



Universidade de Aveiro  
Ano 2016

Departamento de Engenharia de Materiais e  
Cerâmica

**Helena Robalinho  
Freitas**

**Novas formulações de areias de macho para  
processo *Hot Box***





**Helena Robalinho  
Freitas**

**Novas formulações de areias de macho para  
processo *Hot Box***

Relatório de estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, realizada sob a orientação científica do Doutor Filipe José Alves de Oliveira, Investigador Principal, coorientação do Professor Doutor Rui Ramos Ferreira e Silva, Professor Associado, ambos do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro e com supervisão empresarial por parte do Engenheiro João Fonte, Chefe do Departamento de Fundição da Grohe Portugal.



## **O júri**

Presidente

**Professor Doutor Augusto Luís Barros Lopes**

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

**Doutor Rogério Paulo Alves Lopes**

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

**Doutor Filipe José Alves de Oliveira**

Investigador Principal do CICECO no Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro



## **Agradecimentos**

Ao Doutor Filipe Oliveira e ao Professor Doutor Rui Silva pela orientação e partilha de conhecimentos ao longo do trabalho.

Ao Engenheiro João Fonte pela oportunidade de integração numa das maiores empresas mundiais do sector metalúrgico de componentes sanitários, pela atenção e conselhos dados, e por tornar possível todo o trabalho desenvolvido.

À Fundipor, Produtos para Fundição, pela colaboração e disponibilização das instalações, em especial ao Sr. David Monteiro e aos Engenheiros Francelino Fernandes e Carlos Neto.

A toda a equipa Grohe Portugal, em especial ao departamento de Fundição, pelo bom acolhimento e atenção dispensada ao longo do estágio.

Aos meus amigos pelos bons momentos passados ao longo destes anos académicos.

À minha família que me acompanhou no meu percurso académico, pelo apoio e contribuição no meu desenvolvimento pessoal.

Ao João, um especial obrigado pelo incansável ânimo e carinho.

A todos estes, e àqueles que não mencionei, o meu sincero obrigado!



**palavras-chave**

Processo *Hot Box*, areias de macho, ensaios de flexão, dureza, permeabilidade.

**resumo**

O presente trabalho foi executado no âmbito do estágio curricular realizado na empresa de produção de componentes sanitários Grohe Portugal, sediada na zona industrial de Albergaria-a-Velha. Trata-se de uma indústria de fundição de latão, cujos produtos abrangem sobretudo torneiras e chuveiros. O trabalho teve como principal objetivo criar novas formulações de areias de macho para o processo *Hot Box*, por forma a melhorar a qualidade dos machos produzidos.

Foi iniciada uma análise do sistema utilizado pela Grohe, incluindo o controlo das principais variáveis inerentes ao processo. Verificou-se que as matérias-primas utilizadas (areia, resina, endurecedor e conservante) eram as adequadas e, quantitativamente, o doseamento de cada uma delas era o correto. A distribuição granulométrica da areia utilizada (areia SP 45) cumpria as especificações técnicas dadas pelo fornecedor. Foi feita uma análise à temperatura das caixas de macho, tendo sido constatado que os valores eram os adequados ao processo. Foram realizadas análises térmicas à areia de macho: análise térmica diferencial (ATD) e análise termogravimétrica (ATG). Através da relação entre perdas de massa e reações endo/exotérmicas compreendeu-se melhor o processo químico de polimerização da resina furânica do tipo ureia-formaldeído usada no fabrico dos machos. Foram ainda realizados ensaios mecânicos de flexão e compressão a um conjunto de provetes representativos destes machos. Os provetes foram preparados numa máquina de machos manual e, numa segunda tentativa, utilizando partes de machos da produção. Em ambos os casos, os valores de resistência mecânica medidos após diferentes tempos de repouso após cura, ao longo de 6h, não foram constantes, revelando alguma falta de reprodutibilidade na preparação dos provetes.

Numa segunda fase do trabalho, foram definidas diferentes formulações de machos, variando o tipo de areia utilizada e a proporção REC/A (quantidade de resina+endurecedor+conservante/quantidade de areia). Para isso foram utilizadas quatro areias diferentes (SP 45, SP 55, SP 49 e H-S 00108) e comparadas entre si em termos de distribuição granulométrica, tamanho médio de grão, morfologia do grão e área superficial específica. Para as diferentes quantidades de matérias-primas utilizadas, foram usadas as proporções de REC/A (em peso) = 1%, 1,4%, 1,6%, 1,9%, 2,4% e 2,8%. Em seguida, 0h e 24h após a preparação dos provetes, foram executados na empresa Fundipor (fornecedora da Grohe) ensaios de resistência à flexão, de dureza e de permeabilidade às diferentes composições de machos. Este conjunto de ensaios permitiu concluir que o melhor sistema para o processo *Hot Box*, é a nova formulação com areia SP 55 e proporção REC/A = 1,5%. Uma análise de consumos com esta formulação revelou uma poupança de 23% em resina, 22% em endurecedor e 25% em conservante.



**keywords**

Hot Box process, core sands, bending tests, hardness, permeability.

**abstract**

This work was performed under the internship carried out in the sanitary components production company Grohe Portugal, located in the industrial park of Albergaria-a-Velha. Grohe is a brass foundry company, whose products include mainly faucets and showerheads. The work aimed to create new formulations of core sands for Hot Box process, in order to improve their quality and reduce fabrication costs.

Firstly, an analysis of the system used by Grohe was carried out, including the control of the key variables inherent to the process. It was concluded that the raw materials used (sand, resin, hardener and additive) and the relative amounts were adequate. The size distribution of the sand used (SP 45) followed the technical specifications provided by the supplier. The temperature of the core boxes was measured and found correct. Thermal analyses were performed on the core sand: differential thermal analysis (DTA) and thermogravimetric analysis (TGA). The relationship between mass loss and endo/exothermic reactions, allowed a better understanding of the chemical polymerization process of the furan resin urea-formaldehyde used in the cores. Bending and compression mechanical tests were also carried out to produce a set of representative samples of Grohe sand cores. Samples were firstly prepared manually in a core machine and, in a second attempt, using parts of production cores. In both cases, mechanical strength values measured at fixed intervals over a period of 6h after curing were not constant, showing that there was no reproducibility regarding the specimen's preparation.

In a second part of the work, different formulations of cores were defined by varying the type of sand used and the ratio REC/A (amount of resin + hardener + additive / amount of sand). For this, four different types of sand were used (SP 45, SP 55, SP 49 and H-S 00108) and compared in terms of particle size distribution, average grain size, grain morphology and specific surface area. For different quantities of raw materials used, the proportions in weight percent were REC/A = 1%, 1,4%, 1,6%, 1,9%, 2,4% and 2,8%. After 0h and 24h of sample preparation, bending tests, hardness tests and permeability tests were performed at Fundipor (a Grohe supplier). It was concluded that the best system for the Hot Box process should be a new formulation with sand SP 55 and a ratio of REC/ A= 1,5%. Moreover, the analysis of consumptions revealed that this formulation allows the following savings at Grohe: 23% of resin, 22% of hardener and 25% of additive.



## ÍNDICE

ÍNDICE .....	ii
LISTA DE FIGURAS .....	iii
LISTA DE TABELAS .....	vii
CAPÍTULO I .....	1
INTRODUÇÃO .....	1
CAPÍTULO II .....	5
PROCESSO DE FABRICO DE MACHOS .....	5
2.1. Fabrico de machos por processo <i>Hot Box</i> .....	5
2.2. Areias de base.....	6
2.3. Aditivos químicos .....	7
2.4. A secção de macharia na Grohe .....	9
CAPÍTULO III .....	11
PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	11
3.1. Caracterização do sistema atual.....	11
3.1.1. Análise da mistura utilizada pela Grohe .....	11
3.1.2. Controlo do doseamento de matérias-primas .....	12
3.1.3. Controlo da distribuição granulométrica da areia .....	12
3.1.4. Controlo das temperaturas das caixas de macho.....	13
3.1.5. Análises térmicas da areia de macho.....	14
3.1.6. Ensaio mecânicos de compressão e flexão .....	14
3.2. Novas formulações de areias de macho .....	17
3.2.1. Distribuição granulométrica e tamanho médio de grão.....	17
3.2.2. Morfologia do grão e área superficial específica.....	18
3.2.3. Definição de novas formulações.....	20
3.2.4. Preparação de provetes para ensaios de flexão, dureza e permeabilidade	20
3.3. Ensaio industrial com a formulação seleccionada .....	24
CAPÍTULO IV .....	25
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25

4.1. Caracterização do sistema atual.....	25
4.1.1. Análise da mistura utilizada pela Grohe .....	25
4.1.2. Controlo do doseamento de matérias-primas .....	25
4.1.3. Controlo da distribuição granulométrica da areia .....	28
4.1.4. Controlo das temperaturas das caixas de macho.....	29
4.1.5. Análises térmicas da areia de macho.....	30
4.1.6. Ensaios mecânicos de compressão e de flexão .....	31
4.2. Novas formulações de areias de macho .....	34
4.2.1. Distribuição granulométrica e tamanho médio de grão.....	34
4.2.2. Morfologia do grão e área superficial específica.....	35
4.2.3. Resultados dos ensaios de flexão, dureza e permeabilidade.....	36
4.3. Ensaio industrial com a formulação selecionada .....	39
CAPÍTULO V.....	41
OUTROS TRABALHOS REALIZADOS NO ESTÁGIO CURRICULAR.....	41
5.1. Atualização de Instruções de Trabalho .....	41
5.2. Atualização de documentos necessários à produção na Macharia.....	41
5.3. Gestão de ferramentas .....	45
5.4. Distribuição dos colaboradores da Fundação .....	50
CAPÍTULO VI.....	53
CONCLUSÕES.....	53
BIBLIOGRAFIA .....	55

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Fotografia aérea da Grohe Portugal, sediada na zona industrial de Albergaria-a-Velha.
- Figura 2: Alguns dos produtos produzidos e comercializados pela Grohe.
- Figura 3: Esquemática do processo *Hot Box*.
- Figura 4: Efeito do tamanho de grão da areia de macho na fundição: maior tamanho de grão resulta em pior acabamento superficial (a) mas garante uma maior permeabilidade (c); formas irregulares aumentam a resistência mecânica (b).
- Figura 5: Etapa de adição (ou metilolação) na produção de uma resina UF.
- Figura 6: Etapa de condensação na produção de uma resina UF.
- Figura 7: Secção de macharia na Grohe.
- Figura 8: Acondicionamento dos produtos químicos, cumprindo as questões de segurança e saúde/ambiente associadas às instruções de trabalho da Grohe Portugal. Bidão azul: conservante. Bidão vermelho: resina. Bidão verde: endurecedor.
- Figura 9: Máquina de machos 3 da Grohe Portugal (a) e o seu interior, mostrando a caixa de machos aberta (b).
- Figura 10: Exemplo de machos produzidos na Grohe Portugal (a), respetiva coquilha para duas peças (b) e a sua colocação na coquilha (c).
- Figura 11: Formulação da areia de macho utilizada na Grohe.
- Figura 12: Agitador de crivos *Retsch AS 200 Basic Sieve Shaker* utilizado na Grohe, para controlo granulométrico de areia.
- Figura 13: Termómetro *Fluke 54 II* com termopar do tipo K (a) e sonda de superfície *Fluke 80PK-27 SureGrip* (b e c).
- Figura 14: Máquina manual *Röperwerk Dulken* (a), provetes de secção quadrada (b) e ensaio de compressão (c).
- Figura 15: Utilização do macho 404 310 051 (a) para ensaio de compressão (b) e do macho 405 822 051 (c) para ensaio de flexão (d).

- Figura 16: Morfologia característica de grão angular (a), arredondado (b) e sub-angular (c).
- Figura 17: Matérias-primas (areia, conservante, endurecedor e resina) utilizadas.
- Figura 18: Misturador manual (a) e (b), molde com guilhotina (c) e compactador utilizados, provetes resultantes (e) e mufla onde estes foram curados (f).
- Figura 19: Ensaio de flexão realizado na Fundipor (a) e (b) com equipamento *Georg Fischer*.
- Figura 20: Ensaio de dureza realizado na Fundipor mostrando uma maior (a) e uma menor (b) profundidade de penetração.
- Figura 21: Molde cilíndrico durante a compactação (a) e provetes cilíndricos obtidos (b).
- Figura 22: Permeâmetro de carga constante: abertura da válvula (a), puxada do tambor (b), fecho da válvula (c), abertura da válvula para passagem do ar através da amostra (d) e descida do tambor (e).
- Figura 23: *Big bag* a ser vazado com a ajuda de um empilhador (a) e areia a ser transferida para o silo interior (b).
- Figura 24: Controlo do doseamento de areia, nas 18 primeiras semanas de 2016.
- Figura 25: Controlo do doseamento de resina, nas 18 primeiras semanas de 2016.
- Figura 26: Controlo do doseamento de endurecedor, nas 18 primeiras semanas de 2016.
- Figura 27: Controlo do doseamento de conservante, nas 18 primeiras semanas de 2016.
- Figura 28: Doseamento de matérias-primas, em termos de REC/A (%).
- Figura 29: Distribuição granulométrica da areia à saída do silo, nas semanas 10 e 11.
- Figura 30: Temperaturas das caixas de macho dos produtos 406 013 051 e 64 593 151.
- Figura 31: Análise térmica ATD e ATG da areia de macho. Círculos a vermelho indicam os picos endotérmicos e exotérmicos.
- Figura 32: Resistência à compressão ao longo de 6h após produção do macho, feito na máquina *Röper*.
- Figura 33: Resistência à flexão ao longo de 6h após produção do macho, feito na máquina *Röper*.

- Figura 34: Resistência à compressão ao longo de 6h após produção do macho 404 310 051.
- Figura 35: Resistência à flexão ao longo de 6h após produção do macho 405 822 051.
- Figura 36: Distribuição granulométrica das areias SP 55, H-S 00108, SP 45 e SP 49.
- Figura 37: Imagens das diferentes areias obtidas em lupa binocular.
- Figura 38: Imagens das diferentes areias obtidas em lupa binocular.
- Figura 39: Resultados dos ensaios de resistência à flexão realizados na Fundipor.
- Figura 40: Resultados dos ensaios de dureza realizados na Fundipor.
- Figura 41: Resultados dos ensaios de permeabilidade realizados na Fundipor.
- Figura 42: Problemas encontrados na preparação de provetes para ensaios de flexão e dureza (a) e permeabilidade (b), na utilização de areia SP 49.
- Figura 43: Macho produzido com areia H-S 00108 (a) e areia SP 45 (b) sob as mesmas condições.
- Figura 44: Exemplo da numeração de uma IT relativa ao departamento de Fundição.
- Figura 45: Folha de parâmetros do produto 405 013 051.
- Figura 46: Folha de rebarbagem e acondicionamento dos machos do produto 405 013 051.
- Figura 47: Código de cores que diferenciam as categorias de produtos na Fundição.
- Figura 48: Exemplo de um separador de folhas, do produto 405 013 051.
- Figura 49: Expositor atual dos produtos da Macharia.
- Figura 50: Canal parcialmente entupido, detetado no produto 405 822 029.
- Figura 51: Excesso de areia de macho na zona da cavidade circular do macho 405 822 052.
- Figura 52: Recuperação e correção dos machos 405 822 052.
- Figura 53: Exemplo de uma etiqueta identificativa da caixa de machos do produto 406 013 051.
- Figura 54: Etiqueta identificativa do mandril do produto 406 013 051.
- Figura 55: Identificação da estante C de caixas de machos na Macharia.
- Figura 56: Identificação das prateleiras com mandris na Macharia.

Figura 57: Exemplo de cartão identificativo da caixa de machos do produto 04 676 351.

Figura 58: Novo quadro criado para a gestão das caixas de macho.

Figura 59: Quadro de distribuição dos colaboradores, localizado à entrada do departamento.

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1: Composição da liga Grohe.
- Tabela 2: Ajuste dos valores máximo e mínimo de percentagens retidas, para a utilização de 4 crivos para a areia SP 45.
- Tabela 3: Exemplo de cálculo do tamanho médio de grão (AGS).
- Tabela 4: Correspondência entre formas típicas por observação visual e valores de coeficientes de forma.
- Tabela 5: Tamanho médio de grão (AGS) das areias testadas.
- Tabela 6: Coeficientes de forma de cada areia (valores das fichas técnicas).
- Tabela 7: Cálculo da espessura de camada de resina envolvente aos grãos de areia.
- Tabela 8: Médias referentes a 2015 do consumo de matérias-primas.



## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

O estágio curricular foi realizado na Grohe Portugal, situada na zona industrial de Albergaria-a-Velha. A Grohe é uma empresa de origem alemã que se dedica exclusivamente à produção e montagem de componentes sanitários metálicos (de latão) de alta qualidade, sobretudo torneiras e chuveiros. Trata-se da maior empresa europeia do sector e uma das líderes mundiais de produção de componentes sanitários, representando 8% do mercado mundial. Esta empresa foi fundada por Friedrich Grohe, em 1936. Atualmente o grupo Grohe, para além de 3 unidades na Alemanha, possui uma unidade de produção em Portugal e na Tailândia. Para além da marca individual Grohe, a empresa conta agora com a marca Grohe *Spa* para coleções de design de luxo e a marca Grohe Professional, para serviços técnicos de ajuda. Recentemente, em 2014, a Grohe foi vendida ao grupo japonês Lixil [1].

Em Portugal, a Grohe iniciou a sua atividade em 1996 na fábrica situada em Albergaria-a-Velha, Figura 1, a qual possui cerca de 55 000 m<sup>2</sup> (dos quais 19 000 m<sup>2</sup> cobertos) e conta com cerca de 750 colaboradores. Produz perto de 6 milhões de torneiras/ano e é responsável por 25% da produção total da marca. A fábrica portuguesa foi eleita a melhor do grupo Grohe no ano de 2012. A Grohe Portugal é certificada ao nível do Ambiente pela ISO 14001 : 2009 e ao nível da Qualidade pela ISO 9001 : 2008. A filosofia da Grohe segue uma tecnologia sustentável, economizadora de água e energia, e de longa durabilidade dos seus produtos [1].



**Figura 1:** Fotografia aérea da Grohe Portugal, sediada na zona industrial de Albergaria-a-Velha [2].

O processo produtivo da Grohe Portugal contempla 5 departamentos: Fundição, Maquinagem, Lixamento e Polimento, Galvanização e Montagem.

O departamento da Fundição, onde o estágio curricular foi realizado, divide-se nas secções de Fusão Central, Vazamento, Macharia e Corte e Granalhagem. Na Fusão Central as matérias-primas são fundidas nos dois fornos de indução existentes, numa carga total de 2400 kg cada, podendo ser utilizados lingotes de metal puro ou sucata e limalha de outros departamentos. As ligas de latão produzidas atualmente pela Grohe Portugal são três: liga Grohe (chamada liga normal, utilizada em maior massa e com a composição indicada na Tabela 1), liga DZR (com adição de cerca de 0,03% de arsénio para melhorar a resistência à corrosão por dezincificação do latão) e liga Grohe 0 (com baixo teor de chumbo,  $Pb \leq 0,2\%$ , face às legislações restritivas do uso deste elemento, por ter efeitos tóxicos na saúde humana).

**Tabela 1:** Composição da liga Grohe.

Elemento	Cu	Pb	Al	Fe	AlMgB	Zn
% Ponderal	59,5	1,2	0,4	0,05	Refinador de grão	Restante

A uma temperatura de 1050 °C, o metal é transferido por uma colher até às máquinas de vazamento: 6 máquinas de vazamento por baixa pressão (chamadas BPs) e 2 máquinas de vazamento por gravidade. As coquilhas (moldes) de cobre-berílio são sujeitas a um banho de grafite para proteger as mesmas, regular as condições de arrefecimento, lubrificar o molde e ajudar na desmoldação. Antes do vazamento são colocados nas coquilhas os machos adequados, que formam as cavidades interiores da peça final. Os machos são produzidos na secção de Macharia, onde se localizam 6 máquinas de machos que funcionam pelo processo *Hot Box*. Depois das peças metálicas produzidas, estas passam por máquinas de serra-fita por forma a serem cortados os gitos e alimentadores, que constituem sucata a usar de novo como matéria-prima na fundição. Por fim, as peças seguem para a Granalhagem, onde são eliminadas rebarbas superficiais e as areias de macho que ficaram no seu interior.

No departamento de Maquinagem estão incluídas todas as operações de remoção de metal em excesso, assim como a execução de roscas, furações e ranhuras. Estas operações de corte são auxiliadas com o uso de uma emulsão de óleo que lubrifica as peças de corte, previne a corrosão e baixa a temperatura da peça. Consequentemente, as peças têm de ser sujeitas a uma lavagem e desengorduramento. Ainda aqui são realizados testes de estanquidade por um sistema pneumático, que verificam se as peças possuem fugas.

No departamento de Lixamento e Polimento confere-se uma superfície lisa e brilhante às peças produzidas, pela diminuição do tamanho dos riscos da superfície, tornando-os cada vez menos profundos.

Na Galvanização é feito um revestimento às peças polidas por niquelagem e cromagem. Este revestimento é realizado por eletrodeposição sequencial de níquel e cromo, com recurso a tanques com os diversos reagentes onde as peças são imersas. O níquel fornece a cor prateada às peças e o cromo dá-lhes o brilho e o aspeto final. Estas operações são realizadas tanto para fins estéticos, como de prevenção da corrosão.

