



**Marco André Lages  
Soares**

**ESTUDO DO DEFEITO DE LIGAÇÃO DA ASA EM  
LOUÇA DE PORCELANA**



**Marco André Lages  
Soares**

**ESTUDO DO DEFEITO DE LIGAÇÃO DA ASA EM  
LOUÇA DE PORCELANA**

Relatório de estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais, realizada sob a orientação científica do Dr. Pedro Mantas, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro

## **O júri**

Presidente

**Profª Drª Maria Margarida Tavares Lopes de Almeida**  
Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade de Aveiro

Vogais

**Drª Marisa Célia da Silva Resende da Costa**  
Diretora de Qualidade, Grestel - Produtos Cerâmicos S.A

**Prof. Dr. Pedro Manuel Lima de Quintanilha Mantas**  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade de Aveiro

## **agradecimentos**

Aos meus pais por todo o apoio incondicional. Ao meu orientador, Dr. Pedro Mantas, pelo tempo dedicado, ajuda, e orientação científica durante o trabalho, e à Eng<sup>a</sup> Carla Rodrigues, orientadora na empresa Vista Alegre, pelo acolhimento e orientação fornecidos e por todo o tempo e atenção dedicados durante o estágio.

Aos meus amigos mais próximos que sempre me acompanharam.

**palavras-chave**

porcelana, cerâmicos tradicionais, processamento cerâmico, louça de mesa, contramoldagem, enchimento, colagem

**resumo**

Este relatório descreve o trabalho realizado durante um estágio na empresa Vista Alegre Atlantis. Neste estágio, propunha-se diminuir ou eliminar um problema, um defeito observado como a asa descolada numa chávena de porcelana.

Através do estudo das fases do processo de fabrico das chávenas, que se focou na conformação das asas e na secagem, concluiu-se que se tratava de um problema na conformação, relacionado com as propriedades da pasta utilizada para a conformação, recorrendo-se a uma pasta de porcelana com propriedades diferentes.

Neste trabalho é apresentado o problema em estudo, o material (a porcelana), incluindo as suas propriedades, as matérias-primas e os processos utilizados para produzir as peças estudadas. Apresentam-se os procedimentos usados para estudar o material e o problema, os resultados obtidos e as conclusões tiradas da discussão dos dados e observações. Adicionalmente, é apresentado trabalho relevante efetuado durante o estágio, em especial aquele relacionado com as chávenas de porcelana.

**keywords**

porcelain, traditional ceramics, ceramic processing, tableware, jiggering, slip casting, adhesion

**abstract**

This report describes the work carried on during an internship at Vista Alegre Atlantis. In this internship, one of the propositions was solving a problem, a defect observed as the disjointed handle of a porcelain cup.

By studying the phases of the manufacturing process, with emphasis on slip casting and drying, the conclusion was that this issue had origin in inadequate properties of the porcelain paste used in the casting process. The reduction of this defect became possible by replacing this paste with a different paste of the same porcelain, which had different properties.

This document starts by introducing the problem, the material, including its properties and raw materials, as well as the manufacturing processes that give form to the final product. It is further described the procedure that was employed to study the material and the defect, and the obtained results and conclusions taken from the discussion of the data and observations. Additionally, it is described some relevant work carried on during the internship, mostly related with the porcelain cups.

## ÍNDICE

Introdução .....	1
1. Apresentação do trabalho .....	1
1.1. Breve história da Vista Alegre Atlantis .....	2
2. Materiais .....	4
2.1. A porcelana: definição e propriedades .....	4
2.1.1. Pasta de porcelana.....	6
2.1.2. Matérias-primas .....	7
2.2. Vidrado .....	11
2.3. Cola.....	12
3. Processos.....	14
3.1. Sequência do processo produtivo das chávenas de porcelana .....	14
3.2. Contramoldagem por cabeça rotativa .....	16
3.3. Enchimento .....	19
3.4. Secagem .....	22
3.5. Cozedura .....	26
4. Abordagem ao problema.....	28
Integração na empresa.....	30
Procedimento experimental.....	32
Resultados e discussão .....	40
1. Reologia.....	40
2. Geometria .....	41
3. Humidade.....	44
3.1. Saturação dos moldes de gesso .....	44
3.2. Influência do tempo de armazenamento de asas no conteúdo de humidade ....	46
3.3. Secagem da pasta: curva de secagem. ....	48
4. Conformação.....	51
4.1. Velocidade de formação de parede.....	51
4.2. Enchimento de asas usando a pasta do enchimento de alta pressão. ....	52
4.4. Enchimento de asas por alta pressão .....	59
Conclusões .....	65

## Lista de figuras

Figura 1 - Chávenas com descolamento parcial da asa.	1
Figura 2 - Chávena com descolamento total da asa.	2
Figura 3 - Aspeto superficial e translucidez de um artigo de porcelana.	5
Figura 4 - Fratura de uma amostra de porcelana.	5
Figura 5 - Porção do diagrama de fases do sistema $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$ representando diferentes tipos de porcelana.	6
Figura 6 - Caulino.	8
Figura 7 - Esquemática da estrutura da caulinite.	8
Figura 8 - Micrografia de cristais de caulinite.	9
Figura 9 - Tetraedro de sílica.	9
Figura 10 - Estrutura do quartzo.	10
Figura 11 - Estrutura de feldspato.	10
Figura 12 - Pormenor da asa e corpo da chávena.	12
Figura 13 - Diagrama do processo de produção de chávenas	14
Figura 14 - Chávenas após a conformação colocadas em bases, prontas para chacoagem.	15
Figura 15 - Asas prontas a serem unidas com o corpo da chávena.	15
Figura 16 - Asa colada ao corpo.	16
Figura 17 - Extrusora.	16
Figura 18 - Corte da porção de pasta necessária para a contramoldagem.	17
Figura 19 - Cabeça rotativa e molde de gesso, durante descida (esquerda) e após terminada a peça (direita).	17
Figura 20 - Expulsão do excesso de material durante a ação rotativa da máquina <i>roller</i> (tracejado).	18
Figura 21 - Moldes de gesso na câmara de secagem da máquina <i>roller</i> .	18
Figura 22 - Acabamento do corpo da chávena.	18
Figura 23 - Corte de uma peça em verde conformada por contramoldagem.	19
Figura 24 - Pasta PT asas.	19
Figura 25 - Moldes de gesso para as asas.	20
Figura 26 - Esquemática do comportamento da suspensão no molde.	21
Figura 27 - Peças conformadas por enchimento por gravidade, evidenciando a orientação preferencial das partículas argilosas.	21
Figura 28 - Chávenas em transportadores do equipamento de secagem.	23
Figura 29 - Curva de Bigot típica de uma peça de material argiloso	24
Figura 30 - Curva de secagem – massa da peça em função do tempo.	25
Figura 31 - Orientação de partículas argilosas e direções de retração.	25
Figura 32 - Disposição dos fornos e secção de vidragem.	26
Figura 33 - Boca de saída do Forno 2.	27
Figura 34 - Vidragem mecanizada.	28
Figura 35 - Diagrama causa-efeito do caso de estudo.	29
Figura 36 - Área de colagem da asa, mostrando fissuras.	29
Figura 37 - Ambiente de utilização do SAP.	31
Figura 38 - Molde do tipo tablete apresentando alguma humidade absorvida.	32
Figura 39 - Chávena com várias asas coladas	33
Figura 40 - Chávenas com asas coladas individualmente.	33
Figura 41 - Provete de pasta de porcelana para ensaio de Bigot.	34
Figura 42 - Exsicador	34



Figura 43 - Viscosímetro Gallenkamp	35
Figura 44 - Moldes utilizados no ensaio de velocidade de formação de parede	36
Figura 45 - Chávenas em disposição “boca-a-boca”	37
Figura 46 - Modelos do corpo das chávenas em gesso.	37
Figura 47 - Dispositivo de corte do excesso de material das asas	38
Figura 48 - Chávenas chacotadas com asas conformadas por alta pressão.	39
Figura 49 - Curva de desfloculação da pasta de contramoldagem.	40
Figura 50 - Evolução da viscosidade da barbotina ao longo de vários dias.	41
Figura 51 - Chávena com asa na posição correta (esquerda) e chávena com asa caída depois da cozedura (direita).	42
Figura 52 - Asa caída, pormenor da zona de colagem.	43
Figura 53 - Defeitos causados por corte inadequado na fase de acabamento da asa.	43
Figura 54 - Lâmina de corte de asas, posição em baixo. Parafusos de ajuste assinalados.	44
Figura 55 - Evolução da humidade contida nos moldes de gesso após os enchimentos.	45
Figura 56 - Evolução da humidade absorvida pelo molde.	45
Figura 57 - Asas de diferentes idades (2 dias; 1 dia; dia da colagem)	47
Figura 58 - Chávena usada no ensaio de tempo de armazenamento.	47
Figura 59 - Armário de armazenamento das asas. São visíveis os tabuleiros com água.	48
Figura 60 - Curvas de Bigot das pastas de alta pressão e de contramoldagem.	49
Figura 61 - Curvas de Bigot: marcação dos pontos de igual retração.	51
Figura 62 - Representação gráfica de velocidade de formação de parede de duas pastas: alta pressão e contramoldagem diluída.	52
Figura 63 - Asa seca (pasta PT), evidenciando as fissuras originadas no enchimento.	53
Figura 64 - Área de colagem de asa chacotada (pasta PT).	53
Figura 65 - Área de colagem de asa após cozedura (pasta PT).	54
Figura 66 - Aspetto de asas conformada com pasta PC. Note-se a ausência ou baixa incidência de fissuras.	54
Figura 67 - Afastamento do entre o corpo e a curvatura da área de colagem da asa.	55
Figura 68 - Distribuição granulométrica da pasta PT.	56
Figura 69 - Distribuição granulométrica da pasta PC.	56
Figura 70 - Asas de enchimento manual com pasta PC, verificando-se a imperfeições de corte.	57
Figura 71 - Aspetto de zona de colagem da asa. Esquerda: pasta PT; direita, 60% olaria + 40% PT.	59
Figura 72 - Aspetto da asa. Esquerda: pasta PT; direita, direita, 60% olaria + 40% PT.	59
Figura 73 - Diffractograma de raios X de porcelana da Vista Alegre.	60
Figura 74 - Diffractograma de raios X de porcelana de origem externa.	61
Figura 75 - Chávenas com asas conformadas por alta pressão.	62
Figura 76 - Corte transversal de uma chávena na zona da asa. Observe-se a fina camada de cola entre o corpo e a asa. Ampliação de 12,5x.	62
Figura 77 - Asa conformada por alta pressão (esquerda) e asa conformada por enchimento (direita) Ampliação de 35x.	63
Figura 78 - Asa de enchimento tradicional e asa de enchimento por alta pressão. Verifica-se a ausência de fissuras na asa conformada por alta pressão	63

## Lista de tabelas

Tabela 1 - Composição da pasta de porcelana usada pela Vista Alegre (% ponderais).	7
Tabela 2 - Composição química (percentagem em peso) da pasta de porcelana.	7
Tabela 3 - Matérias primas que constituem o vidrado (% ponderais).	11
Tabela 4 - Constituição da cola rápida	12
Tabela 5 - Misturas de pasta preparadas	38
Tabela 6 - Composição química das pastas PT e PC.	55
Tabela 7 - Comparação de porção de defeitos com diferentes misturas de pasta.	58
Tabela 8 - Valores de absorção de água das porcelanas.	64

# Introdução

## 1. Apresentação do trabalho

Este trabalho foi realizado, sob a forma de estágio curricular, na empresa Vista Alegre Atlantis S.A., sediada no lugar da Vista Alegre, no concelho de Ílhavo. Nesta unidade industrial é levada a cabo a produção de artigos em porcelana: louça de mesa (*tableware*) e artigos decorativos.

O objeto de estudo deste trabalho é uma chávena em porcelana, que é formada por dois componentes produzidos em separado, o corpo e a asa. Uma vez que os componentes têm que ser conformados usando processos distintos, é necessária a sua união para formar a peça final. No controlo de qualidade efetuado após a cozedura final, é observado um defeito na união entre a asa e o corpo, existindo descolamento da asa do corpo da chávena, tal como apresentado na Figura 1, em que se observam exemplos de descolamento parcial, e na Figura 2, em que se observa um descolamento total da asa.



Figura 1 - Chávenas com descolamento parcial da asa.



Figura 2 - Chávena com descolamento total da asa.

A ocorrência deste defeito resulta em custos de não-qualidade, pois as unidades não conformes necessitam de uma operação de retoque, que envolve uma cozedura adicional, e quando não é possível o retoque, estas unidades são rejeitadas.

Os objetivos propostos centram-se em diminuir ou eliminar a ocorrência deste defeito, cuja incidência foi de 1,4 % em absoluto no ano de 2014, o que na totalidade da produção, representa um valor de perdas algo considerável em termos de custos de não-qualidade do processo, seja pelos custos de reprocessamento (o retoque do defeito) ou pela perda total da peça, não sendo possível reutilizar a peça no processo produtivo, além de produzir resíduos sólidos, cuja eliminação também acarreta custos.

Na abordagem ao problema, foi necessária a caracterização dos materiais que constituem o produto em análise, a pasta de porcelana e a cola que assegura a união dos dois componentes da peça. Procurou-se compreender propriedades fundamentais e a sua influência no produto final, como a reologia da pasta e composição da cola. O estudo dos parâmetros e variáveis de cada passo do processo de fabrico afigurou-se como uma parte fundamental deste trabalho, para encontrar as causas mais prováveis do defeito.

### **1.1. Breve história da Vista Alegre Atlantis**

A Vista Alegre foi fundada em 1824 por José Ferreira Pinto Basto, sendo instalada na sua propriedade da Quinta de Ermida, junto à Ria de Aveiro, mantendo as instalações atuais nos terrenos adjacentes. Foi a primeira unidade industrial em Portugal a dedicar-se à produção de porcelana. Durante o restante século XIX, a empresa desenvolveu-se, adaptando as tecnologias da época, produzindo também vidro em simultâneo com a porcelana por algumas décadas.

No final do século XIX e no início do século XX, sofreu um período menos positivo, consequência da instabilidade política e social do país na época, revitalizando-se na década de 1920. Registou um grande crescimento durante o restante século XX, fruto do desenvolvimento tecnológico, adaptação ao mercado, expandindo-se para os mercados

internacionais e tornando-se um dos nomes mais conhecidos do sector. Em 1964, já com uma história e tradição consideráveis, foi criado o Museu da Vista Alegre.

