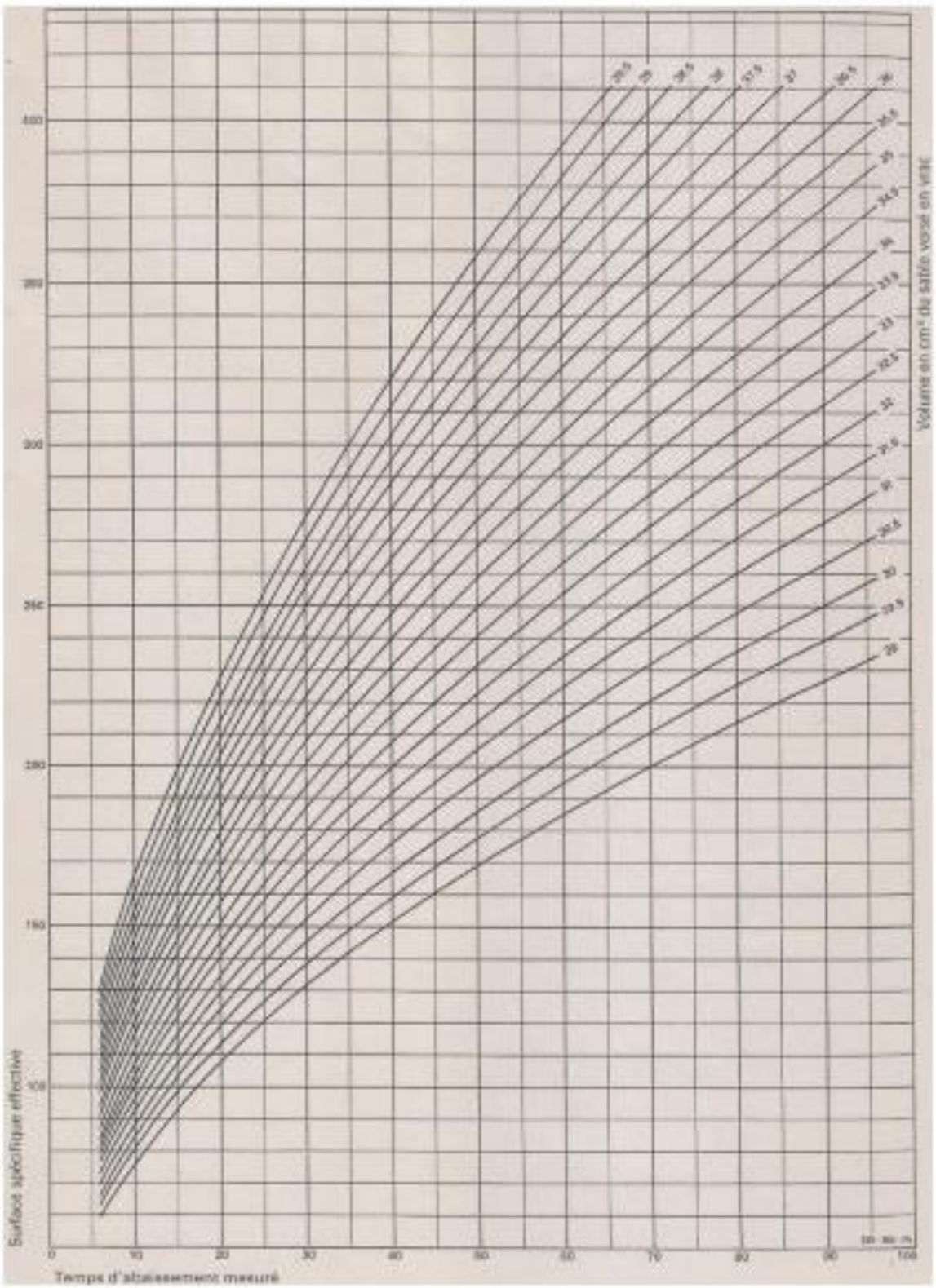


Figura A1- Gráfico que relaciona o tempo de descida com o volume da areia utilizada com o intuito de determinar a superfície específica real (gráfico obtido internamente)