Por fim, a Montagem inclui a junção de todos os componentes de um produto, o ensaio dos mesmos e o seu embalamento. As linhas de montagem incluem a inspeção visual das peças, o teste de estanquidade de água e o embalamento para expedição. É também nesta secção realizada a operação de estamperia digital, onde são gravados os logotipos e os símbolos para a correta utilização dos produtos, alguns dos quais se apresentam na Figura 2.



**Figura 2:** Alguns dos produtos produzidos e comercializados pela Grohe [1].

O estágio curricular iniciado em outubro de 2015 teve como principal objetivo o estudo de novas formulações de areias de macho, para o processo *Hot Box*. Este incluiu a completa caracterização do processo *Hot Box* para o fabrico de machos, tendo em conta a influência das principais variáveis. Procurou-se que este estudo conseguisse oferecer uma melhoria na qualidade dos machos produzidos, bem como no processo em si.

A Fundipor – Produtos para Fundição, Lda foi importante neste trabalho, tendo disponibilizado as suas instalações para que grande parte dos ensaios de caracterização das areias de macho fossem realizados. A Fundipor, fundada em 1979 e situada em Pedroso (Vila Nova de Gaia) é um fornecedor de referência para o mercado da Fundição nacional [3]. A Fundipor é representante da Hüttenes-Albertus GmbH – “Líder internacional na produção de produtos químicos para a indústria da Fundição” [4], em especial para todos os processos de fabrico de machos.

Para facilitar a compreensão do trabalho executado, este documento está estruturado da seguinte forma: no presente capítulo (Capítulo I - Introdução) é apresentada a empresa onde o estágio teve lugar, é descrito de forma sucinta o seu processo produtivo, e é indicado o objetivo principal do estágio e a estrutura deste documento. No Capítulo II – Processo de Fabrico de Machos, são apresentados os fundamentos teóricos necessários para a sustentação deste trabalho, com especial atenção para o processo de fabrico de machos *Hot Box*. No Capítulo III – Procedimento Experimental, são descritas todas as técnicas e equipamentos utilizados na vertente prática do trabalho e no Capítulo IV – Resultados e Discussão, são discutidos individualmente cada um dos resultados obtidos. No Capítulo V – Outros Trabalhos Realizados no Estágio Curricular, é exposto o trabalho extracurricular realizado na fábrica. No Capítulo VI – Conclusões, é feita uma apreciação global do estágio curricular.

## CAPÍTULO II

### PROCESSO DE FABRICO DE MACHOS

Um macho é um componente feito com areia e resina, colocado dentro da coquilha e em torno do qual o metal fundido é vazado, que define as cavidades ou espaços vazios da peça a produzir. Para que os grãos de areia de um macho sejam ligados na forma desejada, estes são sujeitos a um processo de aglomeração através da adição e mistura com resina, seguido de cura a quente. É conveniente que o processo confira ao macho resistência mecânica suficiente para resistir ao manuseamento e ao vazamento, mas sem ser demasiado elevada para facilitar a sua remoção após a fundição da peça.

A seleção do processo de aglomeração apropriado a cada fundição é baseada em vários fatores entre os quais se salientam: produtividade, equipamento existente, formação dos operadores, custos operacionais, tipo de matérias-primas disponíveis no mercado, impacto ambiental. Além destes deve ser ainda considerada a possibilidade de recuperação da areia, por processos mecânicos e/ou térmicos, que permita a sua reutilização em novos ciclos. Desta forma, cabe a cada fundição avaliar o melhor processo de fabrico de machos a ser utilizado, cujo objetivo é sempre o de produzir fundidos de qualidade com os recursos disponíveis e ao mínimo custo [5].

Os vários processos de fabrico de machos existentes enquadram-se em três grandes categorias, associadas ao tipo de polimerização que ocorre durante a cura:

- Processo de polimerização a frio - também chamado de auto secativo, onde a resina utilizada é catalisada à temperatura ambiente.

- Processo de polimerização com gás - também chamado de processo *Cold Box*, caracterizado pelas reações serem catalisadas por um composto pulverizado da família das aminas, e um gás de arraste (geralmente SO<sub>2</sub> ou CO<sub>2</sub>).

- Processo de polimerização a quente – utiliza resinas termoendurecíveis como agente ligante e catalisadores que não atuam à temperatura ambiente, sendo a cura promovida por aquecimento [6].

#### 2.1. Fabrico de machos por processo *Hot Box*

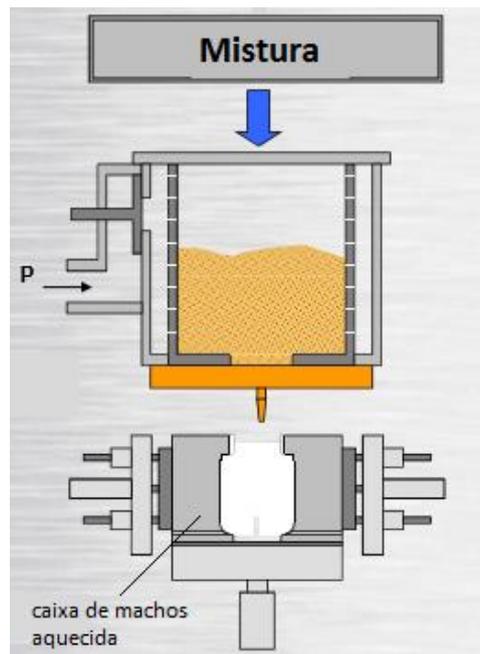
O processo *Hot Box*, também chamado de caixa quente, é um tipo de polimerização a quente para o fabrico de machos, e está apresentado esquematicamente na Figura 3. A areia é revestida com cerca de 2% em peso de resina, aproximadamente 30% de catalisador (endurecedor) do peso de resina e uma quantidade variável de aditivo conservante. É feita a mistura destes quatro componentes durante 5 a 8 minutos, que num passo seguinte será injetada com ar

comprimido para o interior da caixa de machos. A mistura da areia com a resina, sujeita à temperatura de cura (cerca de 230°C) adquire a forma do interior da caixa [7].

À medida que a cura ocorre, o macho endurece superficialmente até ter resistência suficiente para suportar a pressão dos pinos ejetores da caixa de machos. A reação exotérmica que traduz a cura da mistura envolve o seguinte mecanismo:

- resina líquida + catalisador + calor = resina sólida + água + calor

Nos vários processos *Hot Box*, são usadas resinas fenólicas, furânicas ou furânicas modificadas com fenol, contendo sempre ureia e formaldeído [6].



**Figura 3:** Esquematização do processo *Hot Box*. P - pressão de ar comprimido.

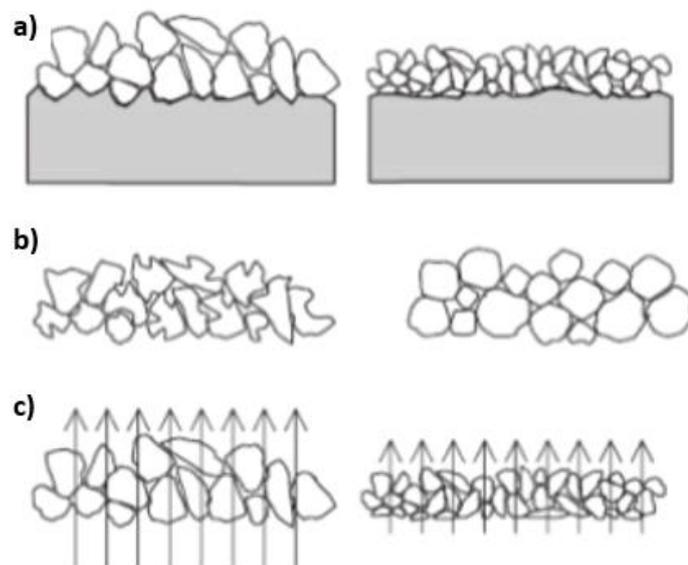
A mistura da areia de macho precisa ser feita necessariamente nesta ordem: primeiro é adicionado à areia o conservante e o endurecedor e, por último e quando estes já estiverem bem incorporados, é adicionada a resina. Se a resina fosse adicionada à areia em primeiro lugar, e em seguida o catalisador, este iria provocar alterações na zona de contacto inicial, devido à proporção relativa nessa zona ser muito elevada [8].

## 2.2. Areias de base

As areias de fundição são essencialmente compostas por sílica (dióxido de silício,  $\text{SiO}_2$ ), pois é uma areia de baixo custo e muito abundante na natureza. O tipo de areia utilizada no processo é de grande relevância, visto que 98% da constituição de um macho é areia.

O tamanho, distribuição e forma dos grãos vai determinar a permeabilidade do macho, que corresponde à capacidade que esse tem em se deixar atravessar por um gás através dos seus poros, afetando as características da peça final, Figura 4. Os gases

resultantes da decomposição térmica durante a cura têm de escapar pelos poros do macho, caso contrário, a pressão no macho aumenta e impede o fluxo de metal na coquilha, resultando em defeitos de fundição. Uma baixa permeabilidade leva a um bom acabamento superficial, mas pode causar defeitos de fundição. Uma alta permeabilidade reduz a pressão gasosa, mas pode resultar em penetração do metal e causa mau acabamento superficial da peça. O aumento da resistência mecânica associada à morfologia facetada e angular dos grãos de areia deve-se ao aumento do número de pontos de contato com o ligante. Além disso, um maior tamanho de grão requer menor quantidade de ligante para revestir os seus grãos, pois a sua área superficial é menor do que a de grãos mais pequenos [9].



**Figura 4:** Efeito do tamanho de grão da areia de macho na fundição: maior tamanho de grão resulta em pior acabamento superficial (a) mas garante uma maior permeabilidade (c); formas irregulares aumentam a resistência mecânica (b) [10].

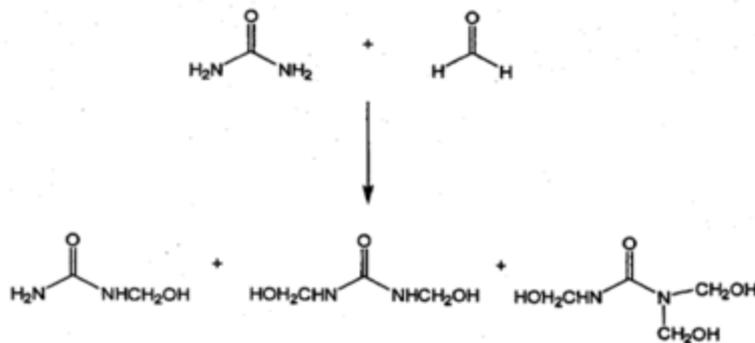
Procura-se que exista desta forma um equilíbrio entre todas estas variáveis. Por exemplo, a redução de 0,1% de ligante pode fazer poupar cerca de 3-4 €/tonelada de areia de macho e ainda reduzir a quantidade de gases gerados durante o vazamento, daí a importância destas relações entre comportamentos de diferentes areias [11].

### 2.3. Aditivos químicos

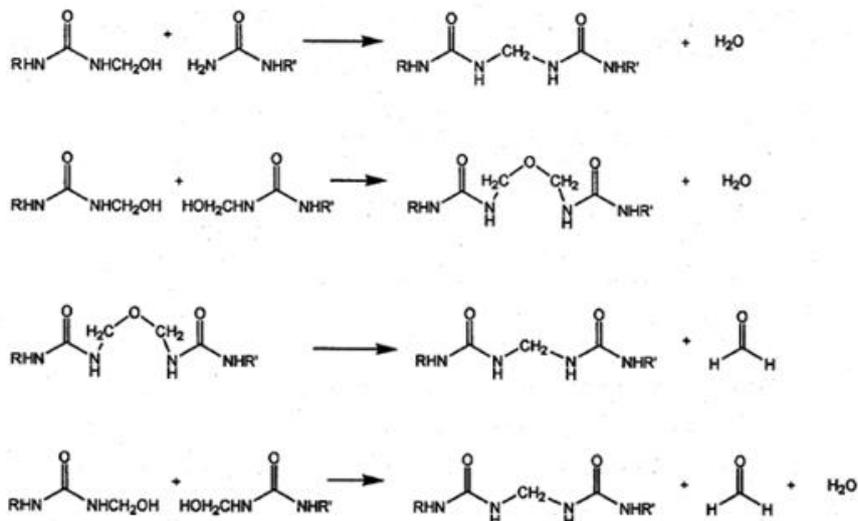
As resinas utilizadas no processo *Hot Box* podem ser de dois tipos: furânicas ou fenólicas. As resinas furânicas contêm álcool furfurílico e as fenólicas têm por base o fenol, mas todas elas incluem ureia e formaldeído (resinas termoendurecíveis UF).

A produção de uma resina UF é feita a partir das reações entre os monómeros ureia e formaldeído, que pode ser descrita em três etapas [12]:

- Adição ou metilolação, onde há adição de formaldeído à ureia para formar os produtos da reação mono-, di- e trimetilolureia (Figura 5).
- Condensação, onde há formação de: pontes de metileno entre os azotos dos grupos amino, por reação do grupo hidroximetil e com o grupo amino; pontes de metileno-éter por reação dos grupos hidroximetil de duas moléculas; pontes de metileno formadas a partir de pontes metileno-éter, por libertação de formaldeído; pontes de metileno por reação de grupos hidroximetil, libertando-se água e formaldeído (Figura 6).
- Adição de ureia final, que vai reagir com o formaldeído livre ainda existente, formando de novo várias metilolureias.



**Figura 5:** Etapa de adição (ou metilolação) na produção de uma resina UF [12].



**Figura 6:** Etapa de condensação na produção de uma resina UF [12].

Em relação ao endurecedor, os tipos de catalisador mais comuns para *Hot Box* são soluções aquosas de cloreto de amónio e soluções aquosas de nitrato de amónio e ureia. A ureia reage com parte do formaldeído da resina durante a cura. O sal decompõe-se sob o efeito da temperatura resultando em amónia, que novamente é combinado com parte do formaldeído e um ácido, que é responsável por iniciar a cura da resina.

## 2.4. A secção de macharia na Grohe

A secção de macharia (Figura 7) inclui 4 máquinas de machos automáticas *Vogel*, uma máquina manual e uma máquina *Mec\_Ind*. Esta última máquina, para além do processo *Hot Box*, também produz machos pelo processo *Shell*. A produção é contínua durante seis dias por semana, com três turnos diários.



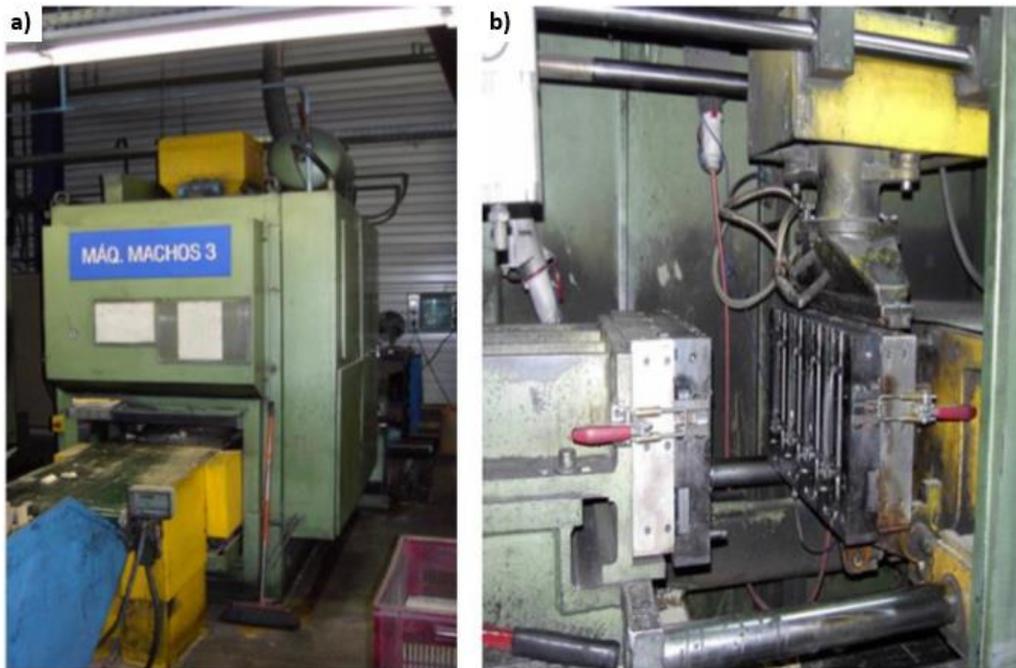
**Figura 7:** Secção de macharia na Grohe.

A areia nova é armazenada num silo interior que é abastecido por um silo exterior, sempre que necessário. A preparação da mistura da areia e componentes químicos é ativada com uma descarga de areia do silo para o interior da galga de um misturador. Na galga são também adicionados os produtos químicos (que estão devidamente armazenados em bidões, Figura 8), por meio de bombas de ejeção. A mistura decorre durante um tempo de 5 minutos.



**Figura 8:** Acondicionamento dos produtos químicos, cumprindo as questões de segurança e saúde/ambiente associadas às instruções de trabalho da Grohe Portugal. Bidão azul: conservante. Bidão vermelho: resina. Bidão verde: endurecedor.

Feita a mistura, esta é transportada para as máquinas de macho, Figura 9a, por via de um abastecedor que percorre um corredor superior e abastece as suas tremonhas. A mistura é então injetada sob uma pressão máxima de 5 bar para as caixas de machos (feitas de aço, Figura 3b) aquecidas eletricamente, e é iniciada a consolidação dos machos.



**Figura 9:** Máquina de machos 3 da Grohe Portugal (a) e o seu interior, mostrando a caixa de machos aberta (b).

Estando um macho pronto, este é descarregado para uma passadeira rolante à frente da qual se encontra um operário que faz uma inspeção visual para deteção de defeitos (os machos com defeitos são rejeitados no momento), a sua rebarbagem com uma lima para eliminação dos gitos e a sua devida acomodação numa caixa. As caixas são então armazenadas enquanto se conclui o processo de cura dos machos e posteriormente, são levadas para as zonas de vazamento, junto às máquinas de fundição de baixa pressão ou por gravidade.

Os machos são inseridos na respetiva coquilha, feita de uma liga de cobre-berílio, da qual se apresenta um exemplo na Figura 10. O correto fecho da coquilha, realizado automaticamente, é importante para que não haja movimentação do macho por forma a evitar defeitos ou alterações de dimensionamento na peça.



**Figura 10:** Exemplo de machos produzidos na Grohe Portugal (a), respetiva coquilha para duas peças (b) e a sua colocação na coquilha (c).

## CAPÍTULO III

### PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

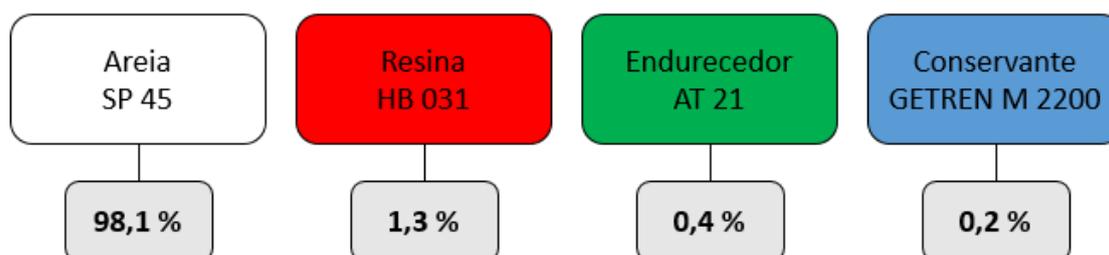
Visto que uma das variáveis com maior relevância para o processo é a areia de base usada, a parte experimental iniciou-se pela caracterização da areia de machos utilizada pela Grohe. Numa segunda fase, foram feitos ensaios para diferentes areias e definidas diferentes misturas. Por último, foi feito um ensaio industrial e cálculo de custos para aquele que se considerou ser o melhor sistema. Serve este capítulo para indicar quais os materiais, ensaios e equipamentos utilizados ao longo deste estudo, sendo todos os resultados experimentais e a sua discussão apresentados no Capítulo IV.

#### 3.1. Caracterização do sistema atual

##### 3.1.1. Análise da mistura utilizada pela Grohe

Cada carga de areia de macho utilizada na Macharia é constituída por  $31\,500 \pm 500$  g de areia SP 45 (Sibelco),  $430 \pm 5$  g de resina,  $130 \pm 5$  g de endurecedor e  $50 \pm 5$  g de conservante (Hüttenes-Albertus, Fundipor), o que em termos percentuais corresponde ao mostrado na Figura 11.

Para uma mais fácil nomeação de cada carga é considerada a razão parte líquida-parte sólida, ou seja, a razão entre a quantidade de resina, endurecedor e conservante (REC) e a quantidade de areia (A). Assim, a mistura utilizada pela Grohe passa a ser designada neste trabalho por **REC/A = 1,9 %**.



**Figura 11:** Formulação da areia de macho utilizada na Grohe.

Foram consultadas as fichas técnicas de cada matéria-prima: as quatro areias testadas ao longo deste trabalho (SP 45, SP 49 e SP 55 da Sibelco e H-S 00108 da Quarzwerke) e os componentes resina e endurecedor do sistema ligante.