Em 1997, a Vista Alegre fundiu-se com outro grupo de produtos cerâmicos, o grupo Cerexport, o que resultou num crescimento acrescido, cimentando a posição nos mercados internacionais. Em 2001, a fusão com o grupo Atlantis tornou-a no maior grupo nacional de produção de louça, passando a designar-se por Grupo Vista Alegre Atlantis, expandindo-se para o sector do vidro, de onde estava ausente há mais de um século. A unidade-sede é habitualmente referida como Fábrica de Porcelana da Vista Alegre, de forma a fazer distinção da designação do grupo. O evento importante mais recente foi no final da primeira década do século XXI, em que o grupo foi adquirido pela *holding* multinacional, Grupo Visabeira, SGPS, SA, no qual se mantém integrado.

## 2. Materiais

### 2.1. A porcelana: definição e propriedades

A porcelana é um material da classe dos cerâmicos, definidos como compostos sólidos, inorgânicos e não-metálicos, baseados em silicatos, insolúveis em água e em muitos dos ácidos ou bases, e contendo pelo menos 30% de compostos cristalinos.<sup>[1;2]</sup>

Os cerâmicos são distinguidos entre tradicionais e avançados (ou técnicos), dependendo das aplicações, matérias-primas e técnicas de processamento. Os cerâmicos tradicionais descendem de tradições e métodos com vários séculos. Possuem microestruturas baseadas em silicatos, de tamanhos e formas de grão pouco uniformes e de várias fases. São obtidos de misturas de matérias-primas argilosas e feldspáticas, extraídas de fontes naturais. A conformação é feita por técnicas tradicionais como a moldagem ou o enchimento à lambugem, e por fim é feita a vidragem e a cozedura. Estes cerâmicos são usados maioritariamente em aplicações de construção (cerâmicos estruturais), em produtos como tijolos, pavimentos, revestimentos e sanitários, e artigos domésticos, como louça (*tableware*) e decorações. Os cerâmicos avançados são obtidos de matérias-primas mais refinadas, como óxidos binários, carbonetos, nitretos, ou seja materiais que não são obtidos de forma direta da natureza. As suas microestruturas finais são mais finas, mais homogêneas e menos porosas do que as dos cerâmicos tradicionais.<sup>[2]</sup> O material que é central neste estudo, a porcelana, é portanto um cerâmico tradicional, tendo em conta as matérias-primas usadas e os seus processos de conformação.

As ligações químicas presentes nos cerâmicos são simultaneamente iónicas e covalentes. Os cerâmicos caracterizam-se mecanicamente por elevada resistência à compressão, em comparação com uma menor resistência à tensão. Possuem geralmente baixa condutividade térmica e elétrica (especialmente quando comparados com os metais), embora alguns cerâmicos técnicos sejam bons condutores. Uma resistência química elevada é também comum nos cerâmicos, sendo estes estáveis em contacto com muitos químicos corrosivos.<sup>[3]</sup>

A porcelana é um material cerâmico, policristalino, cuja microestrutura é composta por cerca de 15 a 40% em fases cristalinas (ou seja com estrutura organizada) de quartzo e mulite dispersa por 60 a 85% de fase vítrea<sup>[4]</sup>. Estas características contribuem para uma baixa porosidade (inferior a 0,5%), elevada dureza, e baixa taxa de absorção de água, inferior a 1%.<sup>[5;6]</sup>

Visualmente, tem cor esbranquiçada e é translúcida (Figura 3), existindo transmissão parcial de luz em artigos de menor espessura, proporcionada pela fase vítrea. Pelas fraturas, mostra um aspeto brilhante e vítreo, visível na Figura 4. A aplicação do revestimento vidrado confere à sua superfície um aspeto brilhante e suave.<sup>[7]</sup>



Figura 3 - Aspeto superficial e translucidez de um artigo de porcelana.



Figura 4 - Fratura de uma amostra de porcelana.

As principais matérias-primas utilizadas na produção da porcelana são: caulinos e outras argilas, que proporcionam a plasticidade necessária para a conformação; feldspato, que atua como um fundente durante a cozedura e também como inerte durante a conformação; e a areia (quartzo), que é um inerte, reduzindo a retração na cozedura e contribuindo para a redução do coeficiente de expansão térmica da porcelana.<sup>[8]</sup>

Na Figura 5 mostra-se uma parte do diagrama de fases do sistema  $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$ , os três principais elementos químicos da porcelana. Devido à sua composição ser afectada por variações de algumas das matérias-primas usadas, em especial das argilas e feldspatos (devido às suas origens), não existe listagem fixa de composições.<sup>[6]</sup>

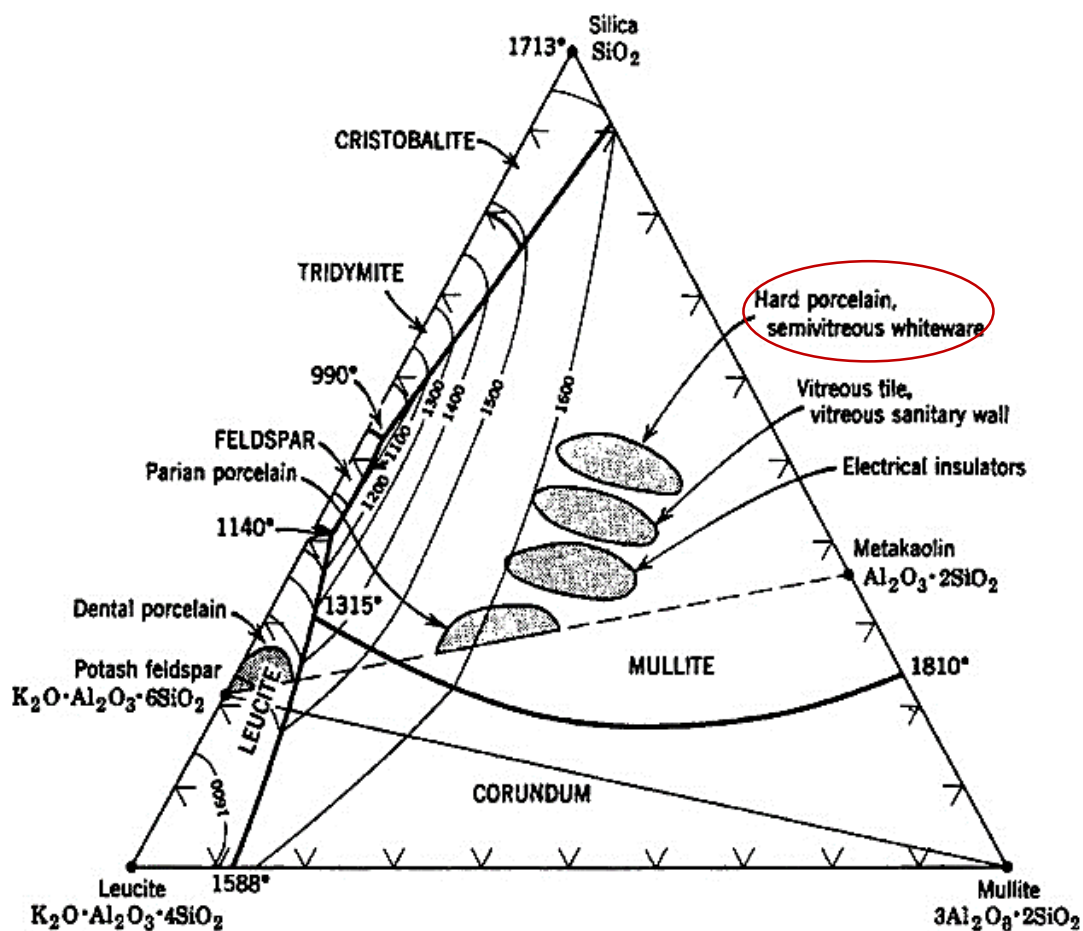


Figura 5 - Porção do diagrama de fases do sistema  $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$  representando diferentes tipos de porcelana.<sup>[5]</sup>

Dentro da porcelana, distinguem-se as porcelanas de pasta dura e pasta mole. A porcelana de pasta dura possui maior conteúdo em alumina, proveniente das matérias-primas argilosas e do feldspato. A maior percentagem de argila confere maior plasticidade na conformação, necessitando de temperaturas de cozedura na ordem dos 1300 a 1400 °C. A porcelana de pasta mole contém menos argila e, conseqüentemente, menor percentagem em alumina, permitindo temperaturas de sinterização inferiores mas diminui a plasticidade da pasta, além de se obter um material menos resistente ao impacto no produto final. Uma outra variante (mais rara) é a porcelana de osso, cuja pasta é similar à pasta dura, com a adição de cerca de 50% de ossos de origem animal (após moagem e calcinação), contendo fosfato de cálcio. O produto final é igualmente resistente e translúcido, apresentando uma cor branca mais acentuada em relação a outros tipos de porcelana.<sup>[3]</sup>

### 2.1.1. Pasta de porcelana

A preparação da formulação da porcelana produzida pela Vista Alegre é feita por subcontratação (*outsourcing*), ou seja é efetuada por uma empresa especializada neste serviço (Mota Soluções Cerâmicas, S.A.), que procede à seleção das matérias-primas, moagem e mistura. O procedimento da subcontratação da preparação da pasta é cada vez mais frequente na indústria cerâmica.



Neste trabalho será focada a formulação da pasta de porcelana branca, a que dá origem ao produto do processo em estudo, e cujas matérias-primas estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição da pasta de porcelana usada pela Vista Alegre (% ponderais).

<b>Matérias-primas</b>		<b>Quantidade</b>
Plásticas	Caulino	45%
	Argilas	5%
Duras	Feldspato	25%
	Areia	25%

A análise da composição química reflete as composições químicas das matérias-primas. A fórmula química da caulinite é  $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$  e a areia é composta por sílica ( $SiO_2$ ), pelo que, na análise apresentada na Tabela 2, se verifica a presença de sílica e alumina ( $Al_2O_3$ ) como os elementos químicos maioritários.

Tabela 2 - Composição química (percentagem em peso) da pasta de porcelana.

<b>Óxido</b>	<b>Quantidade</b>
$SiO_2$	>60%
$Al_2O_3$	>20%
$K_2O$	>2%
$Na_2O$	<2%
$MgO$	<2%
$CaO$	<2%
$Fe_2O_3$	<0,8%
$TiO_2$	<0,2%

Nos processos de conformação por via húmida, o conteúdo em água da pasta cerâmica desempenha um papel de elevada importância pelo seu impacto nas propriedades reológicas. Por um lado ajuda a controlar a plasticidade da mistura, em função do processo de conformação plástica a ser utilizado e da peça a conformar e, por outro, ajuda a controlar a viscosidade da barbotina nos processos de conformação por via húmida (enchimento).

### 2.1.2. Matérias-primas

#### Argilosas

A argila é tida como a mais conhecida matéria-prima cerâmica. Ao ser misturada com água, forma uma massa coesa e pegajosa, revelando-se fácil de moldar, tornando-se dura e quebradiça após secagem, mantendo a forma que lhe foi conferida. Submetida a temperaturas elevadas, esta forma torna-se dura e resiste à ação da água.<sup>[9]</sup>

Estas rochas, classificadas de aluminossilicatos devido aos seus principais constituintes, alumínio e silício, dividem-se em dois principais grupos: os caulinos, com a fórmula empírica  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$  e as montmorilonites, derivadas da fórmula

$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ . O grupo dos caulinos inclui a caulinite, que é o principal constituinte de muitos dos cerâmicos tradicionais, pois é a origem da cor branca (Figura 6).

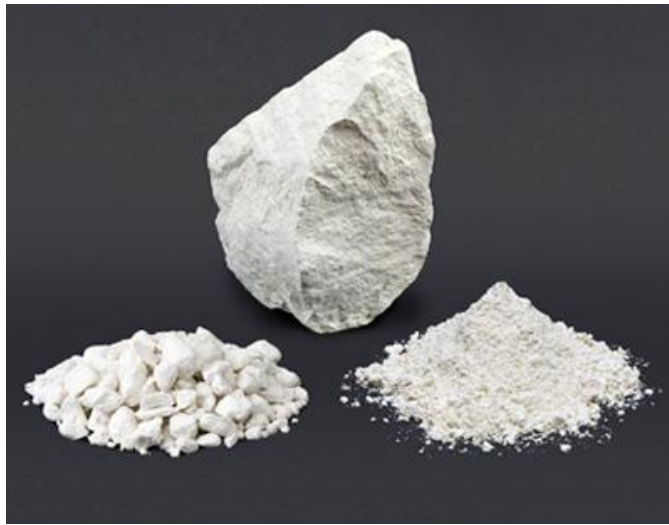


Figura 6 - Caulino.<sup>[10]</sup>

Os caulinos possuem uma estrutura básica composta por uma camada tetraédrica de átomos Si-O e uma camada octaédrica de átomos Al-O. Na camada de sílica os átomos Si e O estão ligados numa disposição hexagonal, tal como os átomos da camada de Al e O. Sobrepostas, estas encaixam-se de forma quase exata. Na Figura 7 está representada a estrutura descrita de forma esquematizada.