Tabela A1- Cálculo da superfície específica real para as areias pré-regenerada e regenerada através do coeficiente de angularidade abordado no capítulo 4.1.7

Tipo de Areia	Tempo (s)	Volume (cm^3)	Superfície Específica Real (cm^3/g)
Areia Pré-Regenerada	7,29	35	120
Areia Regenerada	13,46	32	115

Tabela A2- Análise Granulométrica obtida para as areias regenerada e pré-regenerada

Malha	Areia Pré-Regenerada	Areia Regenerada
6 (3350 µm)	0	0
12 (1700 µm)	0	0
20 (850 µm)	0,06	0
30 (600 µm)	0,125	0,21
40 (425 µm)	2,04	1,32
50 (300 µm)	32,39	18,69
70 (212 µm)	47,28	47,45
100 (150 µm)	13,17	19,11
140 (106 µm)	2,89	7,37
200 (75 µm)	0,56	2,24
270 (53 µm)	0,16	0,44
Fundo	0,14	0,17
Total	98,82	97,00
Finos (<53 µm)	1,18	3,00

Tabela A3- Cálculo da superfície específica teórica para as areias regenerada e pré-regenerada

Malha	Coeficiente Multiplicativo	Areia Pré-Regenerada (100 g)	Areia Regenerada (100 g)
6 (3350 µm)	3	0	0
12 (1700 µm)	5	0	0
20 (850 µm)	10	1,07	0
30 (600 µm)	20	3,95	6,64
40 (425 µm)	30	91,30	59,08
50 (300 µm)	40	2041,87	1178,22
70 (212 µm)	50	4215,01	4230,17
100 (150 µm)	70	1658,23	2406,14
140 (106 µm)	100	512,83	1307,81
200 (75 µm)	140	141,41	565,62
270 (53 µm)	200	56,95	156,60
Fundo	300	86,69	105,26
Total	-	8809,31	10015,53
Superfície Específica Teórica (cm^3/g)		88,09	100,16

Tabela A4- Valores obtidos para a resistência à flexão (N/cm²) das misturas produzidas

Tempo após produção da mistura (horas)	Misturas						
	A0	**A1**	**A2**	**A3**	**B0**	**B1**	**B2**
0	26	38	41	44	23	28	40
0,5	29	30	41	45	26	45	35
1	31	30	41	50	29	34	31
2	30	37	40	48	22	29	23

Tabela A5- Valores obtidos para a resistência à flexão (N/cm²) das misturas produzidas após 24 horas

Tempo após produção da mistura (horas)	Misturas						
	A0	**A1**	**A2**	**A3**	**B0**	**B1**	**B2**
0	35	44	61	63	34	65	59
0,5	32	45	61	56	30	64	47
1	31	40	53	53	30	40	40
2	30	35	57	52	25	39	27

Tabela A6- Medição da massa dos RO produzidos pela mistura inicial e pela nova mistura utilizadas

Tipo de Mistura Utilizada	RO Inferior (g)	RO Superior (g)
008 Mistura Inicial (70% Areia Nova + 30% Bauxite)	1068,3	1065,0
	1070,9	1064,4
	1065,8	1064,1
	1059,3	1067,8
	1058,9	1066,0
	1057,1	1069,5
	1058,4	1067,3
	1063,9	1071,4
	1064,5	1071,3
	1058,2	1067,0
008 Nova Mistura (50% Areia Regenerada+ 50% Bauxite)	1101,4	1111,8
	1106,1	1114,6
	1116,5	1115,8
	1113,2	1103,4
	1109,4	1107,1
	1110,0	1113,8
	1096,2	1108,8
	1095,2	1107,6
	1109,6	1104,1
	1116,2	1111,8