### 3.1.2. Controlo do doseamento de matérias-primas

Tal como a Instrução de Trabalho AL-04-50-07/5 descreve, é feito semanalmente um controlo da dispensação de cada matéria-prima na mistura. Este passo é executado com o misturador em modo manual e a galga aberta para permitir a recolha de cada produto químico num gobelé e da areia numa caixa. Posteriormente é feita a pesagem de cada matéria-prima, a qual é registada numa folha de controlo. Sempre que estas pesagens saiam do limite inferior e/ou superior tem de ser tomada uma ação corretiva, até que esse valor esteja dentro do requerido.

Foi feito um acompanhamento do controlo do doseamento das matérias-primas (areia SP45 e componentes REC) ao longo das 18 primeiras semanas de 2016, a fim de se verificar se as quantidades reais adicionadas seriam as desejadas para o processo de fabrico dos machos.

### 3.1.3. Controlo da distribuição granulométrica da areia

Sempre que há receção de uma nova carga de areia, é feito um controlo granulométrico a partir de uma amostra de 100 g de cada um dos lotes: no laboratório da Fundação são utilizados crivos com tamanhos de malha de 125, 250, 355 e 500  $\mu\text{m}$ , que são colocados num agitador *Retsch* (Figura 12) por um período de 12 minutos a uma amplitude de 50 (escala do equipamento). Por diferença de massas entre crivos com areia e crivos vazios, é determinada a percentagem de areia retida em cada crivo. Os resultados são documentados tal como indica a instrução de trabalho AL-04-50-06/8 e no caso de existir alguma não conformidade, esta é analisada para se poder decidir se o produto é aprovado ou devolvido ao fornecedor.



**Figura 12:** Agitador de crivos *Retsch AS 200 Basic Sieve Shaker* utilizado na Grohe, para controlo granulométrico de areia [13].

Foi feito um acompanhamento do controlo granulométrico da areia utilizada atualmente pela Grohe (SP 45) ao longo de 2 semanas, a fim de se verificar se a areia utilizada estava de acordo com as especificações da ficha técnica do fornecedor. Para descartar a hipótese de haver influência do nível de enchimento do silo, as amostras de areia foram retiradas à saída do silo, em vez de serem retiradas diretamente do lote.

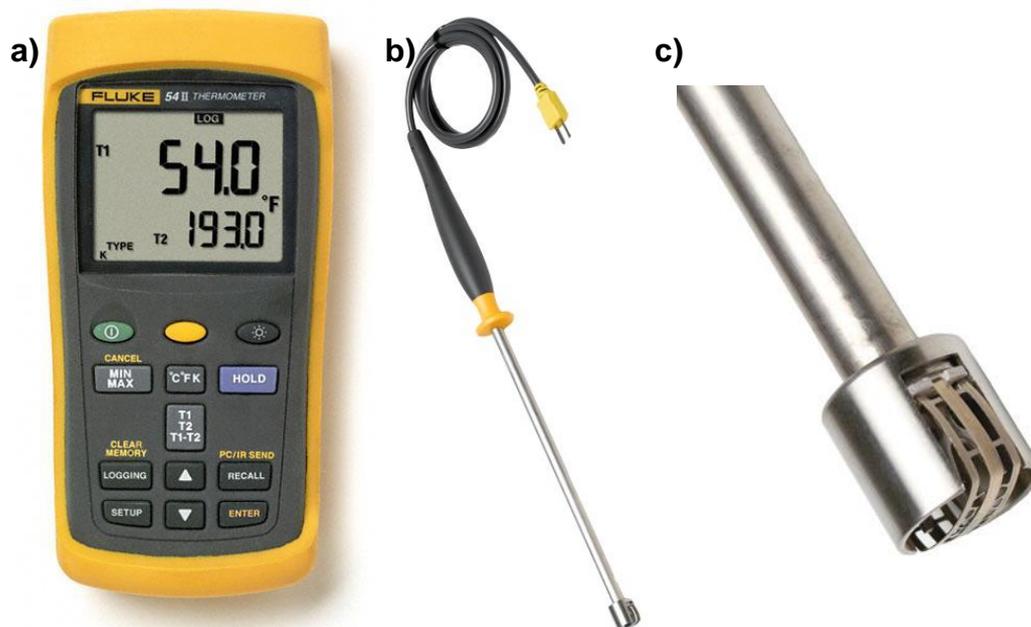
Como na Grohe só estão disponíveis 4 crivos, os valores máximo e mínimo tiveram de ser ajustados como mostra na Tabela 2.

**Tabela 2:** Ajuste dos valores máximo e mínimo de percentagens retidas, para a utilização de 4 crivos para a areia SP 45.

Especificação Sibelco			Especificação Sibelco só com 4 crivos		
tamanho de grão	% min	% máx	tamanho de grão	% min	% máx
< 63 $\mu\text{m}$	0	0	< 125 $\mu\text{m}$	0	1,1
63-90 $\mu\text{m}$	0	0,1			
90-125 $\mu\text{m}$	0	1			
125-180 $\mu\text{m}$	0	4	125-250 $\mu\text{m}$	5	22
180-250 $\mu\text{m}$	5	18			
250-355 $\mu\text{m}$	34	47	250-355 $\mu\text{m}$	34	47
355-500 $\mu\text{m}$	31	55	355-500 $\mu\text{m}$	31	55
500-710 $\mu\text{m}$	0	6	> 500 $\mu\text{m}$	0	7,1
710-1000 $\mu\text{m}$	0	1			
> 1000 $\mu\text{m}$	0	0,1			

#### 3.1.4. Controlo das temperaturas das caixas de macho

Para o controlo do parâmetro temperatura, foram feitas medições em duas caixas de macho diferentes que estavam a ser usadas na produção diária. Para isso foi utilizado um termómetro digital *Fluke*, Figura 13, acoplado a uma sonda de superfície que permite medir temperaturas numa gama de -127 a 600°C. Foi tido o cuidado de a medição ser feita sempre nas mesmas regiões da caixa e o mais próxima possível do local onde o macho é construído.



**Figura 13:** Termómetro *Fluke 54 II* com termopar do tipo K (a) e sonda de superfície *Fluke 80PK-27 SureGrip* (b e c) [14].

### 3.1.5. Análises térmicas da areia de macho

Para continuar a caracterização da formulação utilizada como areia de macho, foram feitas duas análises térmicas: análise térmica diferencial (ATD) e análise termogravimétrica (ATG). Estas duas técnicas complementam-se, permitindo comparar as alterações de massa com as reações endotérmicas e exotérmicas que ocorrem durante o aquecimento da amostra.

Como amostra foi utilizada uma pequena porção de macho (50g), que foi moída por forma a ficar fragmentada. A velocidade de aquecimento do ensaio foi de 10°C/min até à temperatura máxima de 1000°C, no equipamento *SETARAM Labsys* disponível no Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica.

### 3.1.6. Ensaio mecânicos de compressão e flexão

Para se poder prever o comportamento dos machos em condições de trabalho, estes foram sujeitos a ensaios mecânicos de compressão e de flexão. Para isso, foi feito um conjunto de provetes na máquina de machos manual *Röper* (Figura 14 a). A tremonha desta máquina é alimentada manualmente, bem como o abrir/fechar da caixa de machos, o avanço/recuo do mandril e o momento de injeção da areia, que é feito a partir do comando manual acoplado à máquina. A caixa foi sempre limpa com ar comprimido entre injeções, e usou-se equipamento de proteção: manguitos, óculos e luvas. A descrição da configuração desta máquina, que não existia, foi adicionada à

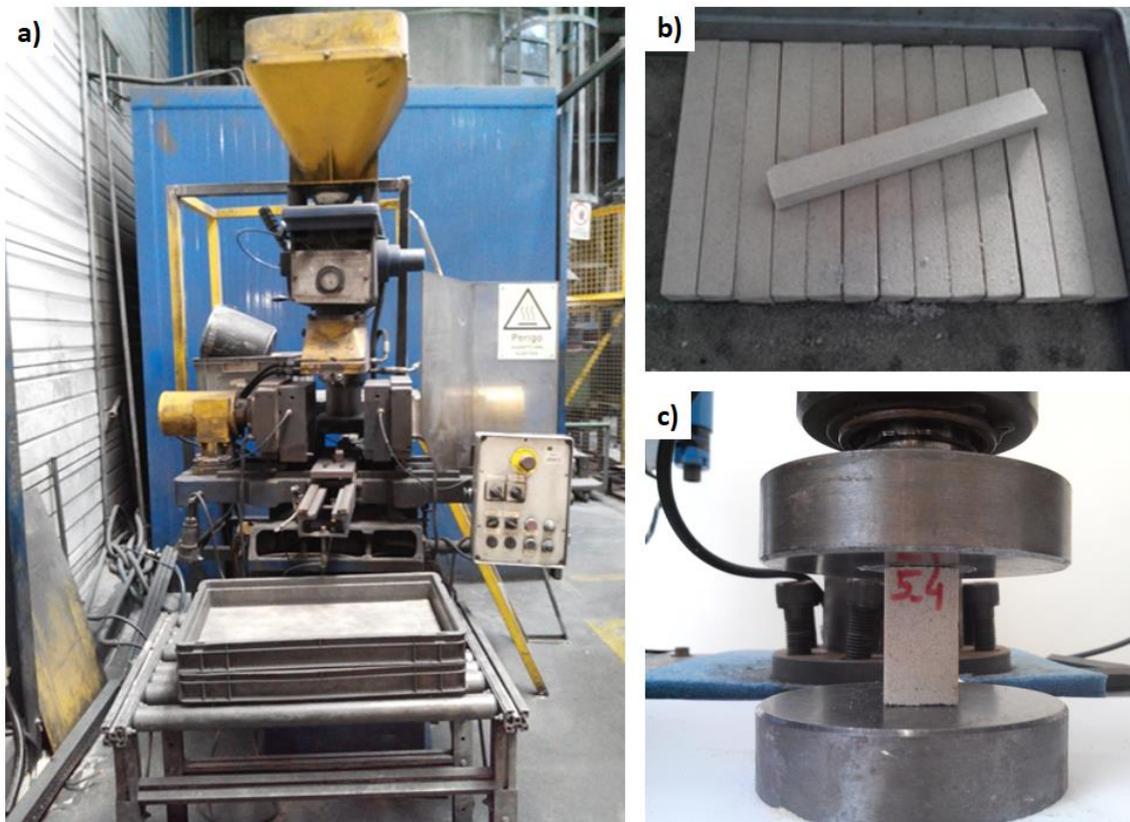
Instrução de Trabalho AL-04-50-02/12. Os parâmetros usados nesta máquina foram os seguintes:

- Temperatura da caixa: 250°C (mandril não é aquecido)
- Pressão de injeção: 5 bar

Daqui resultou um conjunto de provetes de secção quadrada 2x2 cm<sup>2</sup> e 20 cm de comprimento (Figura 14b). Para cortar os provetes e acertar as extremidades por forma a ficarem bem paralelas, foi usada uma lima de aço. Para os ensaios de compressão, os provetes utilizados foram cortados para 4 cm de comprimento e para os ensaios de flexão para 10 cm.

Os provetes foram devidamente identificados e sujeitos aos ensaios mecânicos na máquina universal *Shimadzu Autograph AG-25TA*, disponível no DEMaC. Os ensaios foram feitos após 1h, 2h, 3h, 4h, 5h e 6h após a preparação dos provetes, não sendo possível realizar estas medições às 0h devido à distância necessária a percorrer entre Albergaria-a-Velha, onde são obtidos os provetes e Aveiro, onde são realizados os ensaios mecânicos.

Para os ensaios de compressão (Figura 14c) foi utilizada uma velocidade de 5 mm/min e para os ensaios de flexão, foi usada uma velocidade de 1 mm/min. Em ambos os casos, foi determinado um valor médio de 5 provetes, para cada tempo.



**Figura 14:** Máquina manual *Röperwerk Dulken* (a), provetes de secção quadrada (b) e ensaio de compressão (c).

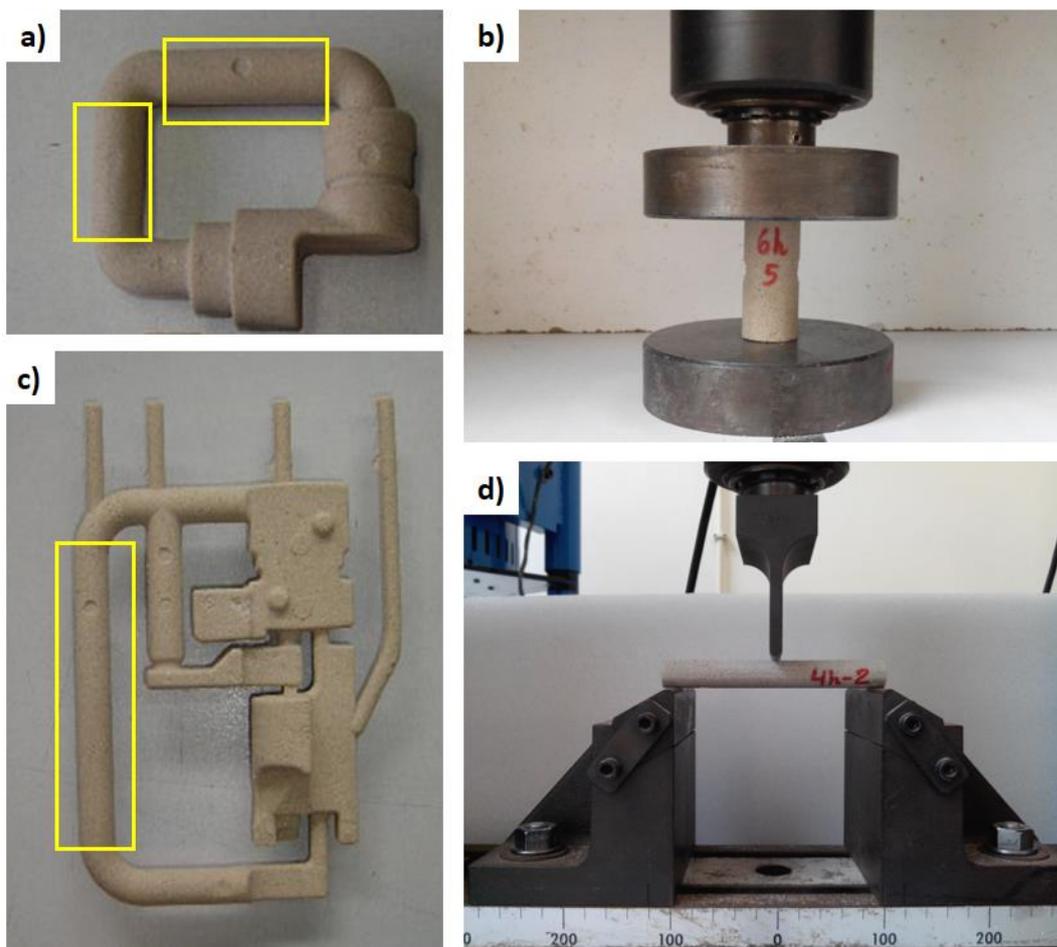
Posteriormente foram usados como provetes para os ensaios de compressão e de flexão, partes de machos (Figuras 15a e 15c) produzidos pelas máquinas automáticas na produção normal, Figura 15. Foi analisado o plano de produção da Macharia para que fosse possível realizar os ensaios no mesmo dia em que fossem produzidos machos com as dimensões necessárias. Como tal, para os ensaios de compressão foi utilizado o macho 404 310 051 (*Cozinha Concetto Feel*) de secção circular com diâmetro de 2,2 cm. Segundo a folha de parâmetros deste produto:

- Temperatura da caixa: 200°C na parte fixa, 220°C na parte móvel e 140°C no mandril
- Pressão de injeção  $\geq 3$  bar

Para os ensaios de flexão foi utilizado o macho 405 822 051 (*Cozinha ESM Shutt-Off*) de secção circular com diâmetro de 1,5 cm e segundo os seguintes parâmetros:

- Temperatura da caixa: 230°C na parte fixa e 220°C na parte móvel
- Pressão de injeção  $\geq 3$  bar

As condições de ensaio usadas foram as mesmas que para os ensaios mecânicos anteriores (com provetes da máquina manual), Figuras 15b e 15d.



**Figura 15:** Utilização do macho 404 310 051 (a) para ensaio de compressão (b) e do macho 405 822 051 (c) para ensaio de flexão (d).

Para os cálculos das resistências mecânicas foram utilizadas as seguintes equações [15]:

$$\sigma_{compress\tilde{a}o} = \frac{F}{A_0} \quad (\text{eq. 1})$$

$$\sigma_{flex\tilde{a}o} = \frac{3FL}{2bh^2} \text{ para provetes de sec\c{c}\~{a}o retangular} \quad (\text{eq. 2})$$

$$\sigma_{flex\tilde{a}o} = \frac{2,55FL}{d^3} \text{ para provetes de sec\c{c}\~{a}o circular} \quad (\text{eq. 3})$$

Onde:

- $F$  – força
- $A_0$  – área da secção reta
- $L$  – comprimento entre apoios inferiores
- $b$  – largura da amostra
- $h$  – altura da amostra
- $d$  – diâmetro da amostra

### 3.2. Novas formulações de areias de macho

Depois de analisado o sistema utilizado pela Grohe para produção de machos, foi feito um levantamento junto dos fornecedores e representantes comerciais nacionais de matérias-primas alternativas para o processo *Hot Box*.

A Sibelco Portuguesa faz parte de um dos maiores grupos mundiais da Indústria Mineral e forneceu para este trabalho amostras de duas outras areias, para além da já utilizada: areia SP 49 e SP 55. Já do grupo alemão Quarzwerke, conseguiu-se adquirir areia H-S 00108. Todos estes fornecimentos foram feitos com base em pedidos de areia de sílica com aplicação para fundição. Já as restantes matérias-primas usadas como ligante, da Hüttenes-Albertus, provêm da Fundipor, fornecedora atual da Grohe Portugal. Por razões comerciais não foi possível obter alternativas aos produtos já utilizados por parte desta empresa, pelo que apenas restou a hipótese de trabalhar com os já existentes.

As instalações da Fundipor dispõem de um laboratório de controlo dos seus produtos e, como tal, foi-me facultada a sua utilização para este trabalho. Neste capítulo serão abordadas as diferentes formulações definidas para areias de macho e quais os equipamentos utilizados para as caracterizar.

#### 3.2.1. Distribuição granulométrica e tamanho médio de grão

Para uma melhor comparação das diferentes areias fornecidas, é usada a distribuição granulométrica e o tamanho médio de grão (AGS - *Average Grain Size*) de

cada uma delas [16]. O AGS pode ser calculado a partir da multiplicação da percentagem retida em cada crivo por um multiplicador apropriado a cada crivo, sendo que a soma de todos os produtos é depois dividida pelo total de percentagem retida. Um exemplo deste cálculo está apresentado na Tabela 3 [9, 16]. Neste caso, AGS seria igual a  $20\ 335 / 99,6 = 204\ \mu\text{m}$ .

**Tabela 3:** Exemplo de cálculo do tamanho médio de grão (AGS).

Abertura do crivo	% retida	Multiplicador	Produto
≥710	0	1 180	0
500	0,3	600	180
355	1,9	425	808
250	17,2	300	5 160
212	25,3	212	5 364
180	16,7	212	3 540
150	19,2	150	2 880
125	10,6	150	1 590
90	6,5	106	689
63	1,4	75	105
≤63	0,5	38	19
Total	99,6	-	20 335

### 3.2.2. Morfologia do grão e área superficial específica

Para classificar a morfologia dos grãos de cada tipo de areia, estes foram observados num microscópio ótico *Leica* EZ4 HD. As imagens obtidas foram comparadas visualmente com as imagens características de cada tipo de morfologia, apresentadas na Figura 16. Este procedimento é o definido pela American Foundry Society, AFS – *Procedure 107-87-S* [17].

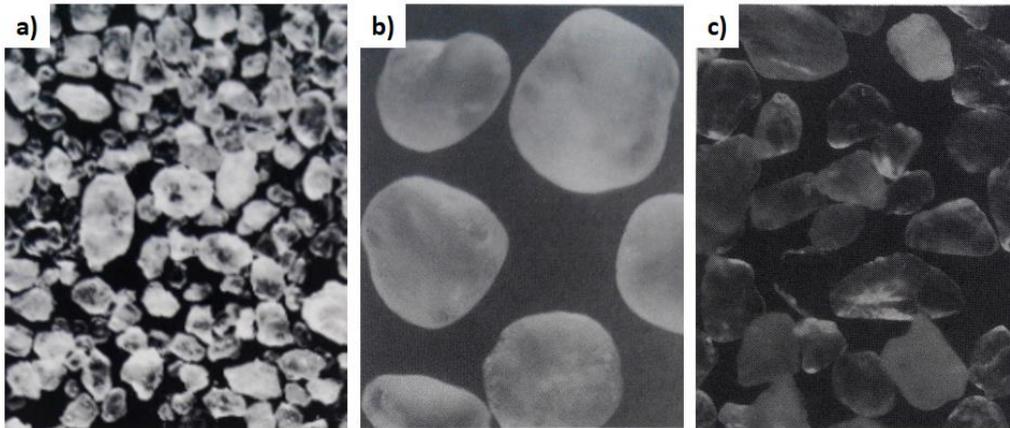
A morfologia dos grãos também pode ser definida por um coeficiente de forma (também chamado de coeficiente de angularidade), determinado pela seguinte relação [18]:

$$\text{Coeficiente de forma} = \frac{S_r}{S_t} \quad (\text{eq. 4})$$

Onde:

- $S_r$  = Superfície específica real (da areia testada)
- $S_t$  = Superfície específica teórica (de grãos esféricos com a mesma dimensão)

A forma esférica é aquela que corresponde à menor superfície específica, ou seja, a um coeficiente de forma = 1.