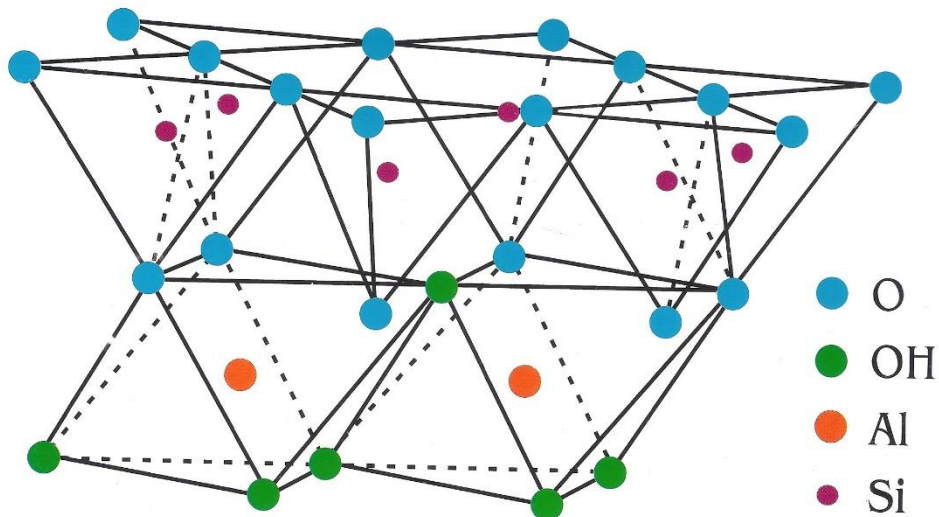


Figura 7 - Esquematização da estrutura da caulinite.<sup>[11]</sup>

A espessura de um cristal de caulinite é muito superior às das duas camadas referidas, consistindo de milhares destas. Como minerais argilosos, estes cristais manifestam-se na forma de placas planas de forma hexagonal, um aspeto que caracteriza as argilas, como mostra a micrografia na Figura 8.<sup>[9]</sup>

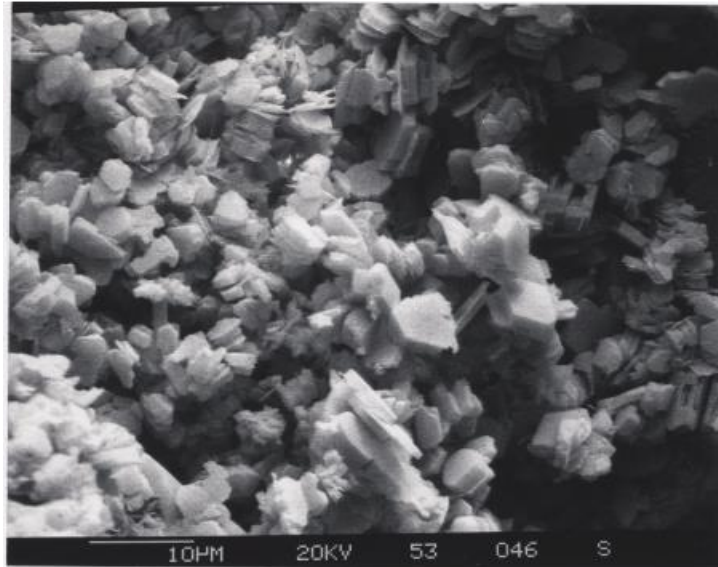


Figura 8 - Micrografia de cristais de caulinite. <sup>[12]</sup>

## Areia

A areia é constituída por quartzo, uma forma cristalina da sílica ( $\text{SiO}_2$ ), com aspeto transparente. Os cristais de quartzo têm estrutura trigonal composta por células tetraédricas, com os átomos de O nos vértices e um átomo de silício (Si) em posição central, como representado na Figura 9.

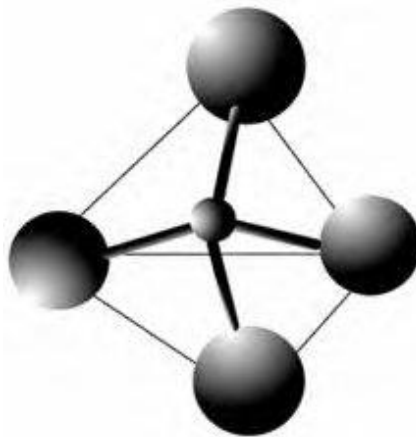


Figura 9 - Tetraedro de sílica. <sup>[13]</sup>

Os tetraedros podem ligar-se de formas diferentes, resultando em diferentes formas dos cristais de sílica, como o quartzo, cristobalite e tridimite, mantendo a fórmula  $\text{SiO}_2$  mas diferindo no arranjo dos tetraedros de sílica.

A estrutura do quartzo é formada pelos tetraedros de sílica ligados de forma ligeiramente oblíqua, formando uma espécie de corrente ou espiral. A estrutura completa, esquematizada na Figura 10, consiste em várias espirais. <sup>[9]</sup>

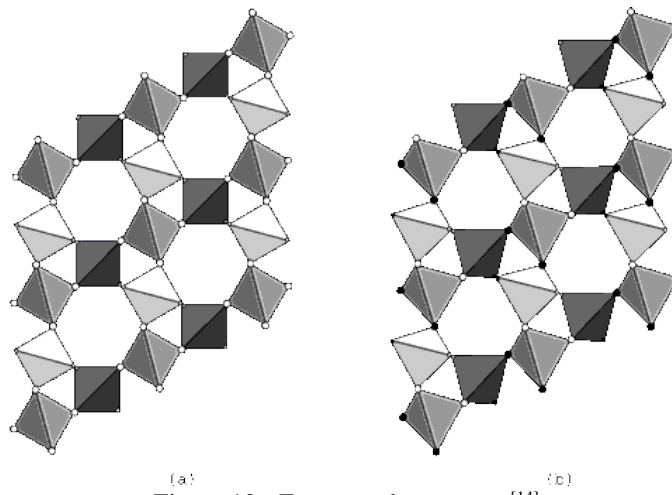


Figura 10 - Estrutura do quartzo. <sup>[14]</sup>

O quartzo é química e estruturalmente estável à temperatura ambiente. Ao ser submetido a temperaturas elevadas, por exemplo durante a cozedura, ao ser aquecido até 573 °C, sofre alterações na estrutura, existindo uma modificação no empacotamento atómico, resultando em expansão da rede cristalina. A estrutura à temperatura ambiente até 573 °C é designada de quartzo- $\alpha$  e a estrutura acima dessa temperatura, após a expansão, de quartzo- $\beta$ . Este fenómeno é conhecido como a transição quartzo  $\alpha$ - $\beta$  e é reversível, ou seja, durante o arrefecimento, à mesma temperatura (573 °C), a forma quartzo- $\beta$  transita para quartzo- $\alpha$ , contraindo-se.

### Feldspato

Os feldspatos são um grupo de minerais, de fórmulas químicas semelhantes, compostos de sílica e alumina e alguns elementos como sódio (Na), potássio (K) ou cálcio (Ca).

Os mais importantes para a indústria cerâmica são: o feldspato de potássio (ortóclase,  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ), o feldspato de sódio (albite,  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) e o feldspato de cálcio (anortite,  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ). Estas fórmulas partem de uma unidade de  $\text{Si}_4\text{O}_8$ , em que um (ou dois) dos quatro átomos de Si é substituído por Al (os feldspatos são aluminossilicatos), causando deficiência de valência, equilibrada por um átomo de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  ou  $\text{Ca}^{2+}$  (Figura 11).

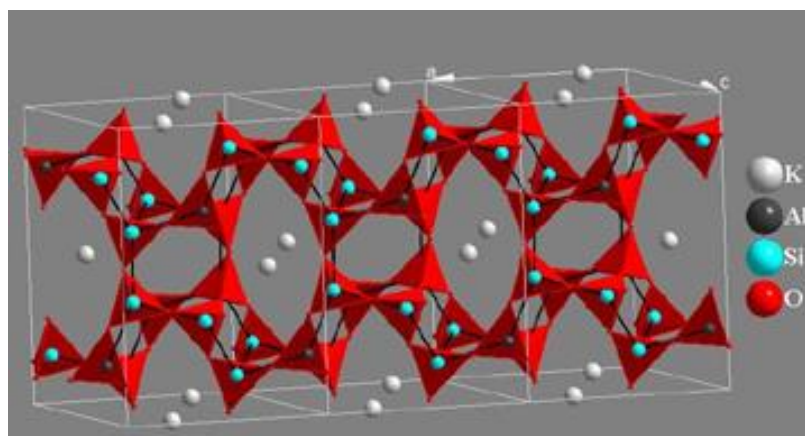


Figura 11 - Estrutura de feldspato. <sup>[15]</sup>

Os feldspatos são materiais que promovem a fusão, isto é, a sua adição na mistura da pasta resulta em redução da temperatura de formação de fase líquida durante a sinterização. Qualquer material que promova a fusão é considerado um fundente. Os fundentes mais eficazes em materiais que contêm sílica, são os que contêm óxidos alcalinos, como Na<sub>2</sub>O ou K<sub>2</sub>O, encontrados em feldspatos como a albite e ortoclase, com a vantagem de se encontrarem disponíveis na natureza, sendo encontrados em várias rochas, por exemplo nos granitos. A sua meteorização (processo natural de desintegração das rochas) dá origem a minerais argilosos.<sup>[9]</sup>

## 2.2. Vidrado

Os vidrados são revestimentos finos e contínuos, geralmente preparados a partir de misturas de silicatos. São aplicados sobre os cerâmicos para conferir proteção superficial, para fechar poros ou para a decoração.

Em termos físicos e químicos os vidrados são como os vidros: são duros, insolúveis e impermeáveis a gases e líquidos. Tal como os vidros, não têm uma estrutura cristalina definida mas uma estrutura amorfa (desordenada).

Possuem geralmente um aspeto brilhante, podendo ou não ter cor, serem transparentes, opacos ou translúcidos. Além dos efeitos estéticos, tornam a peça impermeável a gases e líquidos (fechando a porosidade à superfície), são higiénicos (superfície mais fácil de limpar do que sem vidrado), e melhoram a resistência a riscos aumentando a dureza da superfície.<sup>[16]</sup>

Estes atributos tornam o vidrado especialmente fundamental na loiça de mesa, uma vez que estará em contacto com alimentos. Verifica-se também um pequeno aumento da resistência mecânica, nomeadamente da resistência à compressão e ao choque mecânico.<sup>[17]</sup>

A aplicação do vidrado é sob a forma de uma suspensão, sobre a superfície do cerâmico após a chacotagem. Durante a cozedura final, forma-se o revestimento vítreo, o vidrado propriamente dito.<sup>[18]</sup>

A suspensão de vidrado pode ser aplicada por pulverização ou pela imersão da peça cerâmica num tanque. A suspensão de vidro é aplicada após a chacotagem, quando as peças já possuem bastante resistência mecânica mas com porosidade considerável para facilitar a adesão da pasta de vidrado à superfície, e obter uma camada com espessura uniforme. A espessura da camada após a cozedura encontra-se entre 100 e 150 µm.

A composição em matérias-primas do vidrado usado está resumida na Tabela 3. À semelhança da pasta de porcelana, a pasta para o vidrado da Vista Alegre é adquirida a um fornecedor.

Tabela 3 - Matérias primas que constituem o vidrado (% ponderais).

<b>Matéria-prima</b>	<b>Quantidade (%)</b>
Areia	40
Feldspato	20
Caco	15
Dolomite	15
Calcite	5
Caulino	5

### 2.3. Cola

Depois de ser concluída a conformação de ambos os componentes, é necessário proceder a uma colagem que os una. Para o conseguir, é aplicada uma cola rápida, constituída pela pasta do vidro com a adição de CMC (carboximetil de celulose) e uma pequena porção de caulino (Tabela 4). A cola é aplicada manualmente nas extremidades da asa que fazem contacto com o corpo, criando uma ligação que se mantém durante a secagem e será consolidada com a cozedura. O uso da composição do vidro e do caulino para a cola torna-a impercetível após a cozedura, uniformizando o aspeto estético da chávena, uma vez que a cola adquire o mesmo aspeto do vidro, como se observa na Figura 12.



Figura 12 - Pormenor da asa e corpo da chávena.

O carboximetil de celulose é um polímero derivado da celulose (um polímero natural), usado como ligante em várias indústrias, como a da pasta de papel, a farmacêutica e a têxtil, entre outras. Na indústria cerâmica é frequentemente usado em suspensões argilosas. <sup>[19; 20]</sup>

Nesta aplicação, o seu uso tem em vista o aumento da viscosidade da suspensão de vidro e a melhoria da adesão à superfície do corpo em verde, originando a cola para unir as duas partes da peça (asa ao corpo), necessitando apenas de uma pequena quantidade, dispensando acabamento e aumentando a cadência de produção.

Tabela 4 - Constituição da cola rápida

Material	Quantidade (%)
Vidrado	79,0
Caulino	20,0
CMC (Peptapon®), diluído	4,1

A cola rápida é preparada internamente, no laboratório da fábrica, de acordo com as necessidades da produção. O vidro e caulino são moídos em moinho de bolas, sendo de seguida adicionada a esta carga o Peptapon® diluído em água, procedendo-se a uma nova moagem para homogeneizar a mistura, ajustando-se densidade para 1400 g/l quando necessário.

Anteriormente, foram testadas diferentes composições da cola, sempre com a base da composição do vidro, mas com a adição de alguns materiais: uma hipótese experimentada foi a adição de uma porção de caulino, e outra diferente com a adição de frita (vidro que foi fundido, resfriado e moído).

### 3. Processos

#### 3.1. Sequência do processo produtivo das chávenas de porcelana

A produção da chávena de porcelana passa por várias fases desde as matérias-primas até ao produto final. O processamento da matéria-prima em bruto e os passos por que esta passa (moagem, peneiração, mistura), fundamentais para garantir tamanhos de partícula ideais para a conformação, não são aqui analisados detalhadamente, uma vez que estes são efetuados pelo fornecedor da pasta, que segue as especificações do cliente.

As fases por que a peça em questão passa desde a pasta cerâmica, a conformação dos dois componentes e até estar pronta para armazenamento e expedição, estão exemplificados no diagrama de produção (*flowchart*) da Figura 13.

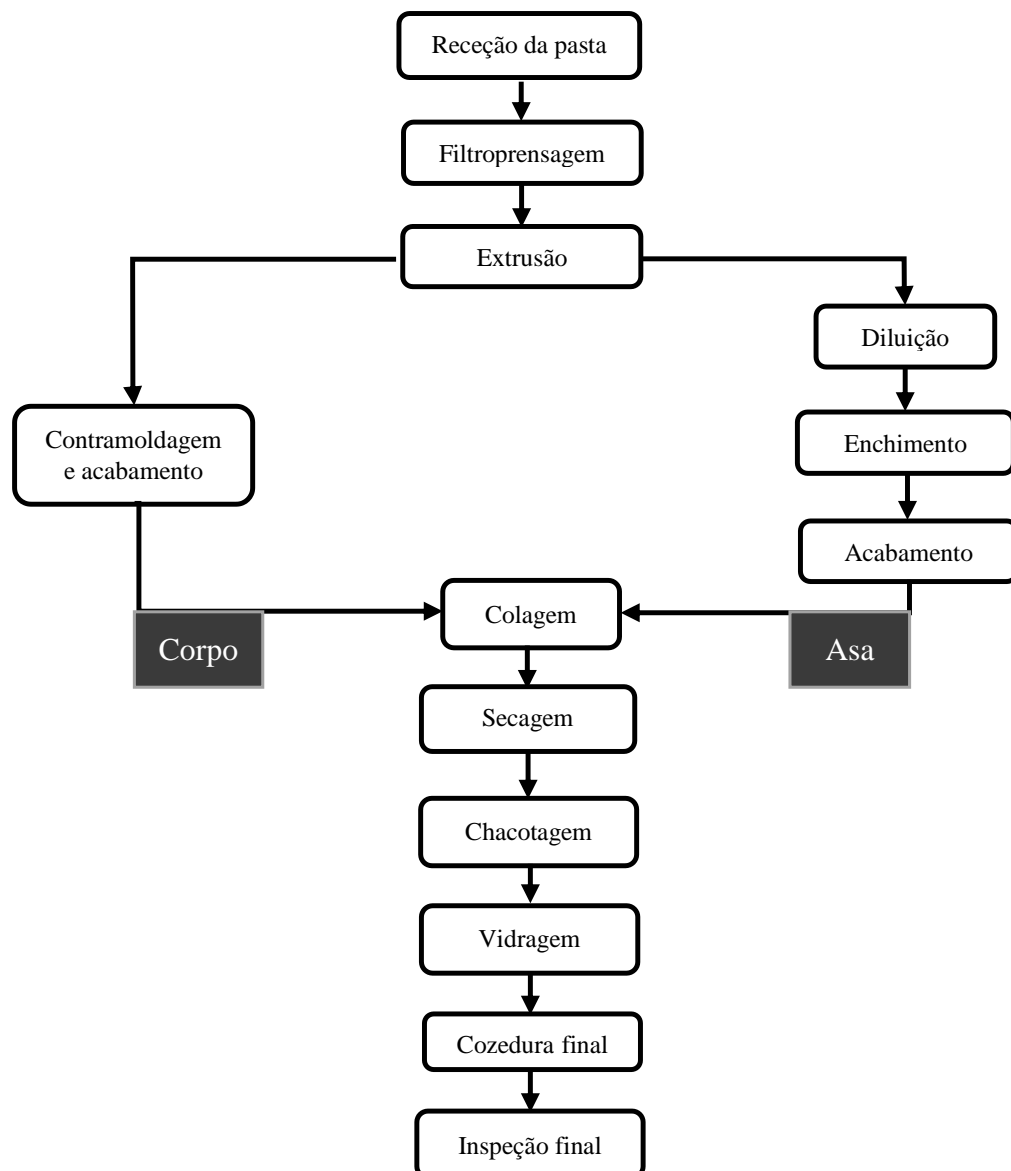


Figura 13 - Diagrama do processo de produção de chávenas



A peça em estudo requer que se produzam duas partes: a asa e o corpo. Estes componentes são produzidos separadamente por processos diferentes, devido às suas geometrias. Para conformar o corpo, de forma oca de eixo de rotação vertical, exemplificado na Figura 14, usa-se a contramoldagem em equipamentos *roller*, que é um processo de conformação por via plástica e requer uma pasta adequada, com conteúdo em água inferior. No caso da asa, tratando-se de formas sem eixo de rotação, exemplificado na Figura 15, a conformação é feita pelo processo de enchimento por barbotina.



Figura 14 - Chávenas após a conformação colocadas em bases, prontas para chacotagem.



Figura 15 - Asas prontas a serem unidas com o corpo da chávena.

Depois da conformação, é feita a união manual dos dois componentes para formar a chávena, ficando a peça concluída em termos de forma, com a ligação corpo-asa com o aspeto apresentado na Figura 16. De seguida é encaminhada para a secagem, feita a primeira cozedura, de seguida a aplicação do vidrado e por fim a cozedura final.



Figura 16 - Asa colada ao corpo.

### 3.2. Contramoldagem por cabeça rotativa

O processo usado para conformar o corpo da chávena é um processo de conformação plástica designado por contramoldagem por cabeça rotativa, feito em máquinas designadas por *roller*. A operação de contramoldagem é totalmente automatizada, e é utilizado para produzir peças com eixo de rotação como pratos e chávenas, tal como as chávenas do caso de estudo.

A pasta plástica é previamente extrudida na forma de cilindros (charutos), o que contribui para a desaerização da pasta, evitando bolhas de ar que interferem numa boa conformação (Figura 17). Esta pasta destinada para a conformação plástica (designação interna de “PT”) tem um conteúdo em humidade de aproximadamente 24% em peso.



Figura 17 - Extrusora.

Ao chegar ao equipamento de conformação, o cilindro sofre nova extrusão para uma secção menor, é cortada uma fatia do cilindro com a quantidade de material necessária (Figura 18), e colocada dentro de um molde poroso feito em gesso.

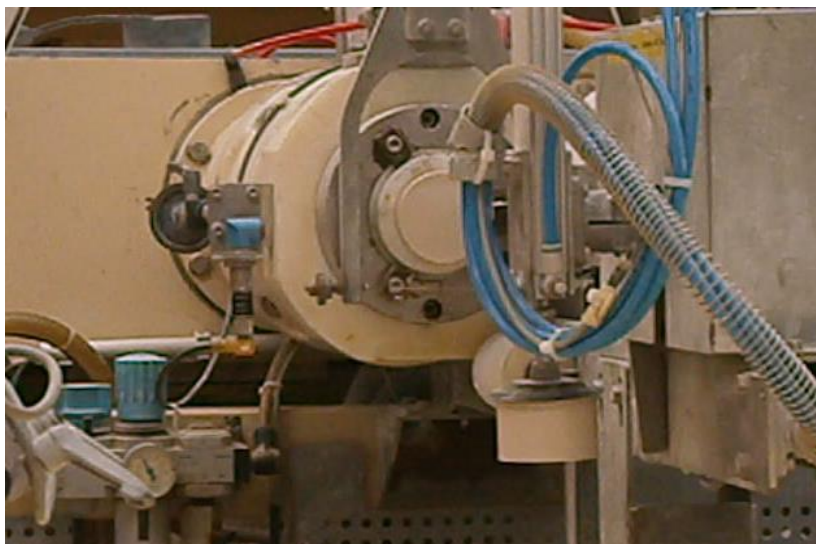


Figura 18 - Corte da porção de pasta necessária para a contramoldagem.

Durante a descida de uma cabeça metálica, visível na Figura 19, esta inicia um movimento rotativo que irá comprimir a pasta plástica, espalhando-a pela cavidade do molde, desenrolando-se ações de compressão e de corte. O perfil da cabeça metálica confere a forma interior e a cavidade do molde a forma exterior. Para garantir a que a peça é conformada na totalidade e evitar fissuras na borda, usa-se algum excesso de pasta, cerca de 20 a 30% (visível na Figura 20), que é reaproveitado ao ser misturado na pasta destinada à secção de olaria, que na Vista Alegre designa a secção onde se produzem peças por enchimento tradicional.



Figura 19 - Cabeça rotativa e molde de gesso, durante descida (esquerda) e após terminada a peça (direita).

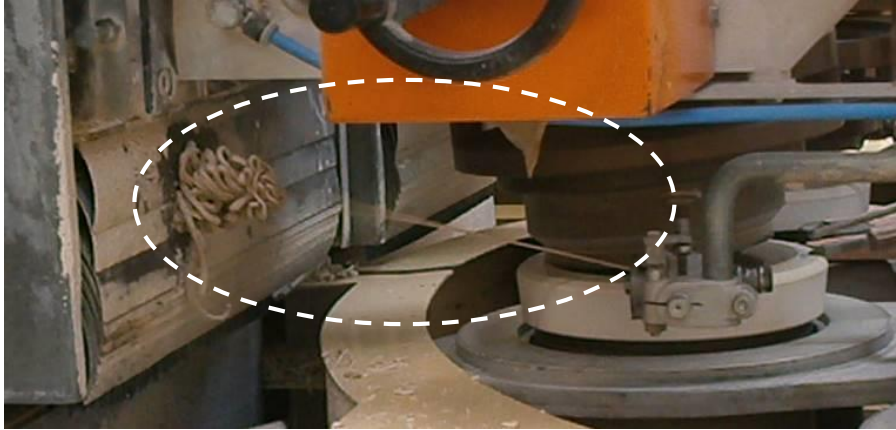


Figura 20 - Expulsão do excesso de material durante a ação rotativa da máquina *roller* (tracejado).

Depois de finalizada a conformação, o molde contendo a peça conformada segue para uma pré-secagem e, após retração suficiente (Figura 21), o corpo é removido e o molde, que perdeu grande parte da humidade, pode ser reutilizado. O corpo passa por um acabamento para suavizar as arestas da boca, operação visível na Figura 22.



Figura 21 - Moldes de gesso na câmara de secagem da máquina *roller*.



Figura 22 - Acabamento do corpo da chávena.

A tensão de corte provocada pela cabeça rotativa resulta numa elevada orientação das partículas nos produtos obtidos por este processo, visível na Figura 23. Esta tensão é crescente desde o centro da peça para as extremidades (a boca), e a direção das partículas é mais acentuada num plano paralelo ao diâmetro (exceto no centro).<sup>[21]</sup>



Figura 23 - Corte de uma peça em verde conformada por contramoldagem.

Os parâmetros do processo de contramoldagem (e de outros processos de conformação plástica) incluem a espessura e diâmetro do material, a redução de espessura efetuada, as propriedades das superfícies (do molde e da cabeça), o estado de conservação do molde (uma vez que é em gesso, tem um número de ciclos limitado, desgastando-se), a posição da cabeça, lubrificação, pressão aplicada, temperatura de processamento e a plasticidade da pasta.<sup>[18]</sup>

### 3.3. Enchimento

Para conformar a asa da chávena, usa-se o processo de enchimento por barbotina, também designado de enchimento por gravidade ou enchimento à lambugem. Este afigura-se adequado para produzir este componente, pois a sua forma é mais complexa, sem eixo de rotação. A conformação é feita com suspensão de partículas sólidas designada por barbotina (Figura 24), cujo teor em água (31%) é superior comparativamente aos processos de conformação por via plástica.



Figura 24 - Pasta PT asas.

Esta suspensão é o resultado de diluição de cilindros extrudidos de pasta PT usados para o processo *roller*, com ajuste da densidade para 1690 g/l, e características reológicas

(com desfloculante), sendo designada por “PT asas” e portanto a sua composição é inalterada em termos de matéria-prima em relação à pasta plástica.

Anteriormente, foi usada a pasta proveniente da secção de olaria, que é originária dos retornos de pasta dos processos de contramoldagem e de enchimento de alta pressão. Esta pasta foi retirada devido ao excesso de pequenas aparas de pasta durante o acabamento das asas, que aderem à superfície das asas e provocam defeitos na superfície (resíduos). Escolheu-se o uso da diluição de pasta de contramoldagem, por possuir mais plasticidade além de se assumir ser mais compatível com o corpo da chávina, por serem exatamente o mesmo.

O enchimento é efetuado em moldes porosos de gesso (razão gesso/água = 1,2/1). Neste caso específico são usados moldes em duas configurações, em metades de forma a possibilitar a desmoldagem: circulares (“disco”, Figura 25a), que são empilhados de forma a maximizar a produção de unidades (Figura 25c); e quando esta configuração não se revela eficaz (para asas de maiores dimensões), recorre-se a moldes retangulares (“tablete”, Figura 25b).

A suspensão é vertida para os moldes, preenchendo as cavidades, manualmente ou automaticamente (Figura 25d, e). A sucção capilar, de pressões na ordem de 0,1-0,2 MPa, exercida pelas paredes porosas do molde, permite eliminar a água da suspensão, concentrando e coagulando as partículas. Esta ação de coagulação processa-se a partir das superfícies do molde em contacto com a pasta para o interior (Figura 26). É nesta direção que se forma a parede da peça moldada. <sup>[8]</sup>

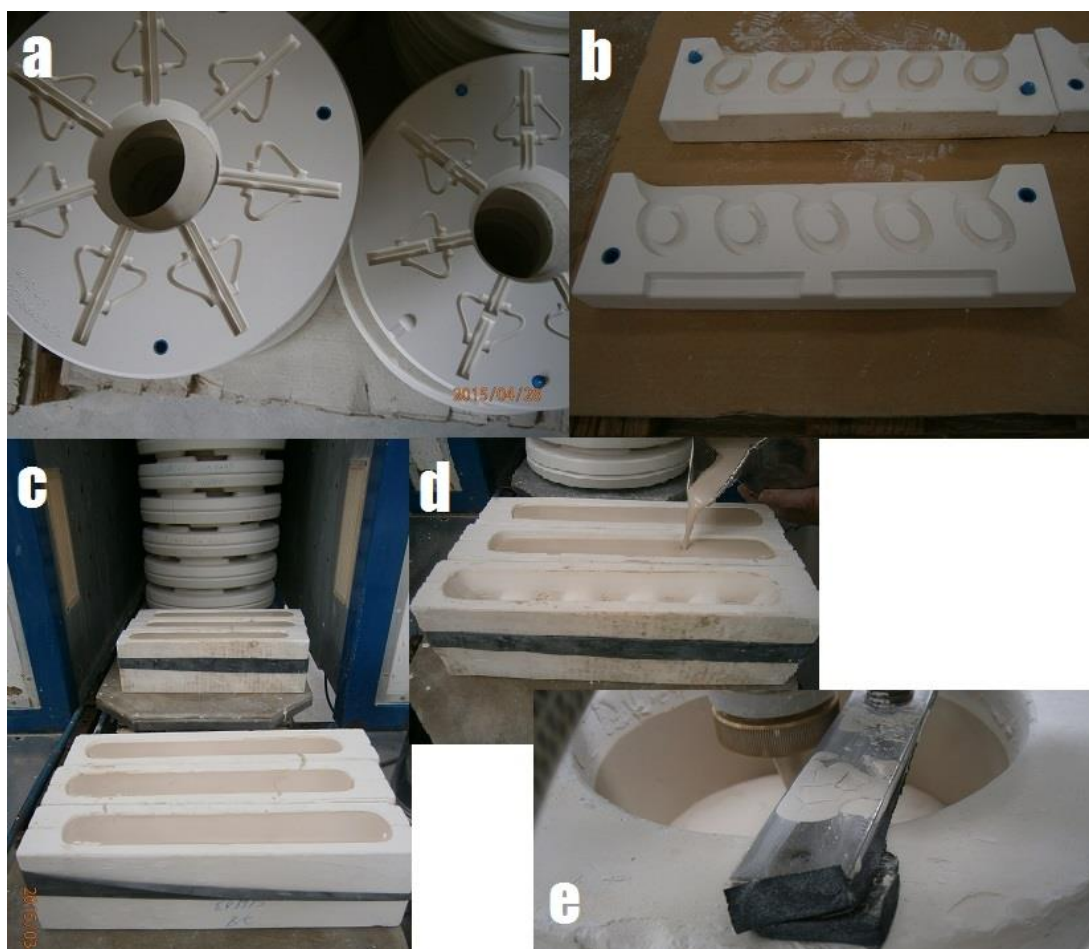


Figura 25 - Moldes de gesso para asas.