**Figura 16:** Morfologia característica de grão angular (a), arredondado (b) e sub-angular (c) [17].

Como os valores de área específica e coeficiente de forma são interdependentes, foram assumidos neste estudo os coeficientes de forma apresentados nas fichas técnicas de cada areia. Posteriormente, a morfologia de cada tipo de areia foi classificada segundo a Tabela 4:

**Tabela 4:** Correspondência entre formas típicas por observação visual e valores de coeficientes de forma [18].

Forma	$S_R/S_T$
arredondada	< 1,25
sub-angular	cerca de 1,50
angular	> 1,65

A determinação da área superficial específica (superfície das partículas por unidade de massa, expressa em  $m^2/g$ ) para cada tipo de areia permite relacionar a forma do grão com a quantidade necessária de resina, para que os grãos sejam totalmente recobertos.

Tendo em conta a proporção utilizada pela Grohe ( $REC/A = 1,9\%$ ), para cada quilograma de areia têm de ser adicionados 13,66 g de resina. Sabendo que a resina Sanset HB 031 tem uma densidade de  $1,245 g/cm^3$ , então o volume de resina utilizado é de  $10,97 cm^3$  em cada quilograma de areia. A superfície específica teórica,  $S_t$ , é determinada por:

$$S_t = \frac{6}{\rho D} \quad (\text{eq. 5})$$

Onde:

- $\rho$  = Densidade da areia ( $g/cm^3$ )
- $D$  = Diâmetro dos grãos, análogo ao AGS (cm)

A equação anterior resulta da dedução de que, para uma esfera,  $S$  é dada por  $\frac{A}{V\rho}$ , onde  $A$  (área da superfície esférica) =  $4\pi r^2$  e  $V$  (volume da esfera) =  $\frac{4}{3}\pi r^3$ . Foi considerado que  $\rho_{\text{areia}} = 2,65 \text{ g/cm}^3$ .

Posteriormente foi determinado  $S_r$  para as diferentes areias, a partir dos respectivos valores de  $S_t$ . Desta forma, a espessura da camada de resina que envolve os grãos de areia é dada por:

$$\frac{V_{\text{resina/kg de areia}}}{S_r} \quad (\text{eq. 6})$$

### 3.2.3. Definição de novas formulações

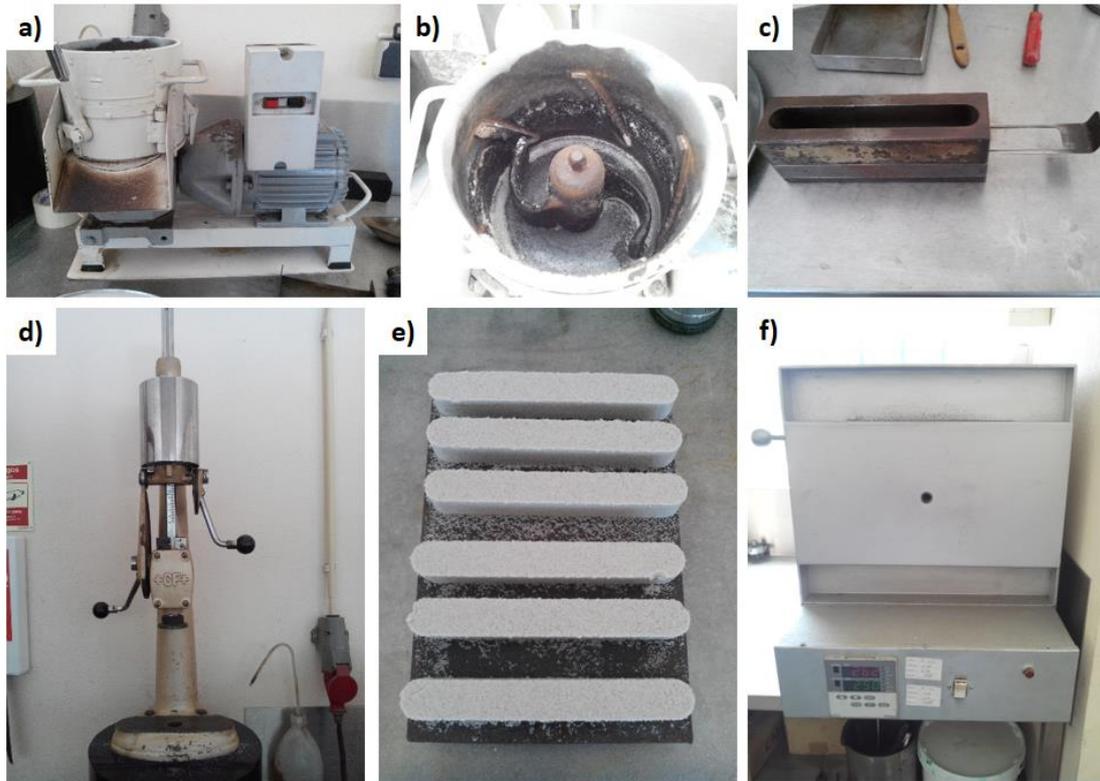
Numa segunda fase do trabalho, foram definidas novas formulações fazendo variar o tipo de areia utilizada e a proporção REC/A. Para isso foram utilizadas as quatro areias SP 45, SP 55, SP 49 e H-S 00108 e proporções de REC/A = 1%, 1,4%, 1,6%, 1,9%, 2,4% e 2,8%.

### 3.2.4. Preparação de provetes para ensaios de flexão, dureza e permeabilidade

Definidas as novas formulações a estudar, o laboratório da Fundipor foi disponibilizado para a realização de um conjunto de ensaios. A massa calculada de cada matéria-prima a adicionar (Figura 17) foi pesada numa balança e colocada num misturador já em funcionamento, Figuras 18a e 18b, aí permanecendo durante aproximadamente 5 minutos.



**Figura 17:** Matérias-primas (areia, conservante, endurecedor e resina) utilizadas.

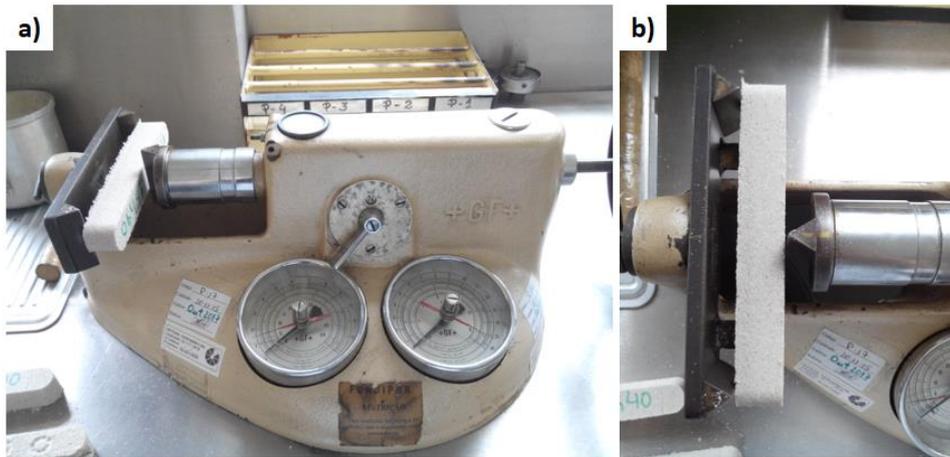


**Figura 18:** Misturador manual (a) e (b), molde com guilhotina (c) e compactador utilizados, provetes resultantes (e) e mufla onde estes foram curados (f).

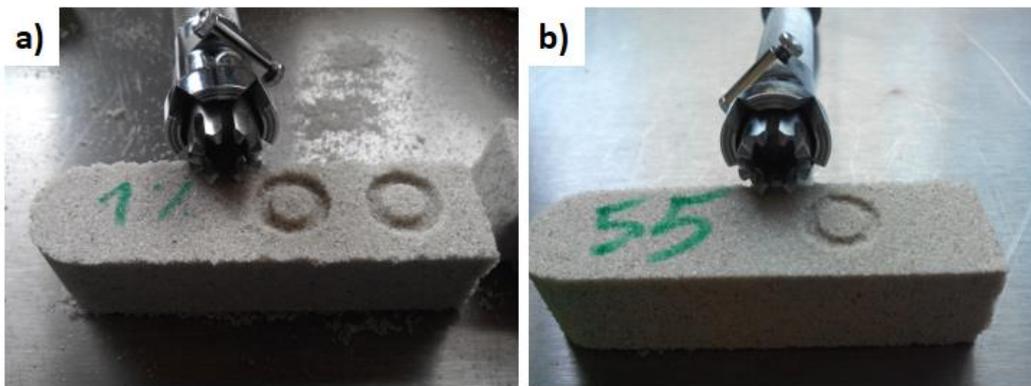
Feita a mistura, esta foi colocada dentro de um molde (Figura 18c) e compactada num compactador (Figura 18d) com 3 pancadas (número de vezes que o punção bate na areia). Os provetes foram cortados com a guilhotina do molde e dispostos sobre uma placa (Figura 18e) pronta a ser levada a mufla (Figura 18f). Estes equipamentos são designados pela *American Foundry Society* como indicados para a preparação de amostras [19]. Cada carga realizada permitiu fazer 6 provetes com cerca de 20cm de comprimento, que foram a seguir levados a uma mufla por 6 minutos, a uma temperatura de 240°C. Posteriormente, os provetes foram devidamente identificados e foram feitos ensaios de flexão e dureza após 0h, 1h, 2h e 24h de tempo de espera depois da cura em mufla.

O ensaio de flexão em três pontos consiste em fazer avançar o punção com auxílio de uma manivela até se dar a rutura do provete, Figura 19. A leitura da resistência à flexão é feita diretamente no mostrador, em kg/cm<sup>2</sup>.

Os mesmos provetes, depois de partidos, foram reaproveitados para o ensaio de dureza. Para este ensaio foi utilizado um durómetro *PKH Core Hardness Tester*, cuja finalidade é medir a profundidade de penetração do seu indentador no macho, quando este é rodado 5 vezes para trás e para a frente alternadamente, Figura 20. O aparelho é bloqueado e é feita a leitura em mm na interseção da escala com a periferia do botão de giro.

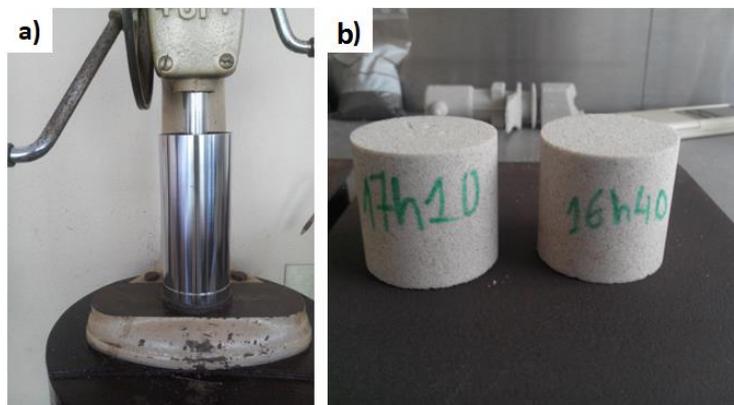


**Figura 19:** Ensaio de flexão realizado na Fundipor (a) e (b) com equipamento *Georg Fischer*.



**Figura 20:** Ensaio de dureza realizado na Fundipor mostrando uma maior (a) e uma menor (b) profundidade de penetração.

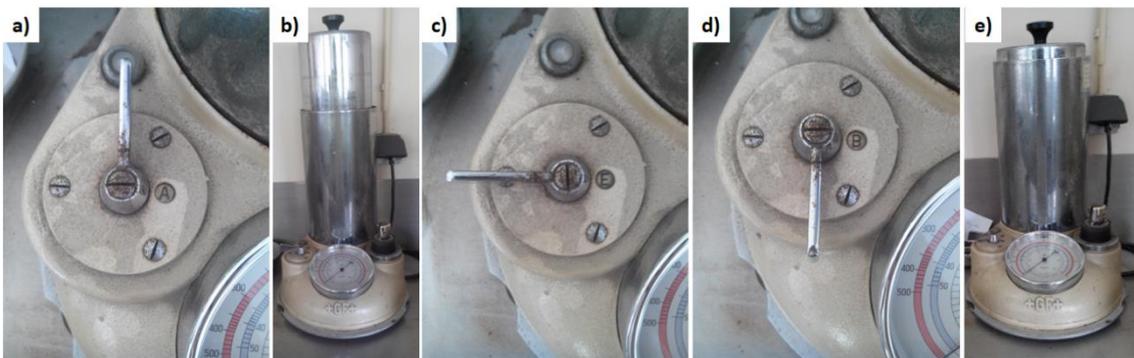
Para os ensaios de permeabilidade teve de ser preparado outro tipo de provetes, desta vez cilíndricos, como se mostra na Figura 21. Para cada provete, foram pesados 150g da mistura igual à feita anteriormente e foi da mesma forma feita a compactação, agora num molde cilíndrico com 5cm de diâmetro. A temperatura utilizada foi a mesma, mas durante 15 minutos.



**Figura 21:** Molde cilíndrico durante a compactação (a) e provetes cilíndricos obtidos (b).

Na medição da permeabilidade, foi usado um permeâmetro *Georg Fischer*, de carga constante, ilustrado na Figura 22. A pressão exercida pela descida da água provoca a passagem de ar através da amostra, cuja pressão é indicada no manómetro.

O provete deve ser posicionado no cilindro onde foi curado, que serve de encaixe à zona de medição do permeâmetro (por onde sai o ar). Com a válvula aberta na posição “A” (Figura 22a), o tambor é cuidadosamente puxado para cima (Figura 22b) e é logo de seguida fechada a válvula (para a posição “E”, Figura 22c), para que o tambor se mantenha nesta posição. A medição é então iniciada quando se abre a válvula (esta tem de estar na posição “B” – Figura 22d) e é cronometrado o tempo que o tambor demora a ficar na posição da Figura 22e (cuja capacidade é de 2000 ml). É feito o registo da pressão em mmWC e do tempo que o tambor demorou a descer (s), bem como a altura das amostras (cm).



**Figura 22:** Permeâmetro de carga constante: abertura da válvula (a), puxada do tambor (b), fecho da válvula (c), abertura da válvula para passagem do ar através da amostra (d) e descida do tambor (e).

A permeabilidade é expressa pelo volume de ar em  $\text{cm}^3$  que passa por minuto pelo provete sob uma pressão em mmWC (water column). A expressão que permite calcular o *Permeability Number* (PN) é dada por [17,20]:

$$PN = \frac{Vh}{PA t} \quad (\text{eq. 7})$$

Onde:

- $V$  = volume de ar (ml)
- $h$  = altura da amostra (cm)
- $A$  = área da secção reta ( $\text{cm}^2$ )
- $P$  = pressão do ar em coluna de água
- $t$  = tempo em minutos

Foi calculada uma média de duas medições para cada provete e utilizados 2 provetes para cada formulação.

### 3.3. Ensaio industrial com a formulação selecionada

Após a receção de 28 *big bags* de 860kg cada da nova areia H-S 00108, foi feito um ensaio industrial com esta usando uma formulação REC/A igual à que está em funcionamento na produção, para limitar o número de variáveis do processo. Esta areia foi selecionada pelas suas semelhanças com a areia SP 55 da Sibelco. Após receção, foi vazada para o silo com a ajuda de um empilhador, Figura 23.

A produção com a nova areia decorreu da mesma forma que o processo utilizado industrialmente, sem alteração de parâmetros, até que se esgotasse o stock recebido.



**Figura 23:** *Big bag* a ser vazado com a ajuda de um empilhador (a) e areia a ser transferida para o silo interior (b).

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1. Caracterização do sistema atual

##### 4.1.1. Análise da mistura utilizada pela Grohe

Foram analisadas as matérias-primas utilizadas na Macharia a partir das respetivas fichas de especificação técnica. A resina utilizada, de cor verde, é do tipo ureia-formaldeído. O endurecedor consiste numa solução aquosa de ureia com sais de amónio e outros aditivos, e apresenta cor preta. O conservante, de cor branca, é feito à base de hidrocarbonetos pesados. A areia SP 45 é uma areia siliciosa, com cerca de 99% de SiO<sub>2</sub> na sua composição.

As matérias-primas utilizadas são qualitativamente adequadas ao processo *Hot Box*, de acordo com o referido no Capítulo II – Processo de Fabrico de Machos.

##### 4.1.2. Controlo do doseamento de matérias-primas

Nos gráficos das Figuras 24, 25, 26 e 27 encontram-se os resultados das pesagens de cada matéria-prima, ao longo das primeiras semanas de 2016, nomeadamente da areia SP45 da Sibelco e dos componentes REC. A linha horizontal verde corresponde ao valor alvo a atingir pelos sistemas de doseamento enquanto as linhas horizontais a vermelho demarcam os limites superior e inferior admissíveis na produção.

Como se pode ver pela Figura 24 abaixo, a quantidade de areia utilizada atingiu o limite superior (32 200 g) na semana 6 e 18, mas nunca o superou. Por esta razão, não foram necessárias quaisquer ações corretivas.

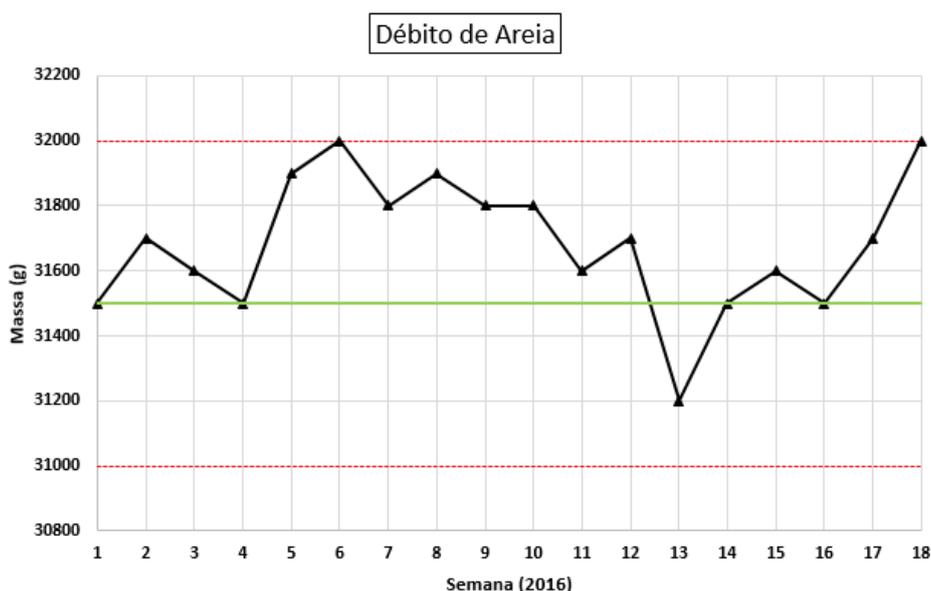
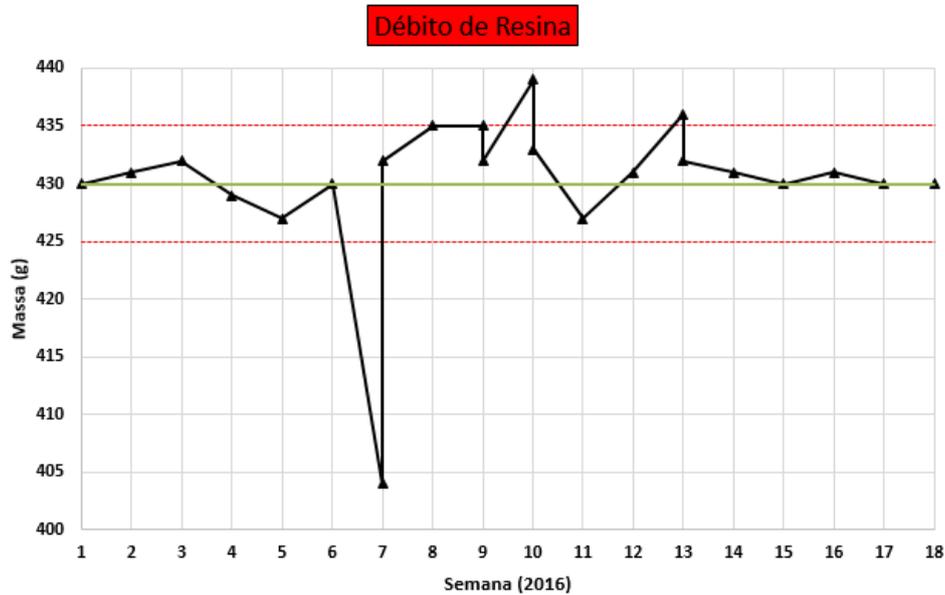


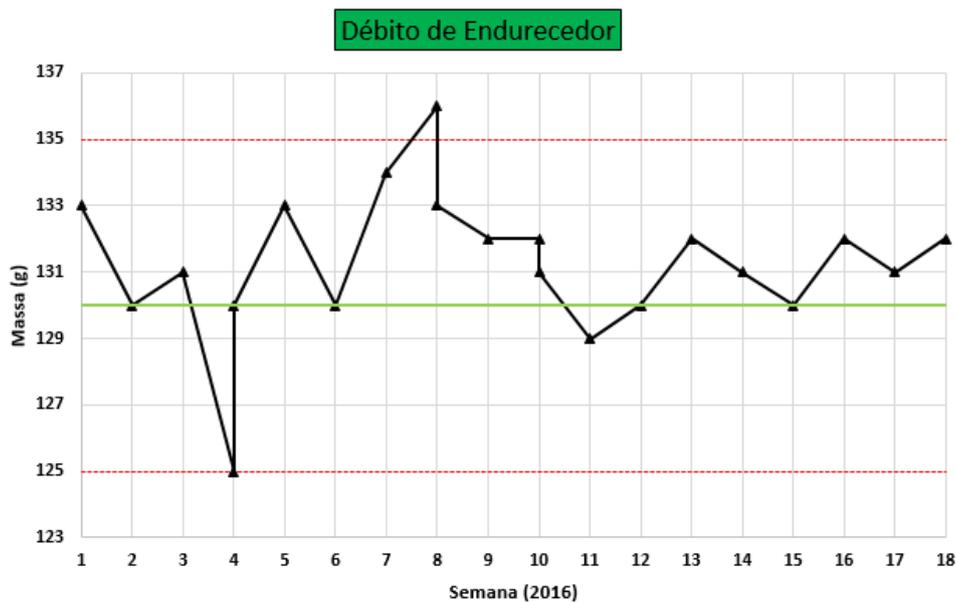
Figura 24: Controlo do doseamento de areia, nas 18 primeiras semanas de 2016.