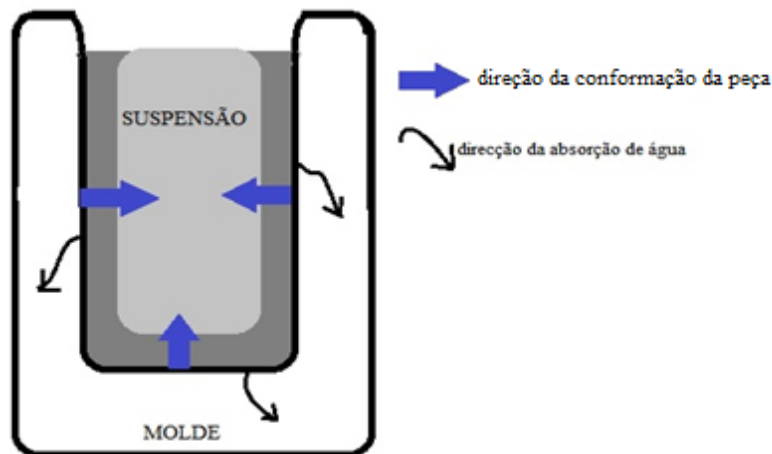


Figura 26 - Esquemática do comportamento da suspensão no molde.

Este processo de enchimento também resulta em algum grau de orientação preferencial das partículas, apesar de menos evidente do que no processo de contramoldagem devido à menor intensidade das forças envolvidas. Esta orientação é preferencial do seio da peça para a parede exterior em contacto com o molde de gesso e é visível na Figura 27.



Figura 27 - Peças conformadas por enchimento por gravidade, evidenciando a orientação preferencial das partículas argilosas.

A espessura da parede é função do tempo de permanência da pasta dentro do molde, como representado na equação 1, onde  $L$  representa a espessura,  $J$  o volume de líquido (água) removido,  $t$  o tempo de permanência,  $\Delta P$  a diferença de pressão entre molde e pasta,  $\eta$  a viscosidade do líquido e  $R_c$  a resistência ao transporte de líquido ( $R_c = 1/Kp$ ,  $Kp$  sendo a permeabilidade do molde) [18]:

$$L = \left( \frac{2J \Delta P t}{\eta R_c} \right)^{0,5} \quad (1)$$

Esta equação pode ser resumida numa relação quadrática (equação 2) mais simples entre espessura de parede ( $L$ ) e tempo de repouso ( $t$ ):

$$L = k\sqrt{t} \quad (2)$$

No caso de peças ocas, assim que o tempo de repouso for suficiente para atingir a espessura requerida, o excesso de suspensão no centro da peça é vertido, podendo ser reprocessado, evitando-se desperdício de material. Após algum tempo de secagem a peça adquire consistência e alguma resistência mecânica, além de sofrer retração, facilitando a sua remoção do molde. A peça segue então para acabamento e secagem. Quando se pretende peças maciças, como é o caso das asas neste estudo, a pasta permanece no molde o tempo suficiente até que a parede feche até ao centro da peça (formação de parede dupla), usando-se a totalidade da suspensão na cavidade do molde. <sup>[18]</sup>

O fabrico de uma chávena inicia-se sempre pela asa, devido à disparidade do tempo de conformação entre o processo de enchimento (asa) e o processo *roller* (corpo).

A cadência de produção é controlada pela máquina *roller*, uma vez que a moldagem do corpo é feita automaticamente em poucos segundos e ao fim de poucos minutos de secagem (em média 5 min, naturalmente variando de acordo com tamanho e espessura das peças), é removida e está pronta para a colagem. O enchimento por barbotina, por seu lado é mais moroso e, embora seja possível efetuar a conformação de algumas dezenas de unidades devido ao empilhamento de moldes, como se trata de via líquida o tempo de conformação é mais longo, influenciado pela espessura das asas. Estas necessitam de acabamento manual, o que aumenta o tempo de produção das peças.

Os dois componentes não devem diferir muito na humidade contida na altura da colagem; as asas são armazenadas num armário com ambiente húmido e com isolamento adequado, de forma a manter estável o conteúdo em humidade. Este armário serve como um *buffer* de produção, evitando a paragem da máquina *roller* por falta de asas para unir aos corpos das chávenas.

### 3.4. Secagem

Uma das fases mais críticas do processo de produção cerâmica por via húmida é a secagem. O objetivo é a eliminação da água que foi necessária para conferir a maleabilidade à pasta para fazer a conformação, pois esta vai interferir no início da cozedura, provocando quebras nas peças com a rápida subida da temperatura.

Embora alguma desta água seja removida durante a conformação (absorvida pelo molde, ou mecanicamente sob pressão), esta definição de secagem refere-se à eliminação da água por evaporação. Este processo envolve a transferência de calor, para as peças conformadas de modo a provocar a evaporação da humidade contida entre as partículas sólidas. Esta transferência de calor pode ser efetuada por convecção ou por condução – habitualmente em simultâneo.

A temperatura do ar, o conteúdo em água da peça e fluxo de ar são as principais variáveis que influenciam a velocidade de secagem. Durante a secagem existe movimento de água em vapor ou em líquido do interior da peça para a superfície, à medida que a água é extraída da peça. Um dos resultados da secagem é a retração da peça, que em casos extremos pode conduzir a defeitos como fissuras ou distorção da forma.



A equação conteúdo em água de um material é expresso na equação 3 como a percentagem entre o peso inicial do material (sólido e água) e o final após a remoção do conteúdo de água (peso seco):

$$\text{humidade (\%)} = \frac{\text{peso inicial} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} \times 100 \quad (3)$$

Durante a conformação, o conteúdo em água raramente ultrapassa 40% nos processos por via líquida, uma vez que se procura obter suspensões com o volume sólido o mais alto possível. Um volume entre 15 e 30% é suficiente para fornecer plasticidade em grande parte dos materiais argilosos. O conteúdo necessário é influenciado pelas matérias-primas da pasta, desde a formulação (a porção de areias ou argilosos influencia a plasticidade de uma pasta cerâmica), o tamanho de partícula e distribuição granulométrica das matérias-primas moídas ou o processo de conformação plástica utilizado. [8]

Este processo é levado a cabo numa câmara aquecida, em que as peças são colocadas em transportadores como na Figura 28, levando aproximadamente uma hora a percorrer o comprimento do secador. A câmara de secagem possui gradiente de temperatura, mais baixa na entrada, aumentando gradualmente até à saída onde, no caso da Vista Alegre, está regulada para cerca de 40 °C pela ação de queimadores. Geralmente não é necessário aquecimento na entrada do secador, devido aos fenómenos de convecção transportarem ar quente a partir da saída, suficiente para manter uma temperatura superior à ambiente (por volta de 25 °C).



Figura 28 - Chávenas em transportadores do equipamento de secagem.

A água contida no interior da peça encontra-se na forma de um finíssimo filme (consideram-se apenas algumas moléculas de espessura) entre as partículas de matéria-prima. A eliminação desta água resulta em espaços vazios entre as partículas que tendem a aproximar-se eliminando os vazios, conduzindo à retração da peça.

O processo de secagem de peças constituídas por materiais argilosos passa por duas fases distintas: primeira fase, em que a perda de humidade é mais rápida, a diminuição de massa é constante e a peça sofre retração dimensional; e, a segunda fase, em que já não se

verifica retração, a perda de humidade é mais lenta (e conseqüentemente de massa). A primeira fase resulta da expulsão da água da camada entre as partículas, com a aproximação destas levando à mencionada retração. A segunda fase consiste na eliminação da água intersticial, isto é, a água presente nos espaços vazios (poros) entre as partículas argilosas e de sílica. Nesta fase a velocidade de secagem é menor, pois a aproximação das partículas dificulta a saída da água (em vapor) do interior da peça.

Para expressar graficamente a retração de materiais argilosos durante a secagem recorre-se a uma curva de secagem conhecida por “curva de Bigot”, representada na Figura 29, permitindo prever o comportamento de uma peça em secagem em termos de retração e conteúdo de humidade.

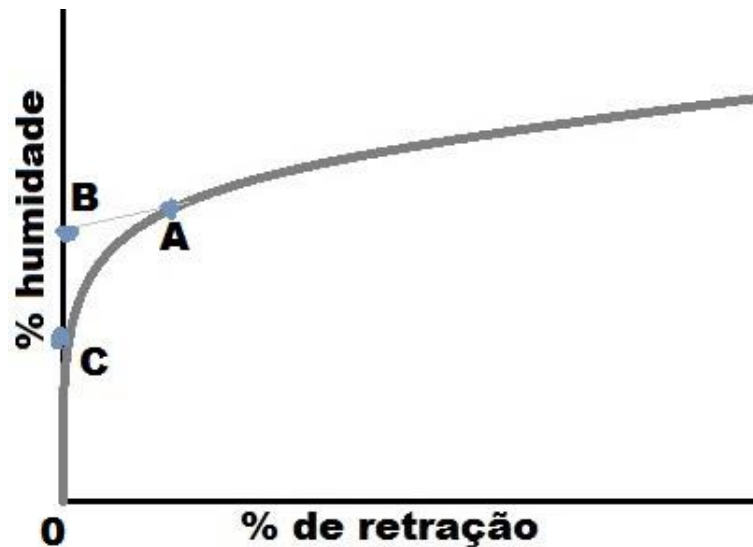


Figura 29 - Curva de Bigot típica de uma peça de material argiloso

Os pontos **A**, **B** e **C** representam importantes estágios da secagem: no ponto **A**, a curva de secagem deixa de ser linear, representando também uma queda na velocidade de secagem, marcando também o final da fase em que a argila possui plasticidade. A projeção no eixo das ordenadas da parte superior da curva, o ponto **B**, representa o conteúdo em humidade em que já se eliminou a água coloidal, sendo geralmente designado como o ponto de “consistência de couro” no qual o material argiloso apresenta ainda alguma maleabilidade (a textura é semelhante à do couro, daí esta designação). O ponto **C** indica o final da retração, continuando a secagem a um ritmo mais lento devido a maior obstrução à saída da água intersticial.

Na Figura 30 apresenta-se uma curva de secagem representada como perda de massa em função do tempo, ilustrando as duas fases descritas, inicialmente com uma queda acentuada da massa (representando a perda de água), sofrendo uma transição no final do regime de retração, em que a perda de massa abranda, sendo a velocidade de secagem mais lenta. Ao aproximar-se o final da secagem, (não representado na figura) o declive suaviza-se e torna-se uma linha horizontal, sinalizando o final da secagem.

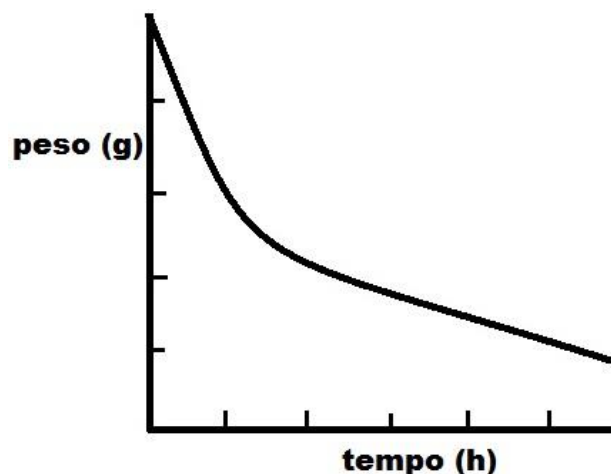


Figura 30 - Curva de secagem – massa da peça em função do tempo.

A partir da análise da curva de Bigot é possível tirar algumas conclusões: quanto mais longa a curva, maior a retração durante a secagem. Uma curva com a parte linear mais alta em relação ao eixo das abscissas indica que os materiais argilosos contêm mais água, pelo que a secagem será mais longa. [22]

Uma secagem mal efetuada pode provocar defeitos na peça, como fissuras ou deformações, provocados por retrações diferenciais da peça. As causas para tal são a perda desigual da água em diferentes partes da peça, os gradientes de humidade (distribuição pouco uniforme), retração anisotrópica devido à orientação que as partículas adquirem durante a conformação, ou devido a características mecânicas do artigo como maiores dimensões ou a superfície onde está apoiado. A temperatura excessiva de secagem, especialmente durante a fase de retração, causa tensões à superfície da peça, uma vez que é a primeira zona a perder água, pelo que é necessário controlar a retração para que esta seja o mais uniforme possível.

Devido à forma lamelar das partículas argilosas, que exibem uma orientação preferencial dependendo do processo de conformação utilizado, desenrola-se algum grau de retração anisotrópica, mesmo sob condições de secagem bem controladas. A retração será superior na direção perpendicular à orientação planar das partículas. A Figura 31 mostra uma representação de um sistema água-argila com forte orientação de partículas, com diferente grau de retração nas direções perpendicular e paralela ao alinhamento das partículas, pois o número de filmes de água por unidade de comprimento é diferente. Como já mencionado anteriormente, os processos de enchimento por barbotina e de contramoldagem originam orientação das partículas argilosas.



Figura 31 - Orientação de partículas argilosas e direções de retração.

### 3.5. Cozedura

Os produtos cerâmicos, após efetuada a sua conformação a secagem, ainda não possuem as propriedades ideais para a sua utilização. Nesta fase são designados por “corpos em verde” e, para desenvolver a sua microestrutura e conferir as propriedades desejáveis, são sujeitos a um tratamento térmico em fornos de altas temperaturas. Este processo é chamado de cozedura.

A cozedura densifica o cerâmico através da aproximação das partículas e do desenvolvimento da microestrutura, conduzindo à retração dimensional da peça, acompanhada de diminuição da porosidade, promovida pela formação de fase líquida. O processo de densificação é influenciado pela temperatura de cozedura, pelo tamanho de partícula, pela pressão e atmosfera dentro do forno e pela homogeneidade da microestrutura.<sup>[18]</sup>

Os processos de cozedura podem desenrolar-se com as fases em estado sólido ou em presença de fase líquida (ou viscosa). A cozedura da porcelana e de outras cerâmicas de argilosos é do segundo tipo, de fase viscosa. A fase viscosa da porcelana, com composição  $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$ , forma-se a altas temperaturas, fluindo para os poros devido às forças capilares, densificando o material e reduzindo a porosidade. A sinterização em presença de fase viscosa nos cerâmicos tradicionais resulta numa microestrutura com duas fases, uma composta de grãos cristalinos e outra composta por uma fase vítrea, sem estrutura organizada (como os vidros) originária da fase viscosa.