Para a resina, como se pode ver na Figura 25, a pesagem obtida teve um valor muito baixo na semana 7, pelo que foi feita a substituição da bomba doseadora correspondente. Depois disso, nas semanas 8 a 13, teve de ser feita a afinação da bomba doseadora já que os valores obtidos estavam acima do valor limite superior.



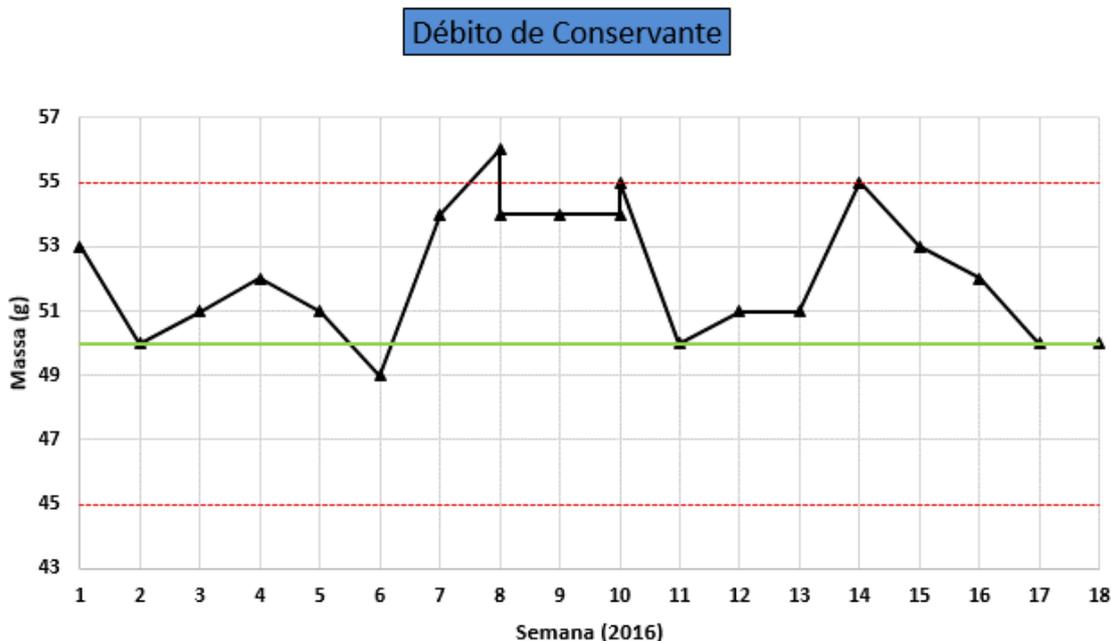
**Figura 25:** Controlo do doseamento de resina, nas 18 primeiras semanas de 2016.

Quanto ao débito de endurecedor, Figura 26, este ultrapassou o valor limite inferior na semana 4 e o superior na semana 8, pelo que foi necessária a afinação dessa bomba doseadora. Após essa ação de correção, o valor da pesagem aproximou-se do valor alvo.



**Figura 26:** Controlo do doseamento de endurecedor, nas 18 primeiras semanas de 2016.

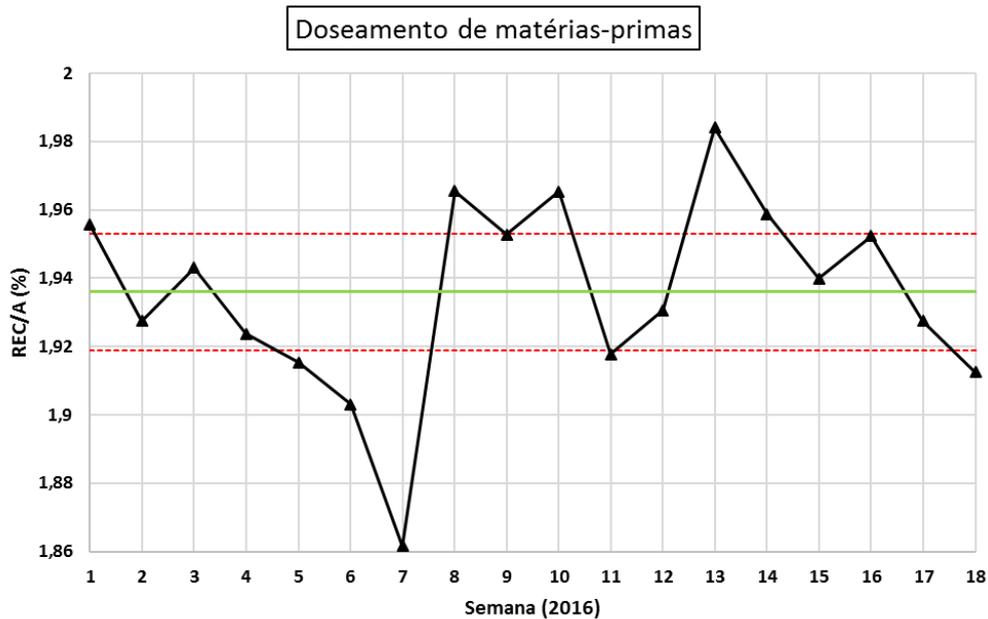
Quanto ao conservante, foi necessário fazer a afinação da bomba doseadora nas semanas 8 e 10 por um pequeno desvio do limite superior, Figura 27.



**Figura 27:** Controlo do doseamento de conservante, nas 18 primeiras semanas de 2016.

O controlo do doseamento de cada matéria-prima garante que as quantidades que estão a ser usadas verdadeiramente em cada carga, são o mais próximas possível das quantidades previamente definidas para um processo controlado de produção de machos. No caso dos componentes de ligante estarem em defeito, poderia levar a um recobrimento incompleto dos grãos de areia e, ao contrário, no caso de estarem em excesso poderia levar a um aumento do tempo necessário para o endurecimento dos machos.

Quantitativamente, o abastecimento das matérias-primas não parece contribuir para maus resultados no processo de produção dos machos, já que as quantidades debitadas se encontram na sua maioria dentro dos limites admitidos: 89% dos resultados encontram-se controlados no caso do endurecedor e do conservante; 78% no caso da resina; e 100% no caso da areia. No entanto, o facto do débito de cada uma das matérias-primas estar dentro dos limites admitidos não significa o mesmo se tivermos em conta a proporção REC/A. Isso é mostrado na Figura 28, onde se vê a evolução de REC/A ao longo das mesmas semanas. Deste ponto de vista, 67% dos valores encontram-se fora (ou em cima) dos limites estabelecidos. Por exemplo, na semana 13, apesar de ser apenas a resina a ter um valor um pouco acima do limite para ela definido, o facto do débito de areia ter sido baixo (mas na mesma dentro dos limites) disparou o valor de REC/A para quase 1,99% pela relação inversamente proporcional.

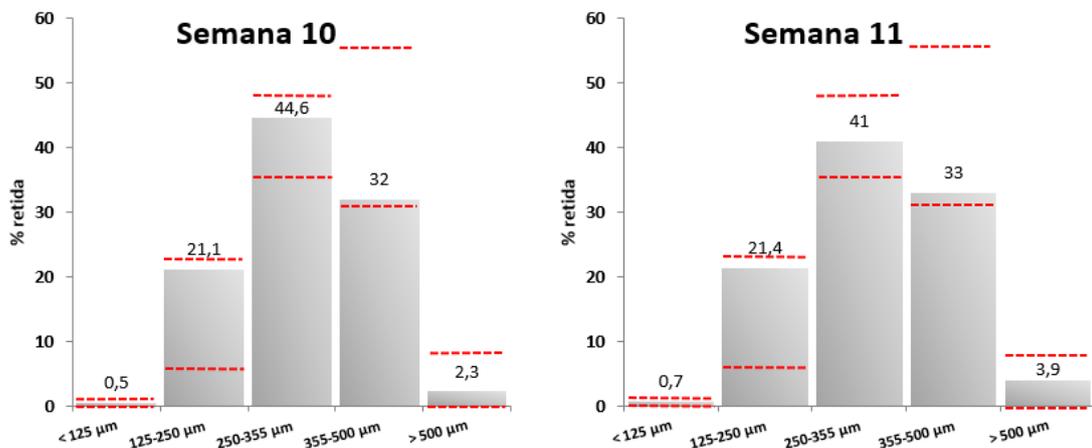


**Figura 28:** Doseamento de matérias-primas, em termos de REC/A (%).

Estes resultados levam a afirmar que, apesar dos débitos de cada matéria-prima estarem bem controlados por ações de correção imediatas, o sistema global encontra-se muitas vezes fora do desejado. Por este motivo, esta deveria passar a ser uma variável controlada por parte da Macharia, ao invés de serem apenas analisadas as matérias-primas individualmente.

#### 4.1.3. Controlo da distribuição granulométrica da areia

A Figura 29 mostra os resultados da distribuição granulométrica de areia SP 45 retirada à saída do silo, nas semanas 10 e 11, tal como determinada por crivagem (4 crivos). A vermelho são mostrados os valores máximo e mínimo de percentagem retida em cada crivo, estipulados pelo fornecedor como sendo o intervalo em que deve incidir cada classe granulométrica.



**Figura 29:** Distribuição granulométrica da areia à saída do silo, nas semanas 10 e 11.

Todos os valores se encontram dentro das especificações técnicas, pelo que o produto adquirido corresponde realmente ao designado pelo fornecedor. Com isto se pode afirmar que a distribuição granulométrica desta matéria-prima é uma variável controlada, não sendo neste âmbito necessária nenhuma alteração.

#### 4.1.4. Controlo das temperaturas das caixas de macho

Foram medidas as temperaturas de duas caixas: do macho 406 013 051 que estava a ser produzido na máquina V&S 3 e do macho 64 593 151 que estava a ser produzido na máquina V&S 2. As medições foram feitas nas três diferentes partes da caixa: parte fixa, parte móvel e mandril.

As temperaturas medidas em cada parte da caixa estão apresentadas nos gráficos da Figura 30, bem como a temperatura requerida para essa região (a verde) e os limites entre os quais essa temperatura pode variar,  $\pm 20^{\circ}\text{C}$  (a vermelho). As temperaturas requeridas em cada zona da caixa são as definidas pela folha de parâmetros de cada produto.

Como se pode ver no gráfico de cada produto, em ambos os casos, a temperatura da parte móvel da caixa encontra-se um pouco acima do limite máximo estipulado:  $2^{\circ}\text{C}$  acima na caixa do produto 406 013 051 e  $7^{\circ}\text{C}$  no caso da caixa do produto 64 593 151. Tais variações podem advir do facto da temperatura ambiente no dia destas medições ser consideravelmente alta ( $32^{\circ}\text{C}$ ), e ainda do facto da sonda de medição ser projetada para superfícies planas. Como as cavidades das caixas de macho são superfícies arredondadas, esta medição torna-se difícil e pode conduzir a desvios experimentais. No entanto, de um modo geral, este é um parâmetro bem controlado na medida em que não surgem machos queimados ou sem as propriedades mecânicas adequadas.

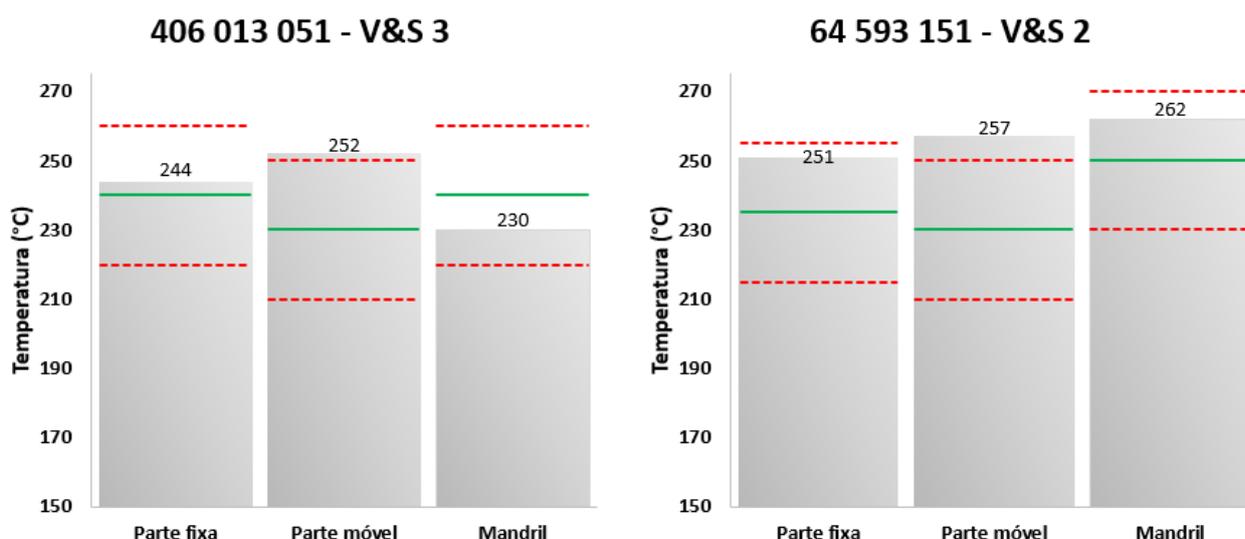
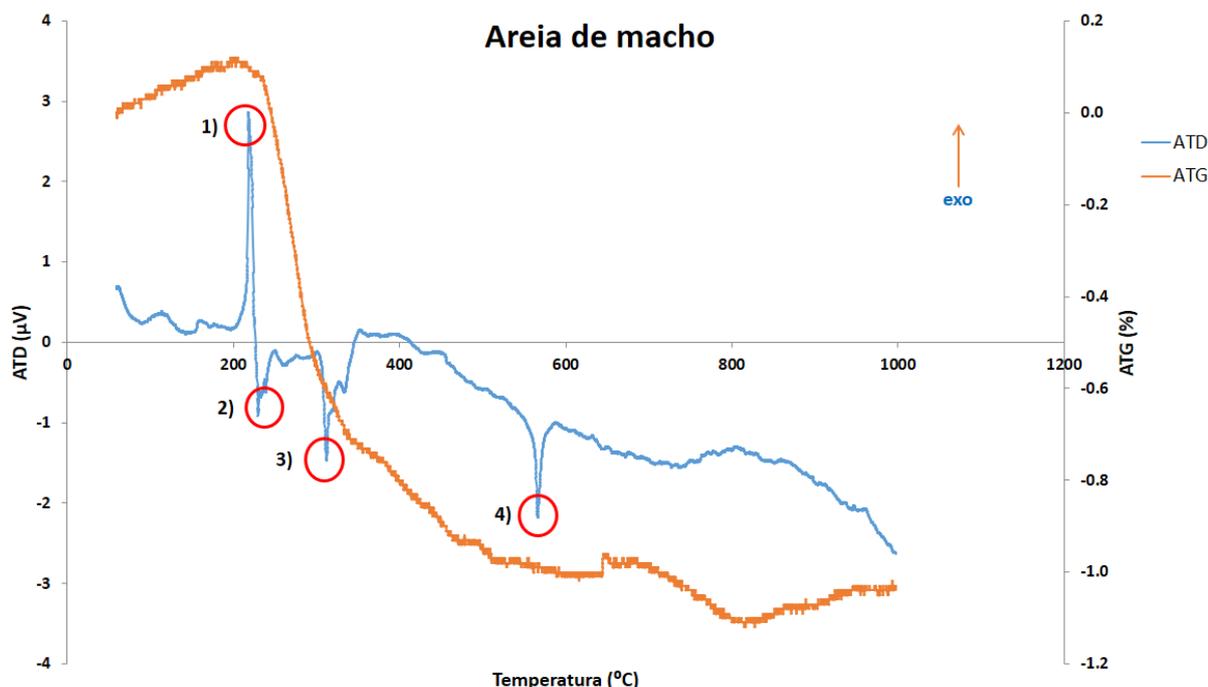


Figura 30: Temperaturas das caixas de macho dos produtos 406 013 051 e 64 593 151.

#### 4.1.5. Análises térmicas da areia de macho

Analisando os resultados das análises termogravimétrica e térmica diferencial (Figura 31), até aos 200°C há um ganho de massa e daí em diante apenas há diminuição de massa (linha ATG). O ganho de massa está associado à linha de base da curva, enquanto que a perda de massa é relativa à decomposição do ligante orgânico. Em particular há acentuada queda de massa no intervalo 200 - 450 °C relacionados com a decomposição dos diversos componentes presentes na resina e a sua queima, a temperaturas superiores.

Quanto à curva ATD, esta exibe um pico exotérmico aos 220°C (pico 1 na Figura 31) que representa provavelmente a queima do conservante, já que este é um óleo ou silicone. Logo de seguida, e acompanhado de grande perda de massa, surge um pico endotérmico aos 230°C (pico 2) característico do início de decomposição da resina do macho, com a degradação das pontes metileno-éter acompanhada de libertação de formaldeído. Isto porque, tal como referido anteriormente, estamos perante um sistema que contém uma resina furânica do tipo ureia-formaldeído. O pico 3 da Figura 31 (310°C), também endotérmico, surge como decomposição de outro produto da reação de formação deste tipo de resina: dimetilolureia. Por fim, o pico 4 surge sem alteração de massa aos 570°C, temperatura que representa a passagem do quartzo de fase  $\alpha$  para fase  $\beta$  característico da areia de sílica. Em relação ao endurecedor, não é identificável a sua influência no sistema, já que apenas se sabe pela informação comercializada de que a sua composição é à base de uma mistura de sais de amónio, solução aquosa de ureia e outros aditivos.



**Figura 31:** Análise térmica ATD e ATG da areia de macho. Círculos a vermelho indicam os picos endotérmicos e exotérmicos.

Esta análise permitiu a percepção da variação das propriedades de um macho quando este é sujeito a um aumento de temperatura durante a fundição, e que transformações podem estar associadas. Além disso, prova que é possível o reuso de areias ligadas quimicamente, já que a resina é completamente queimada quando sujeita a temperaturas de cerca de 600°C. Apesar do possível reaproveitamento das areias de macho, esta alternativa não é colocada em prática porque não é economicamente viável: envolve o custo da energia necessária para queimar a areia e o investimento em toda a instalação precisa para o fazer. Fazendo uma rápida simulação com o baixo preço da areia (50€/tonelada) e o seu consumo feito pela Fundição ao longo de um ano (1 545 060kg, referente ao ano de 2015) e com um custo associado de transporte de cerca de 50 000€, seriam necessários cerca de 8 anos para recuperar o investimento inicial de todo o equipamento, tendo em conta que este rondaria 1 M€. Para além disso, uma areia que foi recuperada não tem o mesmo comportamento que a areia original em termos de distribuição granulométrica. Por estas razões, toda essa areia é valorizada em cimenteiras, nas quais existem fontes de calor que permitem a completa eliminação dos resíduos orgânicos sem custos adicionais.

#### 4.1.6. Ensaios mecânicos de compressão e de flexão

São aqui apresentados os resultados referentes aos ensaios de compressão e flexão de um total de 120 provetes preparados, metade dos quais feitos na máquina *Röperwerk* e os restantes com partes de macho, como referido na secção 3.1.6.

Em todos os gráficos está exibida a média de 5 medições obtidas no final do tempo de espera pré-estabelecido, bem como o desvio padrão associado (barras de erro a vermelho). O desvio padrão permite dar uma ideia da dispersão das medições em torno do valor médio, e o seu cálculo é feito a partir da equação 8.

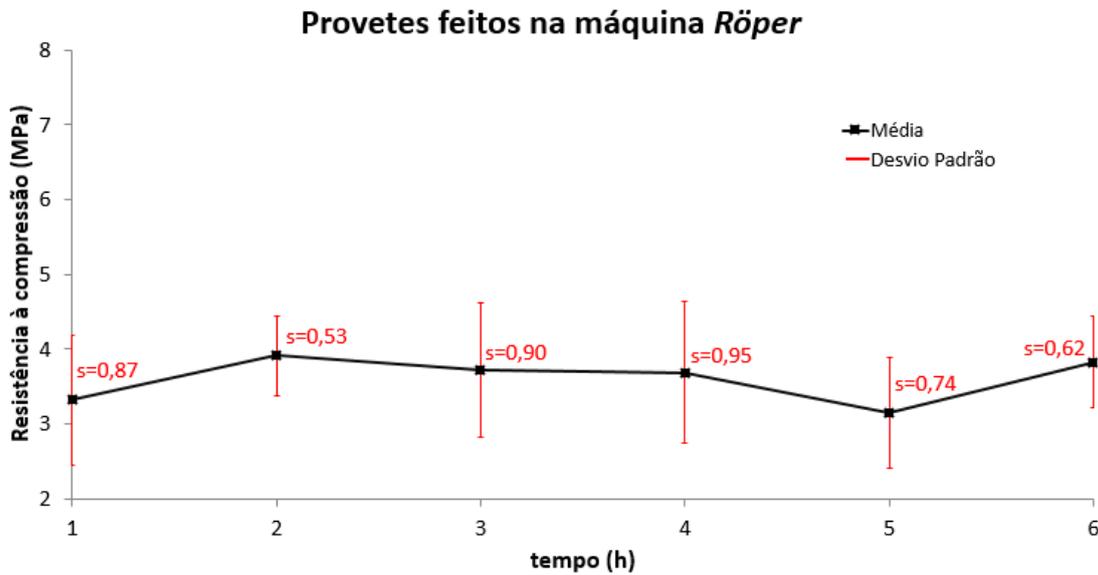
$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (\text{eq. 8})$$

Onde:

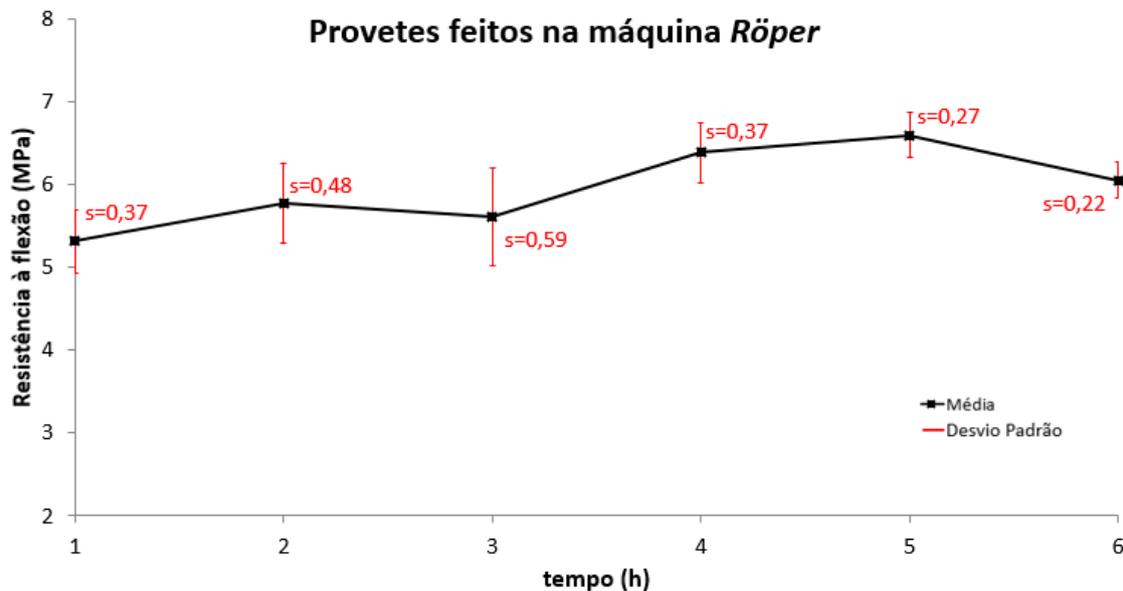
- $s$  – desvio padrão
- $x$  – valor da amostra
- $\bar{x}$  – média da amostra
- $n$  – dimensão da amostra

Analisando os primeiros provetes preparados na máquina manual de machos *Röperwerk*, podemos ver pelas Figuras 32 e 33 que tanto a resistência à compressão como a resistência à flexão aumentam ao fim de 6h. No entanto este aumento não é de todo constante e traz consigo uma grande variabilidade dos valores à volta da média, principalmente no caso da resistência à compressão: o alto desvio padrão associado mostra que num conjunto de provetes produzidos sob as mesmas condições e com o

mesmo tempo de cura, podem resultar valores de resistência mecânica bastante diferentes.

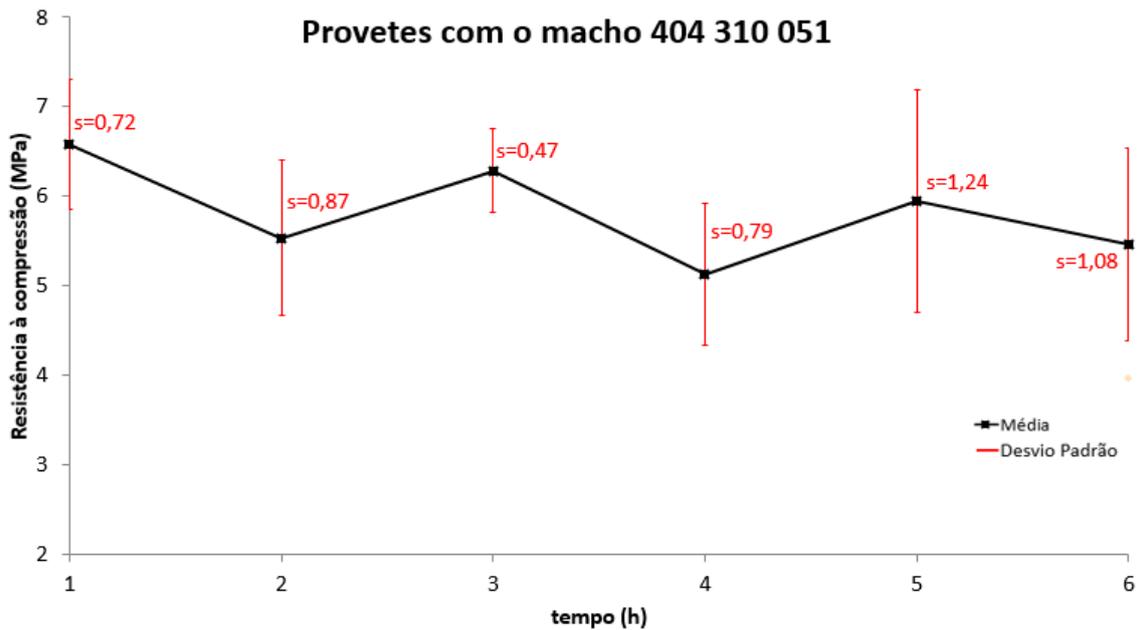


**Figura 32:** Resistência à compressão ao longo de 6h após produção do macho, medida na máquina Röper.

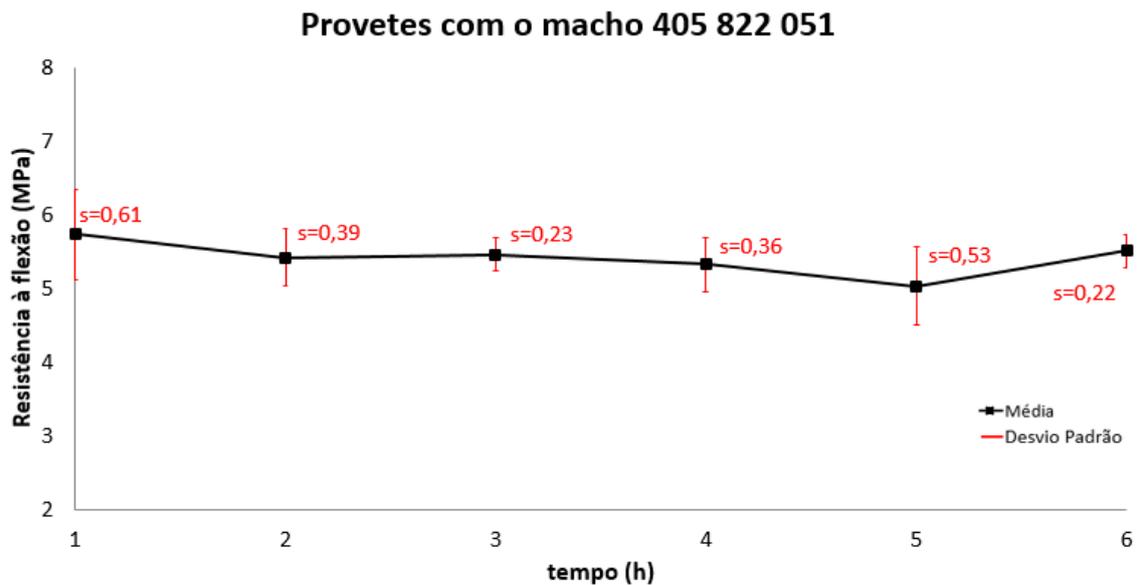


**Figura 33:** Resistência à flexão ao longo de 6h após produção do macho, feito na máquina Röper.

Isto mostra que não há reprodutibilidade na preparação dos provetes devido ao processo que é todo ele feito de forma manual, ao material (diferenças de temperatura entre o mandril, que não é aquecido na máquina Röper, e a caixa) e até mesmo devido a erros associados ao operador. Por esta razão foram realizados novos ensaios mecânicos, desta vez utilizando machos da produção diária como provetes.



**Figura 34:** Resistência à compressão ao longo de 6h após produção do macho 404 310 051.



**Figura 35:** Resistência à flexão ao longo de 6h após produção do macho 405 822 051.

Tal como pode ser visto nas Figuras 34 e 35, não se verifica que haja um aumento de resistência dos machos ao longo do tempo. Além disso, a inconstância da resistência mecânica ao longo do tempo e a elevada dispersão de valores (mais notório no ensaio de compressão) continua a indicar que não há reprodutibilidade no que toca à preparação dos provetes. Por este motivo, foi necessário arranjar uma forma alternativa de qualificar os machos da Grohe, a qual será analisada na secção 4.2. Apesar disto, os valores são globalmente mais consistentes, pois em ambos os modos de rutura, à compressão e à flexão, se obtêm valores semelhantes, na gama 5-6 MPa.

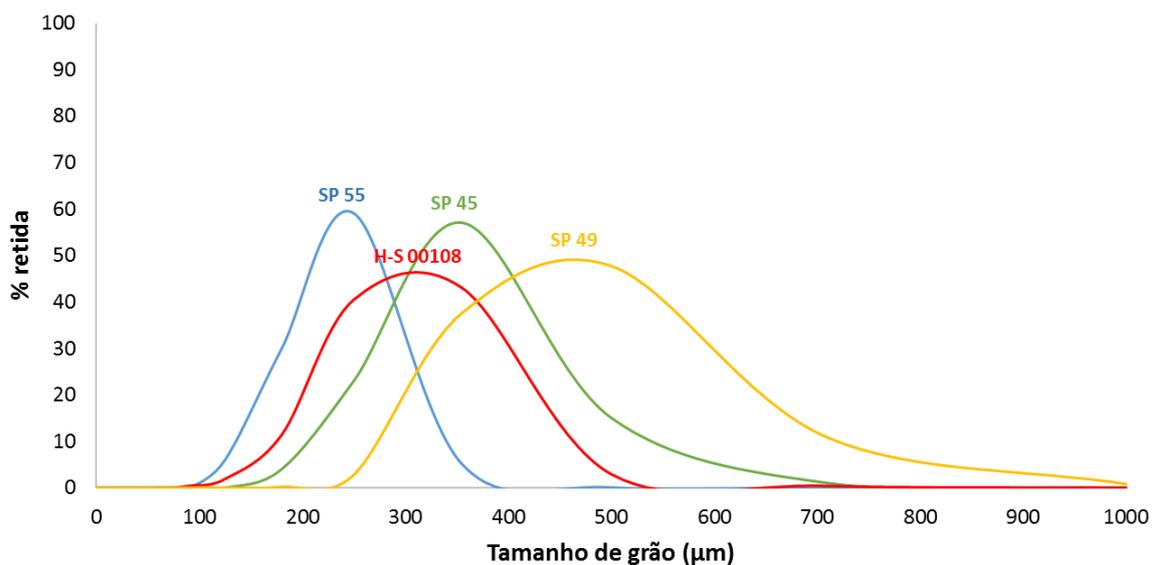
## 4.2. Novas formulações de areias de macho

### 4.2.1. Distribuição granulométrica e tamanho médio de grão

A distribuição granulométrica da areia SP 45 e de cada uma das novas areias testadas (SP 49, SP 55 e H-S 00108) é mostrada na Figura 36. O tamanho médio de grão de cada uma delas (AGS), determinado a partir de cada distribuição é apresentado na Tabela 5. A areia com menor tamanho médio de grão é a areia SP 55 (AGS=270), muito próximo à areia H-S 00108 (AGS=290), ao passo que a areia SP 49 é a mais grosseira de todas. A areia até então utilizada na Grohe, SP 45, tem distribuição intermédia entre a SP 55 e a SP 49, sendo a H-S 00108 a que mais se aproxima desta em termos de distribuição granulométrica e tamanho médio de grão.

**Tabela 5:** Tamanho médio de grão (AGS) das areias testadas.

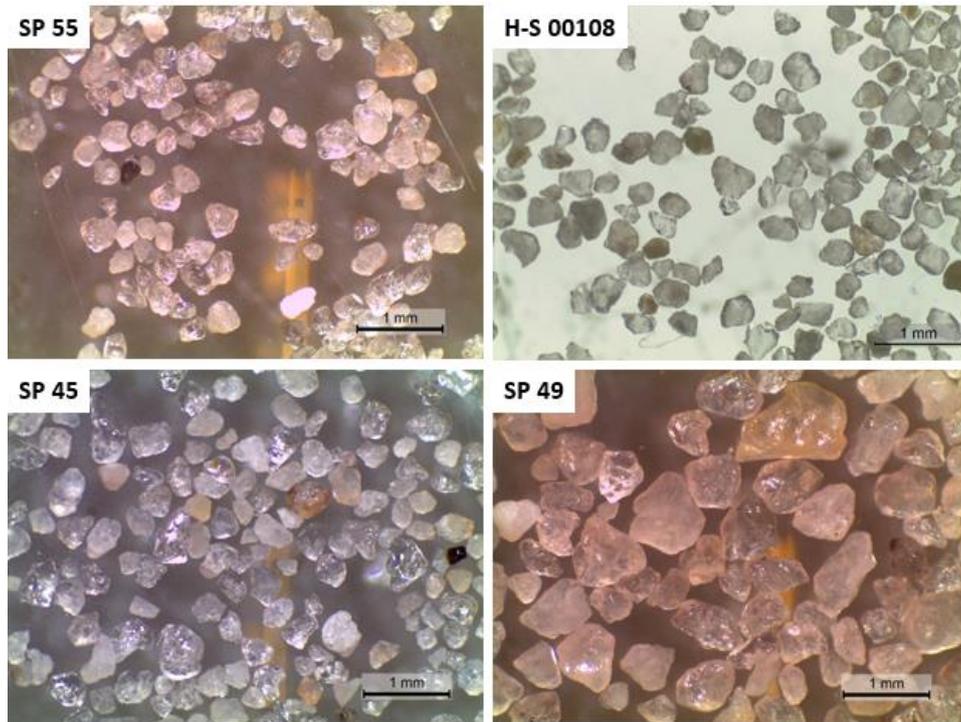
μm	% retida			
	SP 55	H-S 00108	SP 45	SP 49
1000	0	0	0,05	0,8
710	0	1	0,5	10,8
500	0	15	3	47,7
355	5	57	43	37,6
250	59	23	40,5	2,8
180	30	4	11,5	0,2
125	6	0	2	0
90	0	0	0,5	0
63	0	0	0,05	0
0	0	0	0	0
<b>AGS</b>	<b>270</b>	<b>290</b>	<b>355</b>	<b>561</b>



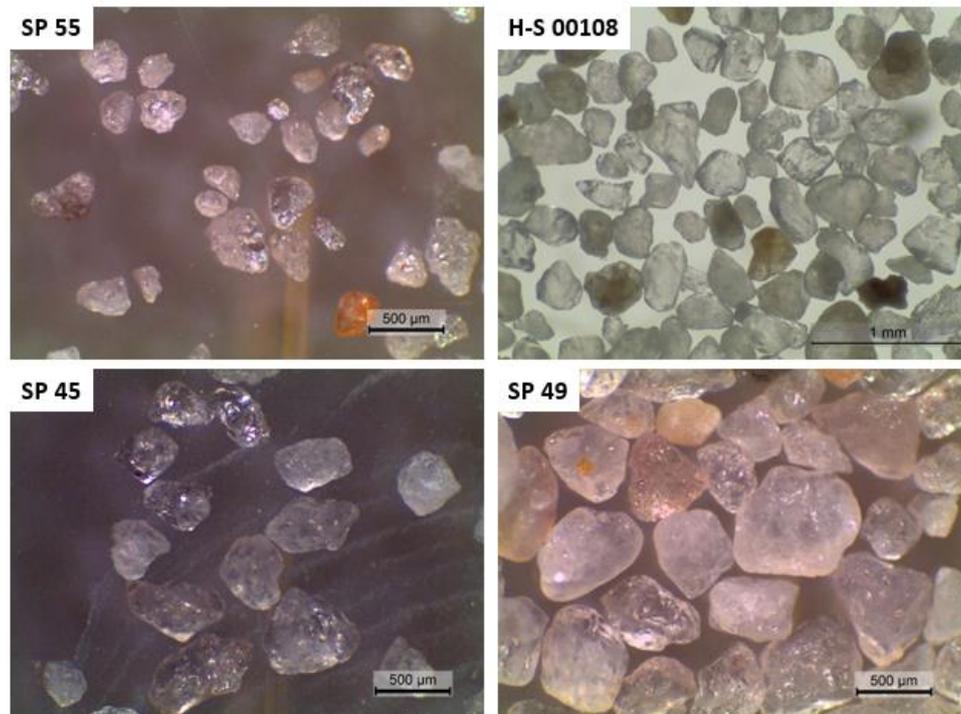
**Figura 36:** Distribuição granulométrica das areias SP 55, H-S 00108, SP 45 e SP 49.

#### 4.2.2. Morfologia do grão e área superficial específica

Observando as imagens obtidas em lupa binocular das várias areias (Figuras 37 e 38), é possível constatar que todas possuem grãos poliédricos com características de grão sub-angular (Figura 16). As dimensões relativas dos vários grãos permitem comprovar visualmente as curvas de distribuição granulométrica da Figura 36.



**Figura 37:** Imagens das diferentes areias obtidas em lupa binocular.



**Figura 38:** Imagens das diferentes areias obtidas em lupa binocular.

De acordo com os respectivos coeficientes de forma, apresentados na Tabela 6, podemos também concluir que todas as areias são consideradas de grão sub-angular. No entanto, a areia SP 49 encontra-se mais próxima do tipo arredondado do que as restantes (tem o menor coeficiente de forma).

**Tabela 6:** Coeficientes de forma de cada areia (valores das fichas técnicas).

Areia	SP 55	H-S 00108	SP 45	SP 49
$S_r/S_t$	1,42	1,40	1,39	1,30

Os resultados da Tabela 7 mostram que para a mesma quantidade de resina utilizada por cada quilograma de areia, quanto mais irregulares são os grãos (maior coeficiente de forma) maior é a superfície específica disponível e mais fina será a camada de resina envolvente. Desta forma, a areia SP 55 é a que necessita de uma maior quantidade de ligante para se obter a mesma espessura de camada envolvente aos grãos de todas as areias, por ter uma maior área de superfície associada aos grãos mais irregulares de todo o conjunto.