Esta fase vítrea pode formar-se apenas em determinada fase da cozedura ou, como no caso da porcelana, manter-se até ao final, pois a fase viscosa solidifica sem cristalizar, uma vez que o tempo de arrefecimento não é suficientemente longo para que as fases entrem em equilíbrio.<sup>[8; 23]</sup>

A microestrutura final da porcelana consiste da fase vítrea, mulite e grãos de quartzo.

#### 3.5.1. O processo de cozedura na Fábrica de Porcelana da Vista Alegre

As peças de porcelana em estudo são submetidas a duas cozeduras, em dois fornos contíguos, intercaladas pela vidragem, sequência esquematizada na Figura 32.

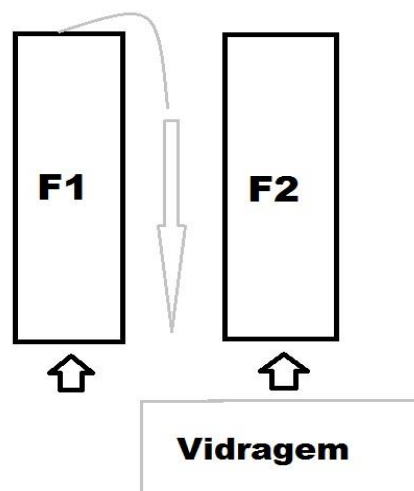


Figura 32 - Disposição dos fornos e secção de vidragem.

A primeira cozedura, ou chacotagem, é feita à temperatura máxima de 980 °C no Forno 1 (F1), com a duração de 20 horas e destina-se a consolidar o produto antes da vidragem.

Após a vidragem, as peças seguem para a cozedura final (Forno 2/F2), que se processa a temperaturas mais elevadas que a chacotagem, atingindo um máximo de 1350 °C, com a duração de 24 horas, para densificar a porcelana e consolidar a camada de vidrado, fechando a porosidade superficial. Estes parâmetros referem-se ao forno “F2”, ativo durante o projeto. Como parte do esforço da empresa em acompanhar a evolução tecnológica da indústria cerâmica este forno será no futuro substituído por uma nova unidade.

Os fornos de cozedura de produtos cerâmicos podem ser do tipo intermitente ou do tipo contínuo. Os fornos intermitentes, em câmara, são usados para produções em menor quantidade. Em cada ciclo de cozedura iniciam o aquecimento quando colocados os produtos no interior, sendo efetuada a cozedura e removem-se os artigos quando está terminada, finalizado o arrefecimento. Podem ser alimentados a eletricidade, mas também a gás natural.

Os fornos de tipo contínuo são usados em maior volume de produção, e por essa razão são utilizados na Vista Alegre. Os fornos são em túnel e têm dimensões muito superiores aos fornos intermitentes. As peças são transportadas em vagonas através do forno, de vários metros de comprimento, e estão ligados por longos períodos de tempo, sendo desligados apenas para manutenção ou reparação. Recorre-se a gás natural para a sua alimentação.



Figura 33 - Boca de saída do Forno 2.

### 3.6. Vidragem

Após a chacotagem, é efetuada a vidragem das peças. Este processo pode ser manual, em que o operador mergulha a peça num tanque com a suspensão de vidrado, ou mecanizado (Figura 34).

A superfície da peça é limpa (A), passa por uma “cascata” da suspensão de vidrado que reveste a peça (B, C) e por fim é retirado o vidrado do frete (D), para evitar que adesão da peça à plataforma da vagona. O vidrado é também retirado da boca de algumas peças que são cozidas na posição boca-a-boca, usada para peças de menor espessura que de outra forma

sofrieriam empenos durante a cozedura. Estas peças requerem uma cozedura adicional para vidrar a boca.



Figura 34 - Vidragem mecanizada.

#### 4. Abordagem ao problema

Para iniciar a abordagem ao problema tornou-se necessário criar uma estrutura, de forma a investigar as origens do defeito da asa descolada. Uma ferramenta para ajudar a identificar a causa do defeito é o diagrama de causa-efeito. Esta é uma ferramenta da qualidade, também conhecida por diagrama “em espinha de peixe” ou diagrama de Ishikawa, é criada na forma de um esquema, que ajuda a identificar as potenciais origens de determinado problema. Na Figura 35 apresenta-se um diagrama causa-efeito simples para o defeito da asa descolada.

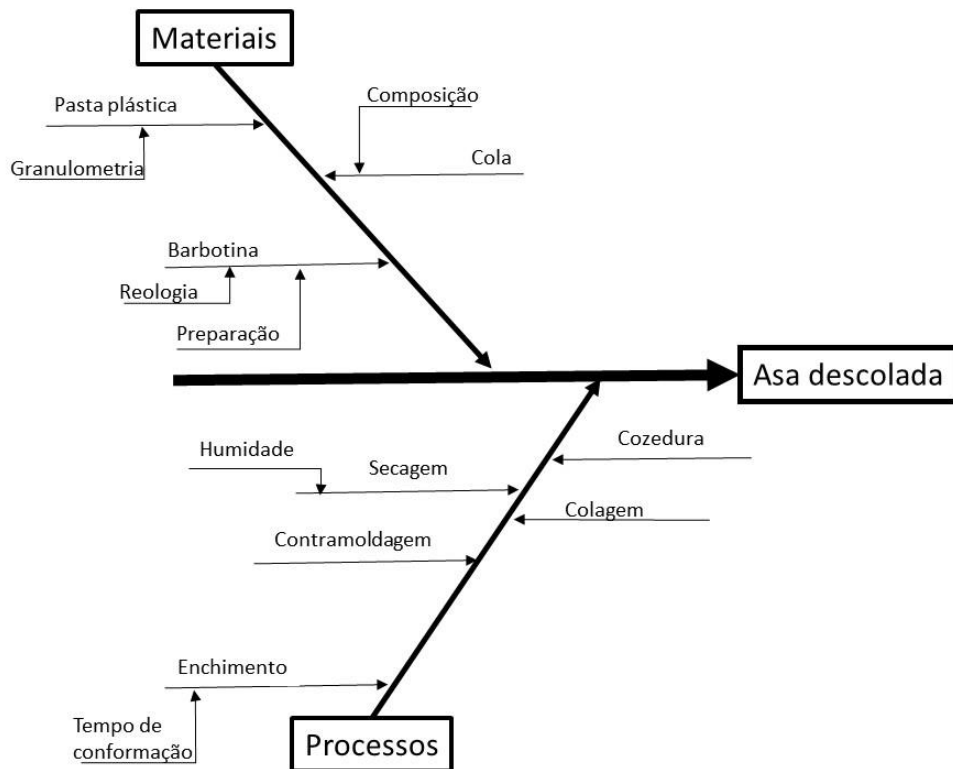


Figura 35 - Diagrama causa-efeito do caso de estudo.

Esta ferramenta foi importante no planeamento do procedimento experimental a seguir neste projeto, ajudando a identificar as possíveis causas do defeito da asa descolada, sendo planeados os ensaios a efetuar, em busca da origem (ou origens) do problema, e as soluções a colocar em prática.

Teve-se em atenção as ações anteriormente efetuadas para a resolução do problema, como alterações na pasta de enchimento das asas e alterações na composição da cola.

Após uma observação mais próxima do defeito, constatou-se que se manifestam algumas anormalidades logo a seguir à secagem, sob a forma de algumas fissuras na área da asa que cola no corpo (Figura 36), sendo depois realçados pela chacotagem e cozedura. O trabalho focou-se por isso a montante, especialmente no processo de enchimento das asas e na secagem.



Figura 36 - Área de colagem da asa, mostrando fissuras.

# Integração na empresa

Os objetivos de um estágio curricular envolvem o desenvolvimento de um projeto, e a integração numa empresa, com um envolvimento mais profundo no dia-a-dia do mercado de trabalho e na futura profissão de engenheiro.

A integração passa por conhecer as instalações, desde a receção de pasta, à secção da enfora, a vidragem, a decoração e controlo de qualidade, a localização dos equipamentos, assim como aspetos que não são de ordem técnica, como o cumprimento de horários, e uma boa relação com os colaboradores da empresa e a estrutura administrativa.

O acompanhamento das fases do processo produtivo assume grande importância, em especial as que estão relacionadas com o projeto desenvolvido, mas também os restantes processos de conformação que se utilizam na empresa, assim como os produtos que deles resultam. Além da contramoldagem e do enchimento manual, que são os processos que produzem as chávenas, são produzidos outros artigos de porcelana, por outros processos de conformação. Entre estes encontram-se o enchimento por alta pressão, prensagem isostática, olaria tradicional e escultura.

O conhecimento das referências e designações utilizadas internamente, por exemplo as referências das variantes da pasta de porcelana, é um pormenor importante que permite seguir de perto os processos produtivos efetuados nas instalações. A familiarização de normas e parâmetros de controlo mais importantes na produção, dos testes laboratoriais, permitiu compreender como é feito o controlo da produção dos vários artigos de porcelana. A observação da preparação de materiais, como a cola rápida das asas, cuja preparação é levada a cabo no laboratório interno, ajudou a perceber o papel desta na conceção das chávenas de porcelana.

Uma parte importante do estágio passou pelo acompanhamento do controlo da qualidade das chávenas, de forma a identificar os defeitos mais comuns (em especial a asa descolada, sendo o tema do trabalho) e a sua origem, quando aplicável. Para tal, foi necessário saber identificar visualmente o modelo e referência das chávenas em produção, para facilitando a identificação dos artigos cuja produção estivesse em curso, ou que fizessem parte do planeamento para as próximas horas ou dias.

Entre as tarefas levadas a cabo durante o estágio encontra-se a compilação de vários dados do histórico do controlo de qualidade das chávenas, desde o início do corrente ano até ao final do estágio, e o cruzamento destes dados com os registos de temperaturas do forno, as diferenças de humidade entre os componentes durante a colagem e as propriedades da cola (nomeadamente a viscosidade). A ênfase foi colocada no defeito da asa descolada, mas estes cruzamentos de registos relativos a outros defeitos, como fissuras e empenos foram também efetuados.

Para tal foi necessário uma introdução à utilização de comandos e funções básicas do *software* de gestão empresarial SAP (Figura 37), para aceder às bases de dados contendo os registos do controlo de qualidade (uma das muitas funções deste *software*).



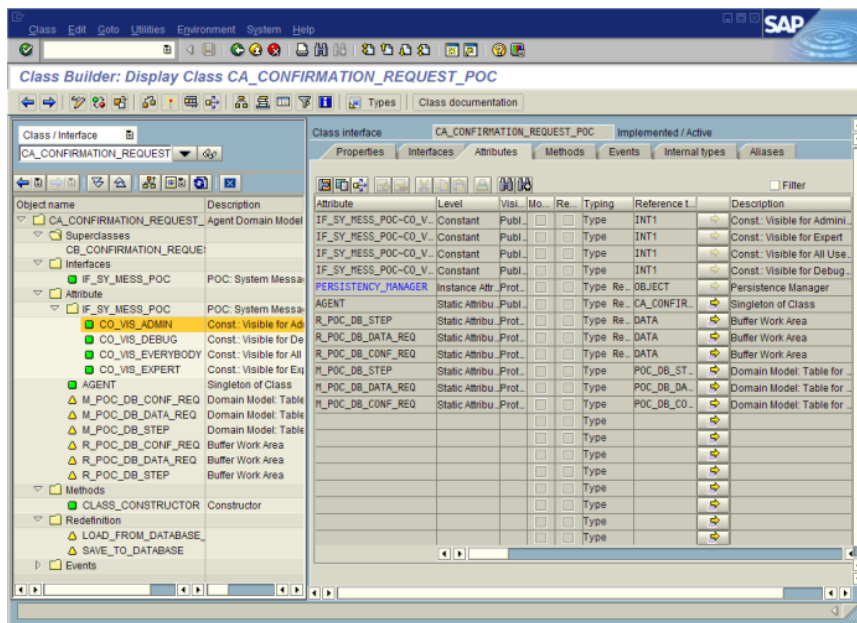


Figura 37 - Ambiente de utilização do SAP.

Como o trabalho efetuado era bastante próximo do da produção, ao ser detetada alguma inconformidade ou algo que despertasse dúvidas, passava-se a informação ao orientador dentro da empresa, para poder ser aplicada a ação corretiva. Assim foi possível observar como a resolução de pequenos problemas de produção é efetuada no momento, uma situação que é de normal ocorrência em qualquer unidade industrial.

# Procedimento experimental

O procedimento experimental contemplado nesta secção compreende vários ensaios efetuados ao longo do estágio. Estes ensaios destinaram-se a determinar as causas do defeito em estudo, a estudar as propriedades dos materiais, como o comportamento em secagem e reologia da suspensão, algumas melhorias implementadas e testes práticos. Os ensaios foram efetuados tendo em conta as condicionantes do dia-a-dia de uma unidade industrial, procurando reunir as condições ideais para serem efetuados, com o cuidado de evitar interferências no normal funcionamento da produção.

## Saturação do molde das asas no enchimento.

Selecionaram-se moldes secos, antes do primeiro ciclo de enchimento, pesaram-se e identificaram-se. No final de cada ciclo foram selecionadas aleatoriamente algumas unidades do mesmo molde, e foi comparada a humidade dos moldes com a dos ciclos anteriores, da peça conformada (usando balança de humidade) e da parede do molde.

Para saber a quantidade de água absorvida pelo molde, este é pesado (Kern 440-53N, precisão  $\pm 1$ g) entre cada enchimento.



Figura 38 - Molde do tipo tablete apresentando alguma humidade absorvida.

## Avaliação do tempo de espera entre acabamento da asa e a colagem

É feita uma amostragem das asas em diferentes pontos do processo entre acabamento e a colagem: imediatamente após o acabamento, e do armário, armazenadas há poucas horas e com um dia de armazenamento. As asas são marcadas e coladas num corpo de chávena, como mostra a Figura 39.