**Tabela 7:** Cálculo da espessura de camada de resina envolvente aos grãos de areia.

Areia	SP 55	H-S 00108	SP 45	SP 49
$S_r/S_t$	1,42	1,4	1,39	1,3
AGS ( $\mu\text{m}$ )	270	290	355	561
$S_t$ ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	84	78	64	40
$S_r$ ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	119	109	89	52
Espessura da camada de resina ( $\mu\text{m}$ )	0,92	1,00	1,24	2,09

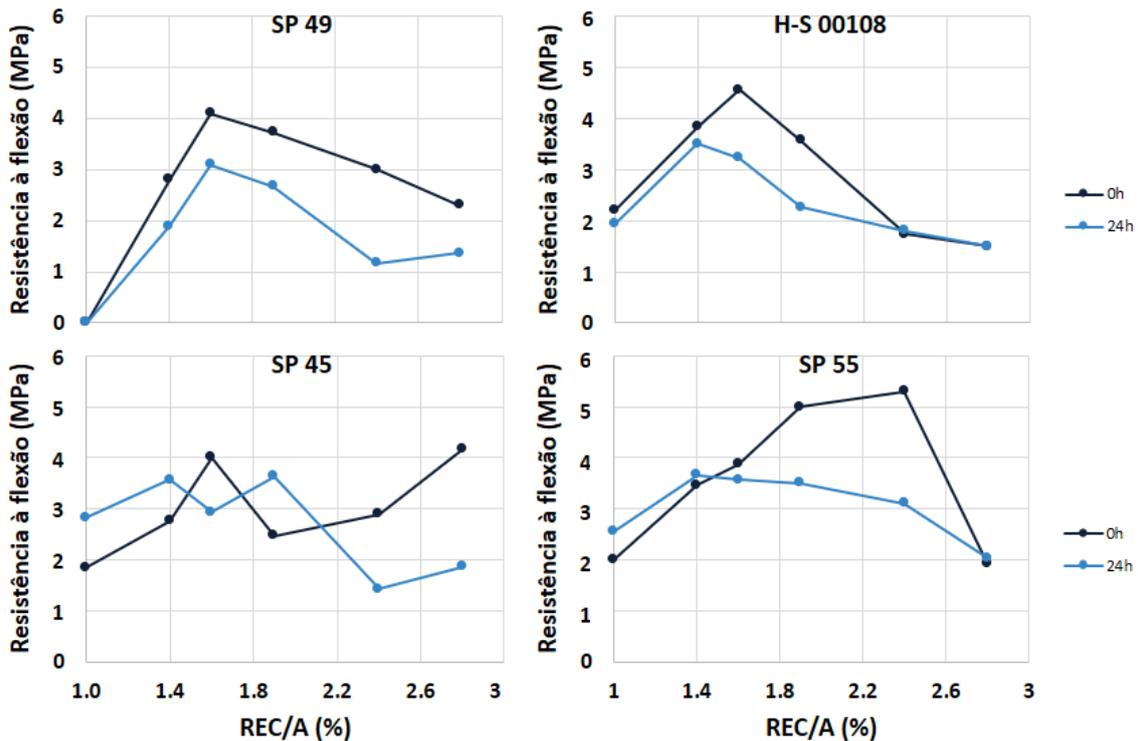
#### 4.2.3. Resultados dos ensaios de flexão, dureza e permeabilidade

Os resultados dos ensaios realizados a cerca de 330 provetes, preparados com as quatro areias e o sistema ligante usado na produção, são de seguida analisados. Na Figura 39 são mostrados os gráficos relativos à resistência à flexão determinada a diferentes proporções REC/A, para as 4 areias utilizadas.

A resistência à flexão imediatamente após a preparação dos provetes (0h) e após 24h de armazenamento têm evolução semelhante com o aumento da razão REC/A, embora os valores após 24h sejam tendencialmente mais baixos (ao contrário do que seria de prever: estudos mostram um aumento com o tempo de armazenamento de cerca de 1,5 MPa) [21]. A exceção é a areia SP 45, em que os valores dependem do teor de REC, sem uma tendência nítida. Pelo contrário, nas restantes 3 areias há um aumento da resistência à flexão com a razão REC/A até um valor máximo que depois desce para valores que chegam a ser os mais baixos na gama REC/A = 1 - 2,8%. Os máximos, que variam entre cerca de 3 MPa e 5 MPa são por isso dependentes do tipo de areia, da razão REC/A e do tempo de armazenamento. Saliente-se que o padrão atual da Grohe, areia SP 45 e REC/A = 1,9% apresenta valores máximos entre 2,5 e 3,5 MPa para os dois

tipos de provetes testados, sendo que 3 MPa é o valor médio de resistência mecânica encontrado para este tipo de machos, sujeitos ao mesmo ensaio de flexão. [21,22].

Para a razão REC/A = 1,9% atualmente utilizada na Grohe, os melhores valores de resistência mecânica encontram-se para a areia SP 55. Esta é a areia que tem os grãos mais angulares (maior coeficiente de forma), responsáveis pela maior interligação entre os grãos. Reduzindo a razão REC/A, a resistência à flexão baixa um pouco mas continua a ser melhor nas areias SP 55 e H-S 00108 do que nas restantes.

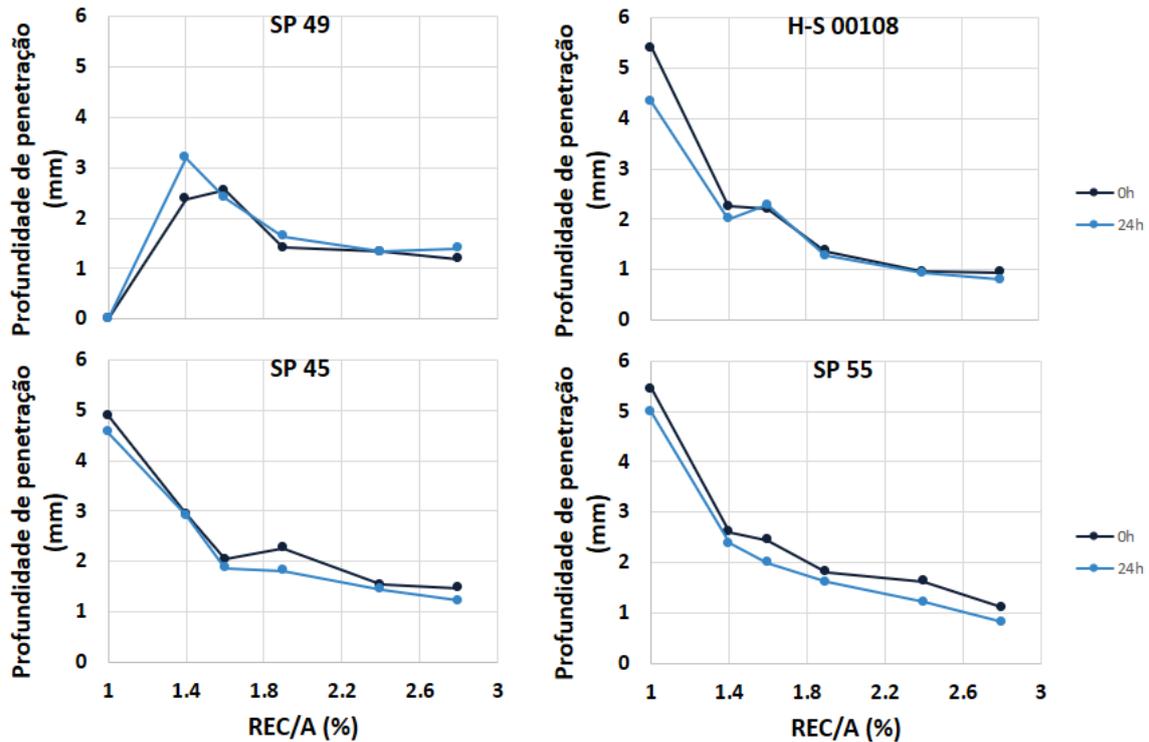


**Figura 39:** Resultados dos ensaios de resistência à flexão realizados na Fundipor.

Os valores de dureza são tanto maiores, quanto menor for a profundidade de penetração do indentador no macho. Pelos gráficos da Figura 40, verifica-se que não há diferenças substanciais entre provetes testados imediatamente a seguir à sua produção, ou após 24h, embora para estes lotes a dureza seja ligeiramente mais elevada. Observa-se um aumento abrupto (queda no valor da penetração) no valor da dureza desde a razão REC/A = 1% até 1,4%, aumentando depois mais lentamente com o aumento de REC/A até ao máximo testado de 2,8%. Em todos os casos a dureza aumenta com a quantidade de REC adicionada, como era de prever [23]. Saliente-se também que todas as areias de macho apresentam durezas superiores (valores menores de penetração) à da areia SP 45 para a razão REC/A = 1,9%, o padrão de produção atual da Grohe.

Utilizando esta como comparação, do ponto de vista de dureza, todas as areias com teores REC/A entre 1,4% e 1,9% cumpririam os requisitos atualmente impostos. Em particular e nesta faixa de teores de ligantes, as maiores durezas correspondem aos provetes feitos com H-S 00108 (para REC/A = 1,9% e 1,4%) e SP 45 (para 1,6%). Estas duas areias têm grãos mais arredondados e, conseqüentemente, uma maior espessura de camada de resina associada (1-1,24µm) que a areia SP 55 (0,92µm), pelo que há uma

distribuição mais homogênea do filme de ligante em redor dos grãos, permitindo uma compactação mais intensa (maior é o esforço de penetração do indentador). Pelo contrário a areia SP 49, apesar de ter grãos ainda mais arredondados (e uma espessura de camada de resina de  $2,09\mu\text{m}$ ), estes são de tamanho muito maior quando comparados com as restantes. Isto origina um mau acabamento superficial do provete, não permitindo que o durómetro seja utilizado de forma correta, o que resulta no valor nulo de profundidade de penetração indicado na Figura 40.

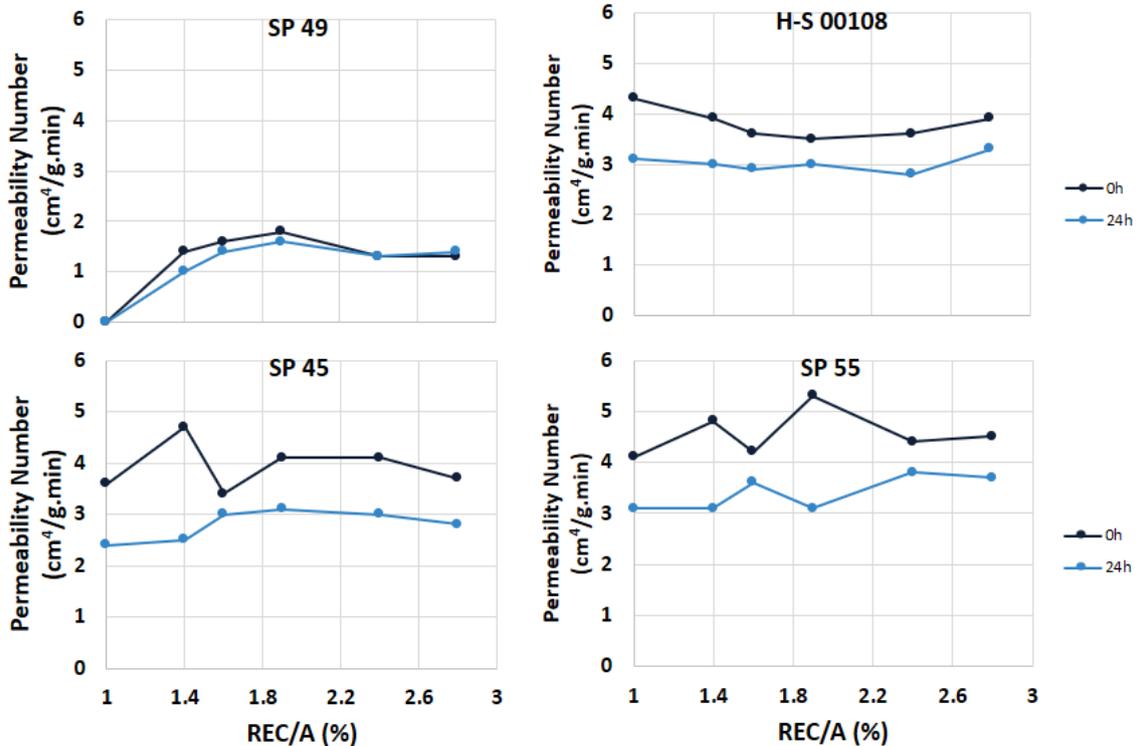


**Figura 40:** Resultados dos ensaios de dureza realizados na Fundipor.

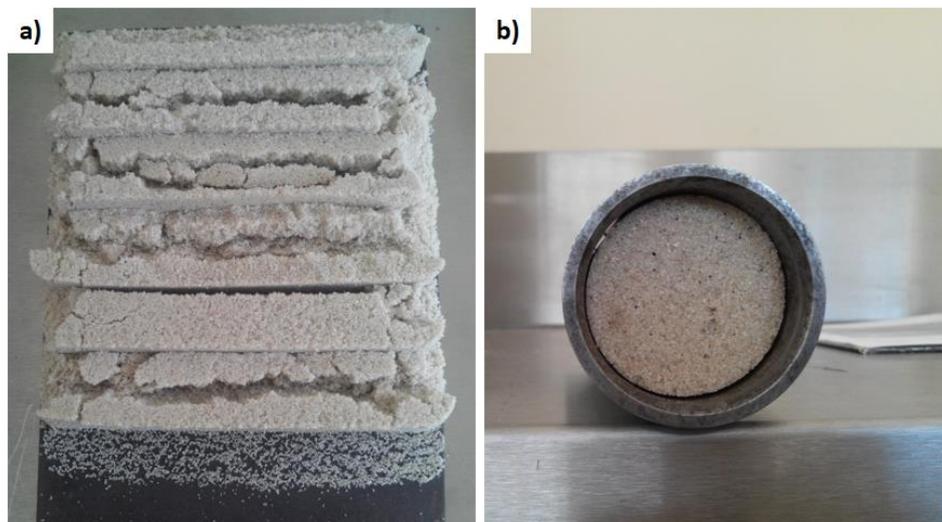
Nos ensaios de permeabilidade, Figura 41, é possível observar diferenças entre os lotes de provetes testados imediatamente após a sua preparação ou após 24h. A permeabilidade (PN) é sempre inferior neste último caso, embora para a areia SP 49 a diferença seja mínima. Alguns dos problemas encontrados na realização destes ensaios ocorreram na preparação dos provetes com areia SP 49, para baixas quantidades de resina. Como se pode ver pelas imagens da Figura 42, a maioria dos provetes para ensaio de flexão e dureza partiram. Nos provetes cilíndricos houve retração em relação ao diâmetro do molde, o que permitiu a passagem de ar pelas laterais (não sendo possível fazer a leitura de forma reprodutível no permeâmetro).

Utilizando a areia de macho atual da Grohe como comparação verifica-se que as areias SP 55 e H-S 00108 cumprem os valores de permeabilidade atuais na faixa de valores REC/A = 1,4 - 2,4%, como aliás acontece para a areia SP 45. A areia SP 49 apresenta valores de permeabilidade substancialmente mais baixos, muito provavelmente devido às dificuldades experimentais mencionadas. A permeabilidade com maior valor incidiu na areia SP 55. A areia SP 55, embora seja a mais fina de todas, é considerada uma areia de grão médio, ideal para se obter bons valores de

permeabilidade numa gama alargada de razões REC/A a iniciar em 1,4%. Isto justifica o facto encontrado de grãos de tamanho menor terem maior capacidade de empacotamento e, com isso, conduzirem a uma redução da permeabilidade. De um modo geral a quantidade de REC não exerce uma grande influência neste parâmetro, sendo mais crítico o tipo de areia utilizado e a sua distribuição de tamanhos [24].



**Figura 41:** Resultados dos ensaios de permeabilidade realizados na Fundipor.

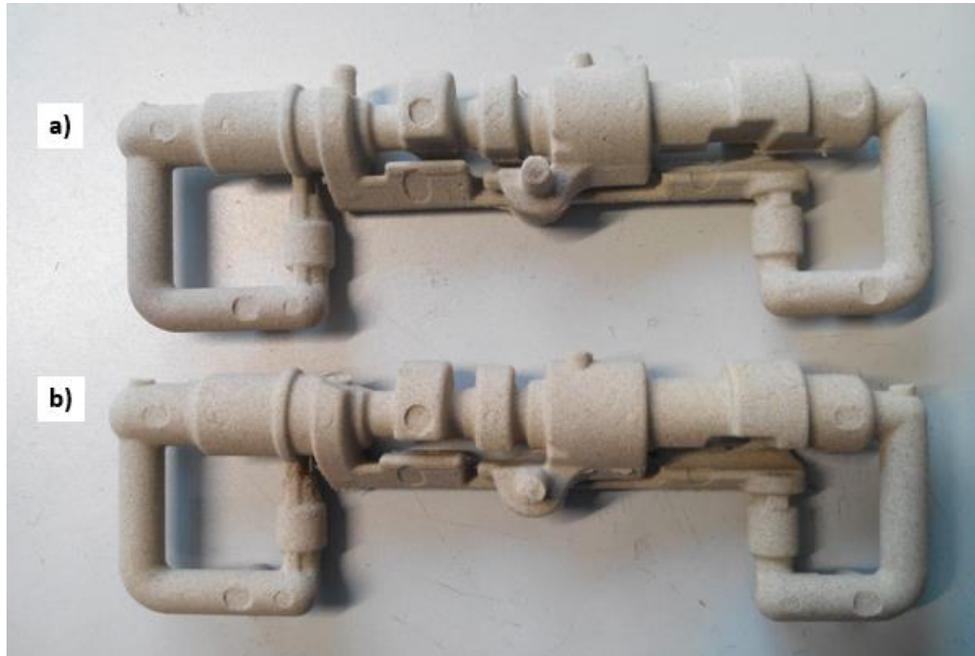


**Figura 42:** Problemas encontrados na preparação de provetes para ensaios de flexão e dureza (a) e permeabilidade (b), na utilização de areia SP 49.

#### 4.3. Ensaio industrial com a formulação seleccionada

Foram comparados dois machos iguais e produzidos sob as mesmas condições, utilizando a areia H-S 00108 e a areia utilizada até então pela Grohe, SP 45, com a razão

REC/A = 1,9%. Como se pode ver pela Figura 43, os machos são visualmente idênticos. Não foi necessária fazer qualquer alteração aos parâmetros utilizados, nem foram detetados defeitos nos machos ao longo da produção. Isto leva a crer que a qualidade dos machos se manteve a mesma.



**Figura 43:** Macho produzido com areia H-S 00108 (a) e areia SP 45 (b) sob as mesmas condições.

No entanto, ficou ainda por testar a redução da quantidade de ligantes na formulação utilizada. Pode-se prever que haja uma melhoria no processo de produção de machos, pois as características mecânicas e de permeabilidade são melhores com as areias H-S 00108 e SP 55 e em termos económicos há potencial para uma redução de mais de 20% da resina utilizada, para valores REC/A = 1,4 - 1,6%.

## CAPÍTULO V

### OUTROS TRABALHOS REALIZADOS NO ESTÁGIO CURRICULAR

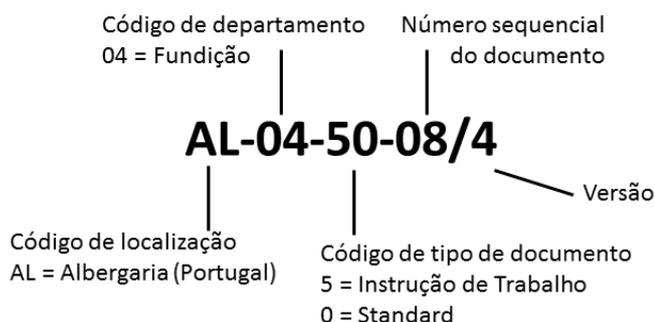
Durante o período de estágio foi realizado um conjunto de trabalhos que contribuíram para uma melhor organização do departamento de Fundição:

#### 5.1. Atualização de Instruções de Trabalho

As Instruções de Trabalho (IT's) formam um conjunto de documentos que visa descrever a forma a proceder numa determinada operação. A estrutura das Instruções de Trabalho é padronizada por todo o grupo Grohe e inclui os pontos:

1. Objetivo
2. Campo de aplicação
3. Responsabilidades
4. Execução
5. Segurança e saúde/ Ambiente
6. Documentos associados e respetivo tempo de arquivo.

A numeração de cada documento é feita da seguinte forma (Figura 44):



**Figura 44:** Exemplo da numeração de uma IT relativa ao departamento de Fundição.

É importante que estes documentos sejam atualizados sempre que o seu conteúdo seja modificado e que estejam disponíveis para consulta na Gestão de Documentos Online da empresa, bem como em papel junto à respetiva área de trabalho. As revisões efetuadas das Instruções de Trabalho relativas à secção da Macharia foram posteriormente verificadas e aprovadas. Estas atualizações incluem a descrição das operações básicas de cada tipo de máquina de machos, o que até então não existia.

#### 5.2. Atualização de documentos necessários à produção na Macharia

Existe um conjunto de documentos que auxiliam a produção na Macharia e que é atualizado sempre que haja modificações num determinado produto.

Sempre que há uma troca de produto, para além de ser trocada a caixa de machos, é necessário que a máquina seja configurada para os parâmetros de trabalho desejados. Nas máquinas de machos automáticas V&S, os parâmetros de cada produto são gravados na memória da máquina com um código, pelo que apenas é necessário introduzir o número de memória correspondente a esse produto. Os documentos relativos à memória de cada máquina de machos foram todos eles atualizados. Nas máquinas de machos não automáticas, o afinador segue os passos descritos na Instrução de Trabalho relativa à configuração das máquinas (AL-04-50-02/12).

Em qualquer dos casos a máquina é sempre preparada de acordo com os parâmetros adequados a cada produto, que inclui a máquina onde é feita a produção, o tipo de areia utilizado, a temperatura da caixa de machos da parte fixa e parte móvel, o tempo de injeção e tempo de endurecimento da mistura, a pressão que é aplicada e o tipo de mistura (proporção parte líquida / parte sólida). Na Figura 45 encontra-se um exemplo de uma folha de parâmetros.