Figura 39 - Chávena com várias asas coladas

Num ensaio semelhante, mas usando o modelo mais problemático da produção, colaram-se asas, desta feita uma por chávena (Figura 40), que se encontravam armazenadas até 12 dias anteriormente à colagem, de modo a avaliar a perda de humidade sofrida quando no armário em longos períodos de tempo, e até que ponto afeta, a ligação corpo-asa. Os resultados foram analisados após a finalização da segunda cozedura das peças.



Figura 40 - Chávenas com asas coladas individualmente.

### Curva de secagem

São criados provetes longos, de forma retangular, nos quais foram efetuadas duas marcações, (para medir a retração), e efetuada a pesagem dos mesmos. Os provetes são colocados numa estufa regulada para a temperatura de 65 °C, considerada razoável para evitar secagem excessivamente rápida e, mais importante, evitar fissuras e distorção da forma do provete.

Foram criados provetes a partir de: (1) pasta de enchimento de asas (PT asas), com recurso a um molde de gesso existente para esse fim; (2) pasta *roller* (PT), cortada de uma peça retirada do molde imediatamente após a contramoldagem; (3) pasta de enchimento de alta pressão (pasta PC), cortados de uma peça conformada, e da mesma forma do (1).



Figura 41 - Provete de pasta de porcelana para ensaio de Bigot.

Ao fim de dez minutos, os provetes foram retirados e colocados num exsicador (Figura 42) por alguns minutos até que a sua temperatura se aproximasse da do ambiente (21,5 °C). Após este passo, é efetuada nova medida da distância entre as marcações, assim como uma pesagem e as amostras são recolocadas na estufa. Este processo repete-se a cada dez minutos, até que não se verifique diminuição da distância entre as marcações, o que significa que o provete sofreu toda a retração de secagem que seria possível.



Figura 42 - Exsicador

A partir deste ponto, a temperatura na estufa é regulada para 100 °C, facilitando a evaporação da água. As medições limitam-se à pesagem dos provetes, e tornam-se mais espaçadas (inicialmente feitas de com 1h de intervalo). Os provetes são deixados em repouso na estufa por várias horas (no mínimo 12 horas), terminando-se o ensaio com o final da secagem, assinalada pelo final da perda de massa destes.

### **Controlo de viscosidade da barbotina de enchimento das asas**

A partir da preparação de uma carga de barbotina para o enchimento de asas, é feito diariamente um controlo de viscosidade e de tixotropia, com recurso a um viscosímetro

Gallenkamp como o da Figura 43. Este procedimento foi repetido diariamente até à preparação de uma nova carga.

A viscosidade é tirada após encher o copo e, para testar a tixotropia da suspensão, a amostra é deixada em repouso após a primeira medição, repetindo-se medições ao fim de um minuto, dois minutos, cinco, dez, quinze e trinta minutos.



Figura 43 - Viscosímetro Gallenkamp

### **Curva de desfloculação**

Para traçar a curva de desfloculação da pasta de porcelana, preparou-se uma nova barbotina a partir de aparas de pasta secas, que foi necessário desagregar. O pó obtido utilizou-se para preparar 1 litro de barbotina com a mesma densidade da barbotina usada no enchimento das asas (1690 g/l). Adicionou-se desfloculante (solução a 10% de Dolapix PC 67), até se conseguir uma barbotina homogénea.

Após a preparação e homogeneização da barbotina, procedeu-se à medida da viscosidade com uso de um viscosímetro Brookfield.

Depois do registo da medida, é adicionado 1 ml desta solução de desfloculante, e a pasta é homogeneizada por agitação, dispersando o desfloculante, procedendo-se a uma nova medida. O procedimento é repetido até que a viscosidade da barbotina seja demasiado baixa.

Procedeu-se à medida da tixotropia da pasta. São preparadas amostras de suspensão com as mesmas adições de desfloculante já feitas, e deixadas em repouso por 30 minutos, no final dos quais é medida a viscosidade.

## Velocidade de formação de parede

O ensaio de velocidade de formação de parede permite medir a espessura da parede conformada em função do tempo no processo de enchimento por barbotina. Para tal são utilizados moldes de gesso de dimensões iguais, como na Figura 44. A densidade destes moldes é a mesma dos utilizados na produção (preparação com a proporção água:gesso 1:1,2). Procede-se ao enchimento, sequencialmente e com poucos segundos de intervalo, de quatro destes moldes com barbotina proveniente da produção, agitada para homogeneização. O excesso de barbotina é vertido de cada molde ao fim de 4, 9, 16 e 25 minutos. Após tempo de repouso suficiente para a peça formada adquirir consistência para o seu manuseamento, é retirada e feito um corte na vertical, medindo-se a espessura da parede de cada peça com recurso a paquímetro (Mitutoyo; precisão  $\pm 0,05\text{mm}$ ).



Figura 44 - Moldes utilizados no ensaio de velocidade de formação de parede

## Geometria da peça

Alguns modelos de chávenas são cozidos empilhadas “boca-a-boca” (Figura 45), pelo que o ângulo da asa em relação à vertical é invertido na chávena superior. Para determinar se a cozedura em alguma das posições afeta diretamente a ligação entre o corpo e a asa, foram marcados alguns pares (além dos representados na Figura 45, o mesmo foi feito com outros modelos nas mesmas condições), após a secagem é verificada a evolução desta ligação, e após a primeira e a segunda cozedura.



Figura 45 - Chávenas em disposição “boca-a-boca”

Para promover a precisão do corte da asa no acabamento, criaram-se modelos em gesso de dimensões exteriores semelhantes aos corpos de chávenas após a conformação.

Estes foram feitos enchendo um molde do corpo de chávena com gesso, devendo o interior deste molde ser previamente impermeabilizado com a aplicação de verniz (sintético) e um agente desmoldante (solução baseada em água e sabão) para evitar a aderência da nova preparação de gesso às paredes e facilitar a remoção da forma de gesso no interior, que tem o aspeto da Figura 46.

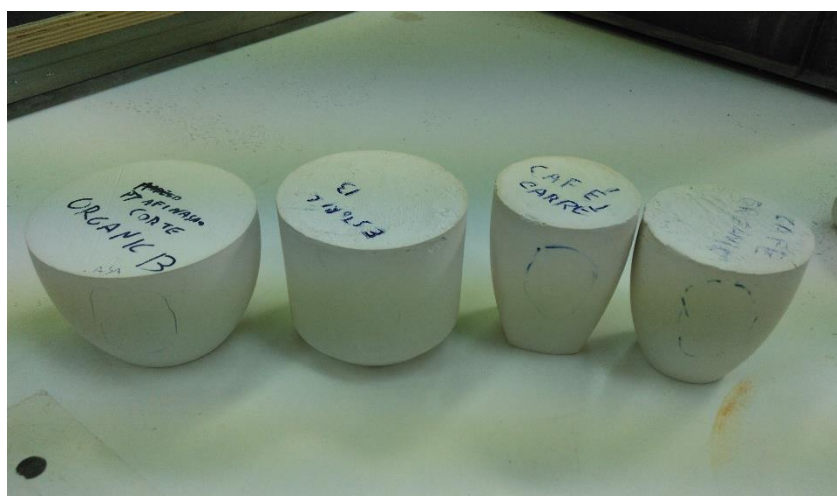


Figura 46 - Modelos do corpo das chávenas em gesso.

Estes modelos podem ser usados para ajustar a lâmina de corte na fase de acabamento das asas (Figura 47), e sere usados pelo operador para controlar o corte e despistar eventuais evoluções indesejadas da curvatura, reduzindo a variação desta dimensão. Avaliou-se a eficácia deste procedimento ao fim de algumas ordens de fabrico.



Figura 47 - Dispositivo de corte do excesso de material das asas

### Mistura de pastas

Procedeu-se ao enchimento de asas com pasta de diferentes propriedades, destinadas a diferentes usos. Para tal usou-se pasta proveniente do processo de enchimento por alta pressão, cuja designação interna é “PC”. Tornou-se necessário um ajuste à densidade da pasta, de forma a aproximar esta da habitualmente usada – 1690 g/l. A maior densidade da pasta de alta pressão (1715 g/l) tem influência na fluidez (menor fluidez), o que poderia dificultar o enchimento de moldes de asas de menor secção, pelo que se recorreu à adição de água para ajustar a densidade para o valor desejado. A viscosidade foi comparada à da pasta das asas (“PT asas”, que é pasta de contramoldagem diluída) com recurso ao viscosímetro Gallenkamp, verificando-se um valor muito próximo do especificado. Escolheu-se usar a pasta com estas características, prevendo-se que seriam adequadas para o enchimento adequado das cavidades do molde.

Prepararam-se cargas de barbotina a partir de mistura de barbotinas. Tomou-se como base a barbotina da secção de olaria (enchimento manual de peças ocas), uma vez que esta é preparada a partir dos retornos de pasta dos processos de contramoldagem e enchimento de asas (usam a mesma pasta PT) e do processo de enchimento de alta pressão (pasta PC). Adicionou-se pasta PT diluída, proveniente do enchimento de asas, em diferentes razões (% volumétricas), como representado na Tabela 5, ajustando-se as densidades para valores próximos do intervalo 1690 – 1700 g/l. O controlo de viscosidade foi efetuado com viscosímetro Gallenkamp, não se justificando a adição de desfloculante.

Tabela 5 - Misturas de pasta preparadas

PT asas (%)	Olaria (%)	Densidade (g/l)	Viscosidade (°G)		
			Inicial	Recuperação após 1 min.	Recuperação após 5 min.
75	25	1692	310	270	220
50	50	1699	320	280	230
40	60	1691	330	300	265
25	75	1703	320	290	240

As asas conformadas com estas misturas foram coladas em corpos de chávenas, com o restante processo desenrolando-se da forma habitual. No final do processo produtivo, as



chávenas produzidas neste ensaio foram sujeitas a controlo de qualidade e seleccionadas de acordo com as especificações definidas para aprovação ou rejeição de peças, servindo como avaliação dos resultados do ensaio.

### **Asas conformadas por alta pressão**

Foram colados dois tipos de asa, conformadas por enchimento de alta pressão, cedidas por uma empresa externa\*, uma vez que os equipamentos de enchimento de alta pressão da Vista Alegre não se encontravam adaptados para estas peças. Usaram-se asas de duas configurações, de um e de dois pontos de colagem com o corpo da chávena (Figura 48), usando a cola rápida.



Figura 48 - Chávenas chocotadas com asas conformadas por alta pressão.

Foram feitos cortes horizontais e verticais nas zonas de colagem de peças finalizadas, e observadas à lupa (Leica EZ4HD). Foram também efetuadas análises de difração de raios-X (Rigaku DMAX III/C) a amostras de ambas as porcelanas.

---

\* A pedido da empresa fornecedora, o seu nome foi deixado de parte deste trabalho escrito.

# Resultados e discussão

## 1. Reologia

### 1.1. Curva de desfloculação

O estudo da desfloculação da pasta mostrou um comportamento típico de uma suspensão argilosa, como se verifica pela curva de desfloculação na Figura 49. Para conseguir homogeneizar 1 litro de barbotina, foram necessários 9 ml de solução de desfloculante a 10%, o que se traduz em 0,9 ml de desfloculante puro por litro. A curva da tixotropia mostra as medidas de viscosidade da suspensão após 30 minutos de repouso. A escala começa a partir da adição de desfloculante inicial, a passos de 0,5 ml da solução a 10%.

A viscosidade original da suspensão tal e qual usada no enchimento das asas na Vista Alegre é de 850 mPa.s, medida com o mesmo viscosímetro Brookfield. Estes resultados permitiram perceber o comportamento desta pasta com diferentes níveis de desfloculação.

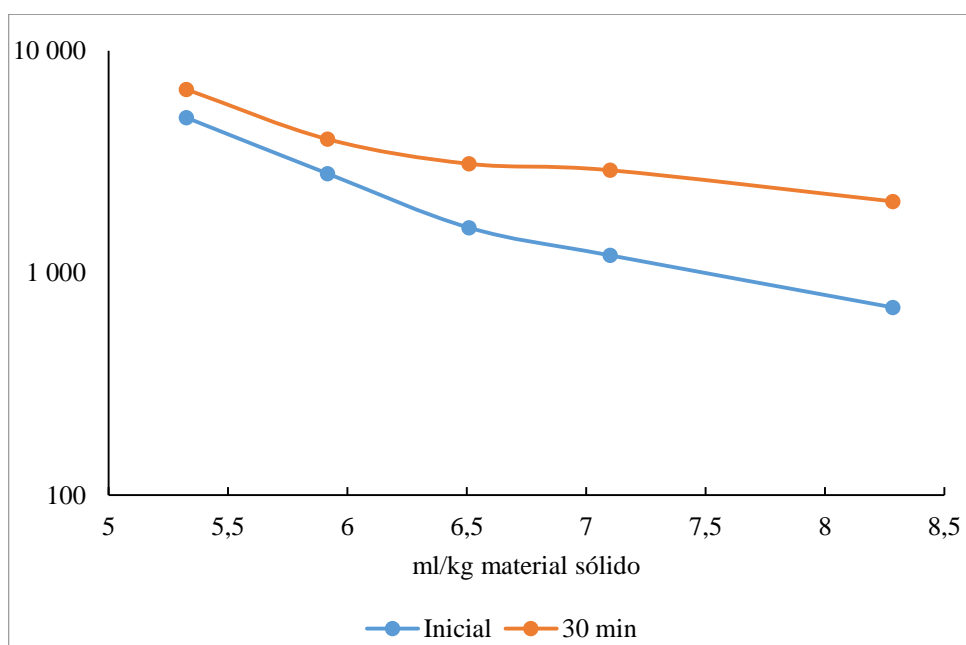


Figura 49 - Curvas de desfloculação e tixotropia da pasta de contramoldagem.

## 1.2. Controle de viscosidade

Uma vez que cada carga de barbotina para asas dura vários dias (é preparada nova carga cada vez que o tanque se aproxima do fim), testou-se a evolução da viscosidade e tixotropia da barbotina com o tempo, dias após a sua preparação (que resulta da diluição da pasta plástica, com adição de desfloculante para ajustar a viscosidade para o enchimento).

Os controlos de viscosidade efetuados a uma nova carga ao longo do tempo mostraram que a suspensão mantém estabilidade mesmo após 14 dias úteis, ou seja aproximadamente três semanas depois da sua preparação.