Para auxiliar o trabalho de cada operadora na Macharia, está disponível junto a cada máquina de machos a respetiva folha de rebarbagem, que permite perceber visualmente como o macho se deve apresentar antes e depois de ser rebarbado. Além disso, têm a informação do tipo de acondicionamento que deve ser feito: tipo de caixa utilizada, número de machos por caixa e por palete. Na Figura 46 encontra-se um exemplo de uma de rebarbagem e acondicionamento. Além disso, em alguns casos, está também disponível junto à máquina uma ficha de alerta de defeitos que visa chamar a especial atenção para zonas críticas do macho. Estas regiões, que poderão dar origem a uma peça sucatada caso a rebarbagem seja mal feita, são devidamente assinaladas.

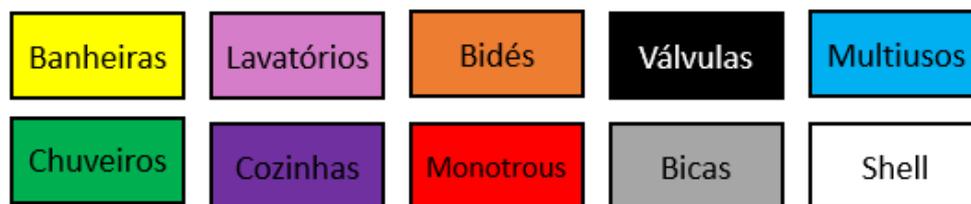
		<b>MACHARIA</b> Core shooting <b>FOLHA DE PARÂMETROS DE MÁQUINA</b> Parameters data-sheet	
<b>405 013 051 - Banheira OHM</b> OHM Bath			
Máquina / Machine	<b>V&amp;S</b>		
Areia Machos / Sand type	<b>SP 45</b>		
Caixa / Core box	Fixa / Fixed	Móvel / Moving	
Temperatura /Temperature (°C)	<b>230 ± 20</b>	<b>225 ± 20</b>	
Tempo de Endurecimento/Cooking time (dseg)	<b>210 ± 20</b>		
Tempo de Injeção/ Injection time (dseg)	<b>30</b>		
Pressão/Pressure (bar)	<b>min. 3</b>		
Mistura da Areia/Sand mixture	<b>Grande Médio</b>		

**Figura 45:** Folha de parâmetros do produto 405 013 051. Grande Médio – designação da mistura de areia de macho utilizada pela Grohe, correspondente a REC/A=1,9%.

**Código: 405 013 051 Nome: Banheira OHM**


**Figura 46:** Folha de rebarbagem e acondicionamento dos machos do produto 405 013 051.

Por forma a se agrupar de forma organizada todos os documentos que foram atualizados, foi criado um novo expositor para os produtos da Macharia, os quais são agrupados em oito categorias de produto, diferenciadas por cores, Figura 47:



**Figura 47:** Código de cores que diferenciam as categorias de produtos na Fundição.

As folhas foram organizadas por família de produtos (por cores) e por ordem crescente de código de produto. Para isso, foram criados separadores como o exemplificado na Figura 48 abaixo.



**Figura 48:** Exemplo de um separador de folhas, do produto 405 013 051.

O expositor resultante encontra-se agora na zona de produção da Macharia e está disponível para que cada afinador possa fazer a troca de documentos a cada troca de produto, Figura 49.



**Figura 49:** Expositor atual dos produtos da Macharia.

### 5.3. Gestão de ferramentas

A integridade das caixas de machos é fundamental para o bom acabamento dos machos produzidos e, por isso, no fim de cada produção, o afinador retira a caixa de machos e transporta-a para a zona de inspeção. Nesta zona é feito o preenchimento de um *check-list* e posteriormente é decidido se a ferramenta se encontra em boas

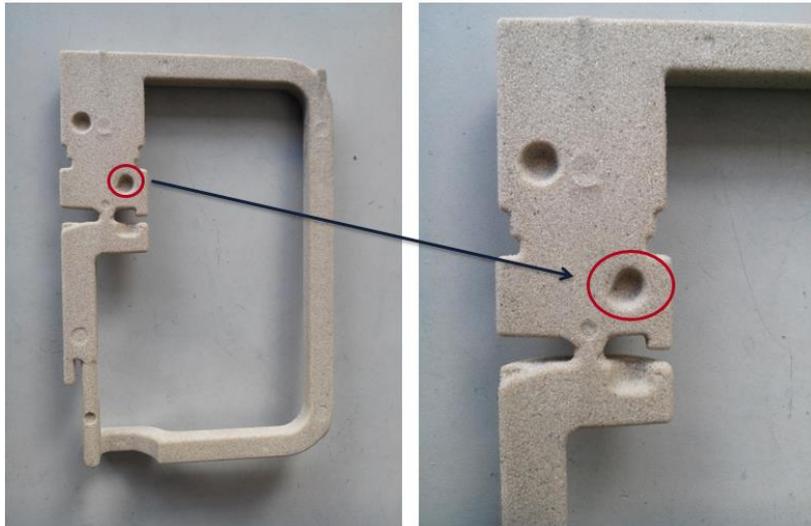
condições (e colocada na respetiva estante) ou se necessita de reparação. A reparação pode ser feita na Macharia ou requerida ao departamento de auxílio Ferramentaria.

Ao longo do estágio curricular, foram analisadas várias situações onde se pode ver a importância da integridade das ferramentas: a título de exemplo, na semana 9 do presente ano, foi detetado o defeito representado nos círculos a vermelho na Figura 50, no produto 405 822 029 (Cozinha *Eurosmart/Shut-off*).



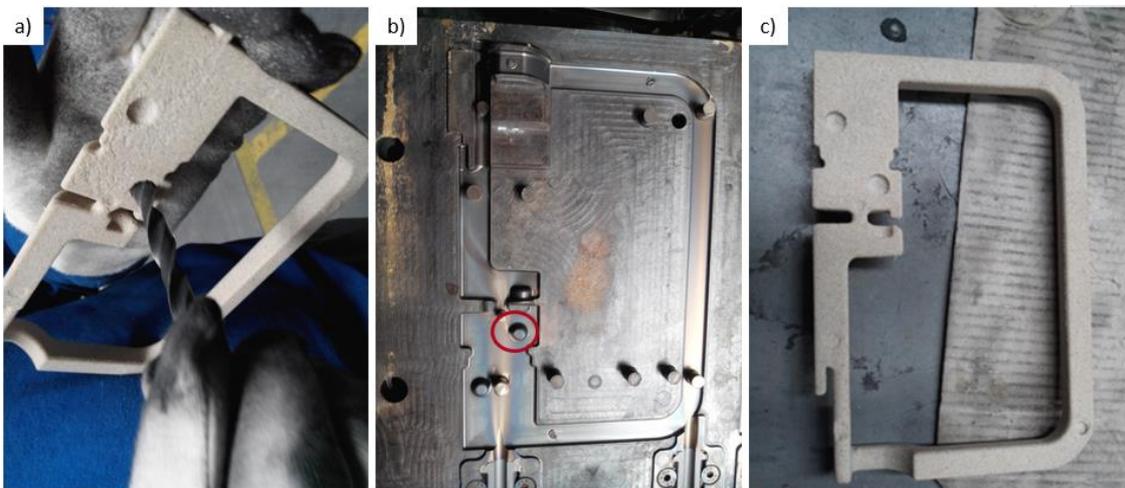
**Figura 50:** Canal parcialmente entupido, detetado no produto 405 822 029.

Após observação do respetivo macho, concluiu-se que o canal entupido (defeito 50, segundo os códigos de tipos de defeitos em vigor no grupo Grohe) teve origem no excesso de areia de macho na zona da cavidade circular (Figura 51). Este excesso de areia leva a que o macho não fique corretamente fixado à coquilha e se desloque/quebre.



**Figura 51:** Excesso de areia de macho na zona da cavidade circular do macho 405 822 052.

Para uma rápida recuperação dos machos que já estavam produzidos foi feita a eliminação manual do excesso de areia, com auxílio de uma broca de ponta redonda como mostra a Figura 52 a). Como ação de correção, a caixa de machos foi reparada no departamento auxiliar de Ferramentaria com especial atenção no desgaste do pino em questão (Figura 52 b)). Finalizada a correção, o macho 405 822 052 ficou a operar corretamente, como se vê na Figura 52 c).



**Figura 52:** Recuperação e correção dos machos 405 822 052.

Para uma mais fácil localização das ferramentas foi realizado um inventário das caixas de machos existentes na Macharia, indicando em que estante se encontra, a sua posição na estante, bem como a que código de macho corresponde essa ferramenta e se possui mandril ou não, como se pode ver no exemplo da Figura 53. No caso de existir mais de uma caixa para o mesmo produto, estas são distinguidas por ordem alfabética.

O mesmo foi feito para a estante de mandris, e para as caixas que se encontravam na Ferramentaria.



**Figura 53:** Exemplo de uma etiqueta identificativa da caixa de machos do produto 406 013 051.

Para que as ferramentas sejam mais fáceis de localizar, estas são identificadas por etiquetas que incluem o código, designação e fotografia do macho, bem como a indicação se é utilizado mandril ou não, Figura 54. As etiquetas de caixas de machos e de mandris foram todas elas atualizadas, mantendo as estantes bem organizadas como se pode ver nas Figuras 55 e 56.



**Figura 54:** Etiqueta identificativa do mandril do produto 406 013 051.



**Figura 55:** Identificação da estante C de caixas de machos na Macharia.



**Figura 56:** Identificação das prateleiras com mandris na Macharia.

Além disso, foi criado um novo quadro com cartões identificativos de cada caixa de machos, o que facilita a sua localização quer seja na estante, na máquina, na Ferramentaria ou na bancada de inspeção (*check-list*). O sistema de identificação por cartões já tinha sido anteriormente implementado, mas tanto o quadro como os cartões estavam desatualizados, pelo que não estava a ser usado. Esta atualização começou por ser feita tirando fotografias a todas as caixas de machos, para serem incluídas nos cartões. Cada cartão identificativo, como mostra na Figura 57, inclui a fotografia da ferramenta e do respetivo macho, a referência da ferramenta e do produto, o número de figuras e um espaço para ser adicionada a sua posição na estante.

			
<b>Letra</b> <b>A</b>			
<b>Macho</b> <b>04 676 351</b>			
<b>Ref. Ferramentaria</b>	<b>Nº Figuras</b>	<b>Posição Estante</b>	
<b>803 639 00</b>	<b>3</b>		

**Figura 57:** Exemplo de cartão identificativo da caixa de machos do produto 04 676 351.

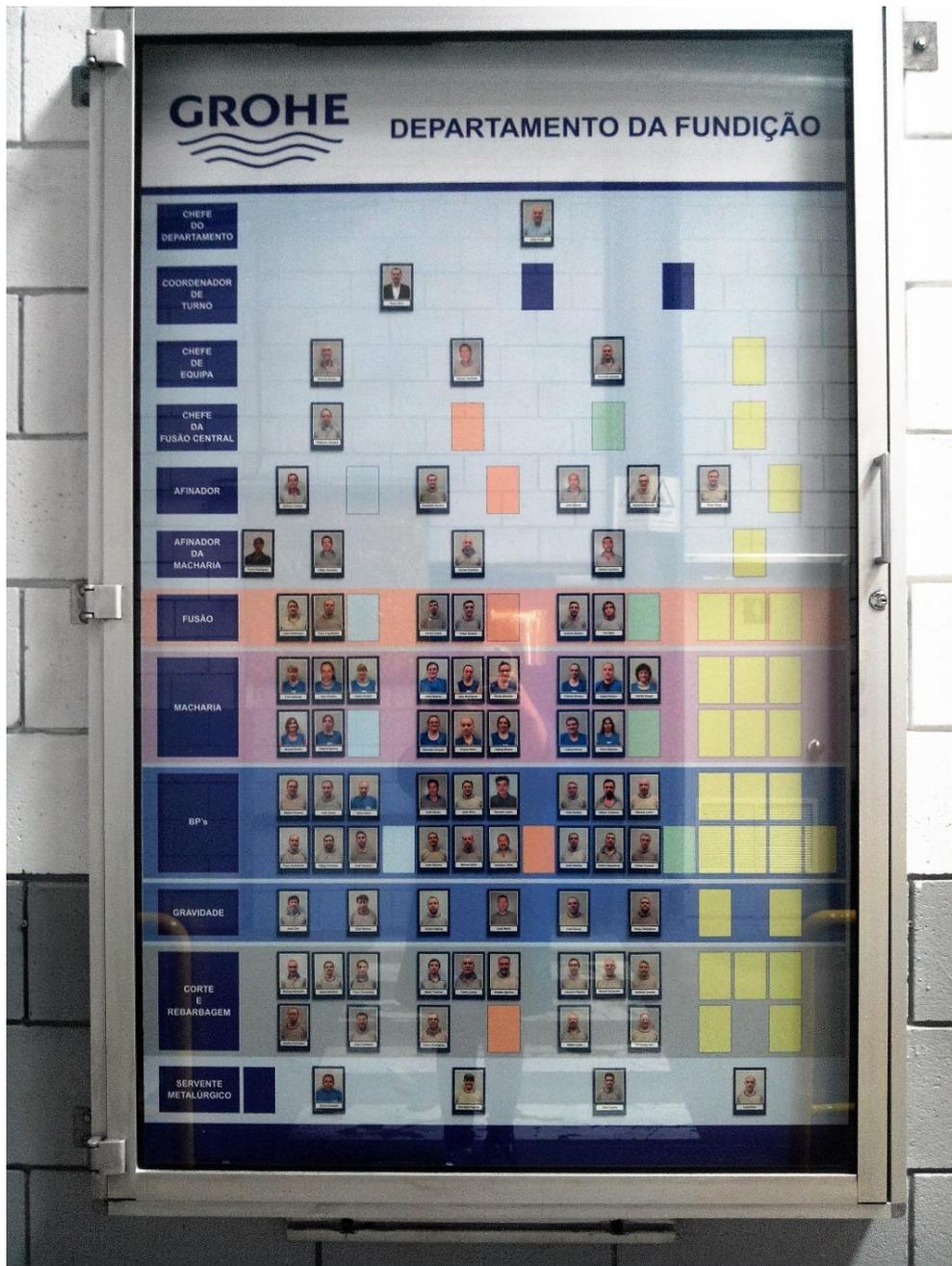
Este sistema permite garantir que apenas ferramentas que estão em bom estado são utilizadas na produção. O resultado final do novo quadro concebido, disposto na Macharia, pode ser visto na Figura 58 abaixo.



**Figura 58:** Novo quadro criado para a gestão das caixas de macho.

#### 5.4. Distribuição dos colaboradores da Fundição

À entrada do departamento da Fundição encontra-se um quadro hierárquico com a distribuição dos colaboradores por áreas de trabalho: Chefe do departamento; Coordenadores de turno; Chefes de equipa; Chefe da fusão central; Afinadores; Afinadores da Macharia; Fusão; Macharia; BPs; Gravidade; Corte e Rebarbagem e Serventes metalúrgicos. Na necessidade de se atualizar este quadro foram criados cartões identificativos das 80 pessoas que trabalham neste departamento, que incluem o nome e fotografia de cada pessoa. O quadro final está apresentado na Figura 59.



**Figura 59:** Quadro de distribuição dos colaboradores, localizado à entrada do departamento.



## CAPÍTULO VI

### CONCLUSÕES

A realização deste trabalho permitiu concluir que o processo utilizado na Grohe para a produção de machos era um processo controlado. A temperatura das caixas de machos, bem como as matérias-primas (qualitativa e quantitativamente) são as mais adequadas. Apesar desta situação, havia um interesse em melhorar a qualidade dos machos produzidos e do processo de produção destes.

Na tentativa de se caracterizar as propriedades mecânicas dos machos produzidos, foram realizados vários ensaios de flexão e de compressão que mostraram que a preparação dos provetes não era reproduzível. Numa segunda parte do trabalho foram definidas diferentes formulações, fazendo variar o tipo de areia utilizada e a razão REC/A. Isto permitiu concluir que a areia SP 55 é a que reúne melhores condições gerais para este processo, já que apresentou para:

- REC/A=1,9%:
  - ✓ Melhor resistência à flexão (0h e 24h)
  - ✓ Melhores permeabilidades (0h e 24h)
  
- REC/A=1,6%:
  - ✓ Melhor resistência à flexão (24h)
  - ✓ Melhores permeabilidades (0h e 24h)
  
- REC/A=1,4%:
  - ✓ Melhor resistência à flexão (24h)
  - ✓ Melhores permeabilidades (0h e 24h)

Para percentagens de REC/A < 1,9%, e cumprindo o propósito de reduzir a quantidade de matérias-primas utilizadas, a areia H-S 00108 também se torna uma boa alternativa por ter comportamentos muito semelhantes. No ensaio industrial realizado com areia H-S 00108 não foram detetados problemas com origem nesses machos, pelo que pode assumir-se que com a areia SP 55 será o mesmo caso. Entre estas duas areias, não havendo diferenças significativas, pode escolher-se aquela que for mais barata.

Fazendo uma análise de consumos tendo em conta a média referente ao ano de 2015, uma reformulação da carga de REC/A = 1,9 % (anterior) para 1,5 % (valor intermédio entre 1,4 e 1,6 %, sem se trabalhar no limite), com o uso de areia SP 55 permite uma poupança de:

- ✓ 22,5 % em Resina
- ✓ 21,8 % em Endurecedor
- ✓ 25 % em Conservante

**Tabela 8:** Médias referentes a 2015 do consumo de matérias-primas.

Material	Consumo Anual
<b>50499000 - Areia</b>	1 545 060 kg
<b>53328000 - Resina</b>	18 257 kg
<b>50122000 - Endurecedor</b>	4 800 kg
<b>50129000 – Conservante</b>	3 000 kg

Em termos de redução de custos, estas poupanças representam:

- 4 108 kg Resina/ano → 10 065 €
  - 1 044 kg Endurecedor/ano → 908 €
  - 750 kg Conservante/ano → 5 114 €
- Total = 16 086 € / ano**

Pode desta forma haver uma redução significativa das matérias-primas utilizadas face ao consumo atual, sem comprometer o desempenho dos machos produzidos.

Este estágio curricular foi pessoalmente um ótimo primeiro contacto com o mundo da indústria, onde a Engenharia de Materiais está sempre presente. A constante resolução de problemas, a gestão de pessoas, gestão de processos e de recursos, fazem sempre parte do dia-a-dia dos profissionais desta área e tornaram-me estes meses de aprendizagem ainda mais desafiantes.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Sítio da Grohe Portugal [em linha]. Disponível em: <http://www.grohe.com/pt/>.
- [2] Sítio da Engexpor [em linha]. Disponível em: <http://www.engexpor.com/en>.
- [3] Sítio da Fundipor [em linha]. Disponível em: <http://fundipor.pt/>.
- [4] Sítio da Hüetteness-Albertus [em linha]. Disponível em: <http://www.huettenes-albertus.com/en/>.
- [5] AFS – American Foundry Society, *Chemically bonded cores & molds – an operator’s manual for the use of chemically bonded, self-setting sand mixtures*, 2000
- [6] Moreira, M. T. P. O. T., *Contaminação ambiental associada às areias residuais de fundição*, Dissertação de candidatura ao grau de Doutor em Engenharia Química apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004.
- [7] Castro, F. P., Junqueira, J.M., *Latões para fundição*, CETEM, Editora do Minho, S.A., 1996.
- [8] Dias, M. F. M., *Diagnóstico e melhoria do fabrico de machos pelo processo de caixa quente*, Dissertação de candidatura ao grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [9] ASM Metals Handbook, *Casting*, Volume 15, 1988.
- [10] Beeley, P., *Foundry Technology*, Butterworth-Heinemann, 2001.
- [11] Hoyt, D., *Back to the basics of silica sand*, Modern Casting 24-27, 1987.
- [12] Silva, F. J. C., *Caracterização de resinas de ureia-formaldeído*, projeto de desenvolvimento em ambiente empresarial, Mestrado Integrado em Engenharia Química da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [13] Sítio da Retsch [em linha]. Disponível em: <http://www.retsch.com/>.
- [14] Sítio da Fluke [em linha]. Disponível em: <http://www.fluke.com/>.
- [15] Verona, M. N., *Materiais cerâmicos: propriedades mecânicas*, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- [16] Turkeli, A., *Sand, sand additives, sand properties and sand reclamation*, Foundry Technology.
- [17] American Foundry Society, *Mold and core test Handbook*, 2015.
- [18] Mariotto, C. L., *Areias ligadas quimicamente*.
- [19] Ridsdale & Co., Ltd., *Foundry sand testing equipment operating instructions (AFS)*, England.

- [20] Seidu, S., Kutelu, B., *Effects of additives on some selected properties of base sand*, Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 2, 507-512, 2014.
- [21] Stauder, B.J., Kerber, H., Schumacher, P., *Foundry sand core property assessment by 3-point bending test evaluation*, Journal of Materials Processing Technology, 237, pp. 188–196, 2016.
- [22] Nwaogu, U., Tiedje, N. S., *Mechanical properties of chemically bonded sand core materials dipped in sol–gel coating impregnated with filter dust: novel approach to improve casting quality*, International Journal of Cast Metals Research, pp. 307-317, 2012.
- [23] Khandelwal, H., Ravi, B., *Effect of binder composition on the shrinkage of chemically bonded sand cores*, Materials and Manufacturing Processes, pp. 1465-1470, 2015.
- [24] González, R., Colás, R., Velasco, A., Valtierra, S., *Characteristics of phenolic-urethane cold box sand cores for aluminum casting*, International Journal of Metalcasting, pp. 41-48, 2011.