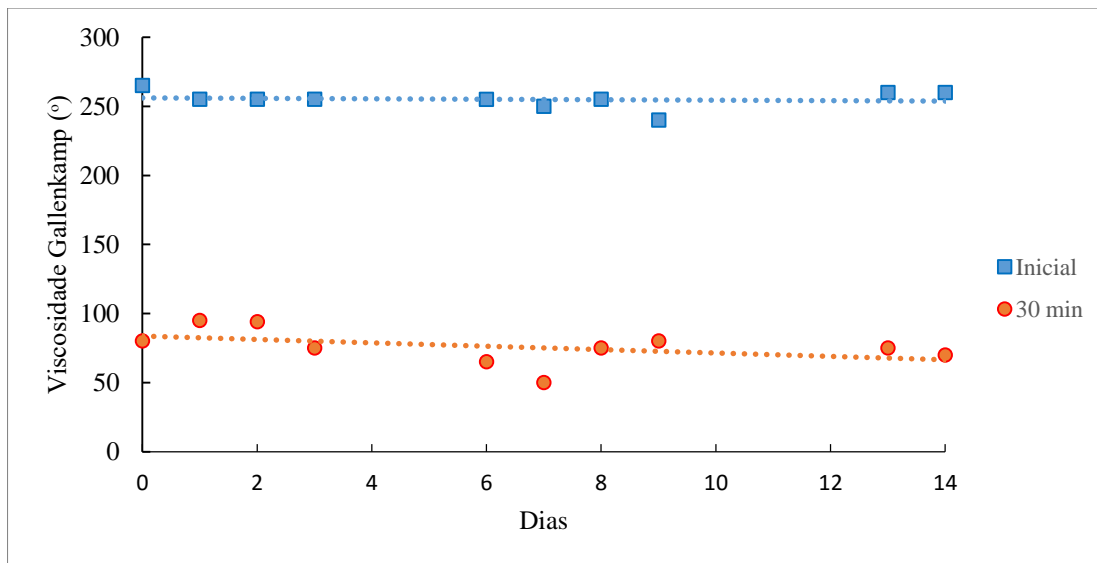


Figura 50 - Evolução da viscosidade da barbotina ao longo de vários dias.

De acordo com os gráficos da Figura 50, que representam os controlos feitos neste período, as características reológicas da suspensão ainda se encontram dentro de parâmetros aceitáveis, tanto a viscosidade inicial como a tixotropia (após o repouso de 30 minutos), não havendo degradação suficiente para afetar as suas propriedades. Tal deve-se à constante agitação no tanque de armazenamento e à ação do desfloculante utilizado (Dolapix PC67), que não se degrada durante este tempo ou, pelo menos, não o suficiente para afetar as características reológicas da suspensão de forma a prejudicar o enchimento.

Concluiu-se que em condições normais esta propriedade não tem efeito na ligação entre a asa e o corpo das chávenas, por não se verificaram defeitos relacionados com problemas de desfloculação, o que se refletiria logo no enchimento dos moldes com a barbotina.

## 2. Geometria

Um dos aspetos que contribui para a asa descolada é a geometria da peça, tanto da asa como do corpo. Ao reunir dados sobre a incidência do defeito nos diferentes modelos, constatou-se que os mais afetados são os de asa com maior dimensão, e com uma geometria que se projeta mais para fora do corpo, como o exemplo na Figura 51. As chávenas com asas

de um só ponto de colagem mostram maior tendência para sofrerem este defeito em relação às de dois pontos.

Um caso particular de influência da geometria é o do modelo de chávena da Figura 51. Como se pode observar, é uma asa de grande espessura, possuindo uma massa consideravelmente elevada, e o seu desenho projeta-se para fora do corpo, contribuindo para um centro de massa afastado da área de colagem. A forma do corpo, em cone invertido de elevada inclinação, é também desfavorável, tendo em conta que a cozedura é efetuada com a chávena apoiada na base, como na Figura 51 do lado direito, em que também se observa a asa caída. Este é o modelo de chávena que se revela como o mais problemático em termos de defeito de asa descolada.



Figura 51 - Chávena com asa na posição correta (esquerda) e chávena com asa caída depois da cozedura (direita).

Na temperatura máxima de cozedura, a cola funde parcialmente (fase líquida) adquirindo um estado viscoso, promovendo a sua difusão para o corpo e para a asa consolidando assim a ligação. As razões descritas nos parágrafos anteriores favorecem a ação da gravidade, que leva a asa a separar-se gradualmente do corpo, criando um vazio entre as duas superfícies que não é colmatado, enfraquecendo assim a união entre os dois componentes da chávena, levando ao caso extremo mostrado na Figura 51 do lado direito. Na Figura 52 é proeminente o arrastamento de material viscoso (tanto da cola como do vidrado) na cozedura, permitindo identificar o estágio da cozedura em que a asa se desprende do corpo, que foi durante a formação de fase viscosa.



Figura 52 - Asa caída, pormenor da zona de colagem.

A outra influência da geometria das peças na asa descolada provém do acabamento manual. Para eliminar o excesso de material necessário para o enchimento (os canais de alimentação nos moldes), é feito manualmente um corte na zona da asa que irá colar no corpo, usando um dispositivo como o da Figura 54. Este corte deve proporcionar uma superfície curva, que deve ser compatível com a curvatura exterior do corpo. A desafinação da lâmina de corte provoca variações nesta curvatura, conduzindo a defeitos como os da Figura 53.



Figura 53 - Defeitos causados por corte inadequado na fase de acabamento da asa.

Os modelos em gesso (Figura 46) criados para serem utilizados na secção de corte e acabamento das asas proporcionam um padrão para a curvatura de cada modelo, podendo ser utilizados para a afinação e ajuste da lâmina de corte, e também como um controlo de eventuais desafinações (devido às repetidas movimentações), ao seleccionar uma asa após acabamento e juntando-a com o padrão, simulando a operação de colagem. No caso de

deteção de imperfeição no corte da asa, em que as curvaturas não coincidem, é efetuada uma ação corretiva de reajuste da lâmina (indicado na Figura 54), contribuindo para eliminar imperfeições, que de outra forma só após a secagem ou cozedura seriam detetadas, uma vez que, como a cola é húmida e relativamente volumosa quando em verde, consegue ocultar este defeito na operação de colagem.



Figura 54 - Lâmina de corte de asas, posição em baixo. Parafusos de ajuste assinalados.

Não se observou influência na posição de cozedura, na situação em que chávenas são cozidas empilhadas boca-a-boca. Nem a posição superior, nem a inferior contribuem para maior incidência do descolamento da asa.

### **3. Humidade**

#### **3.1. Saturação dos moldes de gesso**

Procurou-se investigar a influência da saturação do molde pela água absorvida no processo de enchimento das asas. A massa do molde aumenta entre cada ciclo de enchimento, consistente com a absorção de água. O maior aumento decorreu nos primeiros dois ciclos, pois no início da produção o molde encontrava-se pouco húmido (apenas a humidade atribuída pelo ambiente do armazém), pelo que absorveu com facilidade uma grande quantidade de água. Na Figura 55 mostra-se a evolução do aspeto exterior dos moldes, neste caso do tipo tablete, em que é cada vez mais notória a água absorvida nos sucessivos enchimentos.



Figura 55 - Evolução da humidade contida nos moldes de gesso após os enchimentos.

Nos enchimentos seguintes, o aumento de massa foi menos notório, sendo cada vez menor até que quase não se verificou alteração, que é próximo do ponto de saturação do molde. No gráfico da Figura 56 observa-se a evolução da humidade absorvida pelo molde, representada em percentagem da saturação. Do início dos enchimentos até ao terceiro enchimento consecutivo, a evolução é quase linear, após o 3º enchimento a curva tende para uma linha horizontal.

A massa individual dos vários moldes não apresenta grande variação, por serem produzidos recorrendo às mesmas moldações e mantendo a razão água:gesso (1:1,2), pelo que o valor médio da massa dos moldes em cada ciclo já forneceu uma comparação direta suficiente para obter conclusões.

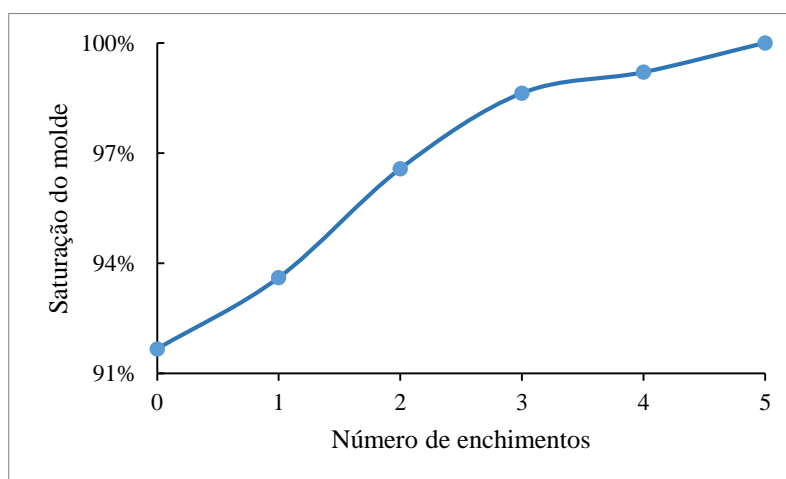


Figura 56 - Evolução da humidade absorvida pelo molde.

Este ponto, o 3º enchimento consecutivo, foi definido como ponto de saturação do molde, verificando-se menor aumento da massa em relação aos enchimentos anteriores, concluindo-se que o molde atingiu um ponto em que a sua capacidade de absorção de água

se encontra muito diminuída. Embora o molde ainda consiga absorver uma pequena quantidade de água, não é suficiente para a conformação adequada das peças.

Após este enchimento, caso não seja efetuada secagem intermédia dos moldes antes de novo ciclo, as asas não conseguem atingir consistência adequada, devido à elevada porção de água ainda existente no material, pelo que grande parte fica danificada na desmoldagem, pois ao não possuírem a consistência adequada, não são suficientemente resistentes para o manuseamento, deformando-se com muita facilidade.

Esta tendência para a saturação do molde é contrariada recorrendo a um ligeiro aumento da temperatura na estufa durante o tempo de conformação, que é aproximadamente 1h, variando conforme a espessura das asas. Com o ambiente mais quente da estufa, elimina-se alguma da humidade no gesso através da sua superfície exterior, à medida que a barbotina no interior perde a água. A temperatura da estufa encontra-se geralmente entre 25 e 35 °C, não sendo regulada para temperatura superior a 45 °C, uma vez que a partir dos 50 °C acontece degradação do gesso. Este aumento de temperatura é efetuado tendo em atenção os modelos de asa que no momento estejam a ser produzidos, pois temperaturas demasiado elevadas na estufa também podem levar a secagem excessiva de asas de menor secção, dificultando a sua desmoldagem, resultando em unidades quebradas.

Esta técnica não é totalmente eficaz, pelo que o molde acaba por ficar saturado um ou dois enchimentos depois, sendo necessária uma passagem do molde vazio pela estufa, para retirar água suficiente para o tornar adequado para novos enchimentos. Visto que geralmente são produzidas asas de mais do que um modelo diferente em simultâneo, esta secagem dos moldes pode ser feita enquanto outros moldes (para outros modelos) estão a ser utilizados, e durante operações de desmoldagem.

### **3.2. Influência do tempo de armazenamento de asas no conteúdo de humidade**

Avaliou-se a influência do tempo de repouso no armário e a perda de humidade resultante deste tempo no comportamento da união asa-corpo.

A colagem de asas com diferentes tempos de armazenamento não revelou diferenças no aspeto da ligação entre o corpo e asa, não havendo relação direta entre grau de descolamento (visível ou invisível do exterior) e o tempo entre acabamento, como se pode verificar na Figura 57, em que as várias asas coladas no corpo apresentam defeitos semelhantes, observando-se o mesmo aspeto da zona de colagem (colada na zona mais exterior da asa, mas mostrando uma zona oca no centro).





Figura 57 - Asas de diferentes idades (2 dias; 1 dia; dia da colagem)

Num ensaio semelhante, mas com uma asa colada por chávina, e que abrangeu maior intervalo de tempo, confirmou-se que o tempo de armazenamento não influencia a qualidade da ligação corpo-asa. Neste ensaio verificaram-se 80 a 90% de não-conformidades em cada conjunto de amostras, mas esta perda foi transversal a todos os conjuntos de amostras, pelo que a sua origem foi diferente, não estando relacionada com o tempo de armazenamento, pois o modelo de chávina que se usou para este ensaio, visto na Figura 58, é o que apresenta maior incidência do defeito da asa descolada cuja geometria, como já visto, é propícia ao descolamento da asa.

Com a colagem de asas com diferentes tempos de armazenamento no armário, concluiu-se que a sua permanência durante longos períodos de tempo no armário não tem influência na condição das asas para colagem.



Figura 58 - Chávina usada no ensaio de tempo de armazenamento.

O armário tem um ambiente com humidade relativa elevada, atribuída pela água colocada em tabuleiros no seu interior, como destacado na Figura 59, onde são claramente visíveis esses tabuleiros brancos. A temperatura é estável, pois o armário possui isolamento. Existe alguma secagem das asas, mas esta processa-se de forma muito lenta, o que é benéfico evitando-se variações dimensionais bruscas. A abertura das portas para colocar ou retirar asas leva a alguma circulação do ar, o que acaba por contribuir para uniformizar as condições no seu interior.



Figura 59 - Armário de armazenamento das asas. São visíveis os tabuleiros com água.

Verificou-se que mesmo após 10 dias após o acabamento das asas ser concluído, estas ainda se encontram em condições aceitáveis para continuar a produção. Apenas aconteceu rejeição de um conjunto de unidades que se encontrava há quase três semanas em armazenamento, uma situação em que as asas já tinham ultrapassado o ponto de consistência de couro, apresentando-se notoriamente secas. Desde que mantida alguma água nos tabuleiros no interior do armário, o ambiente húmido manter-se-á estável, mantendo a conformidade das peças por vários dias.

### **3.3. Secagem da pasta: curva de secagem.**

Para estudar a secagem das variantes de pasta (PC e PT) e a influência dos processos de conformação, efetuou-se o ensaio de Bigot. Na Figura 60 estão representadas as curvas de secagem (curva de Bigot) dos dois tipos de pasta de utilizados nos processos produtivos, que foram conformadas por diferentes processos: enchimento por gravidade, enchimento por alta pressão e contramoldagem. A pasta de contramoldagem (PT) é usada também para o enchimento das asas (após diluição e ajuste reológico) sendo efetuado um provete para o ensaio. Analisou-se também o comportamento da secagem da pasta de alta pressão (PC) quando conformada por enchimento por gravidade.

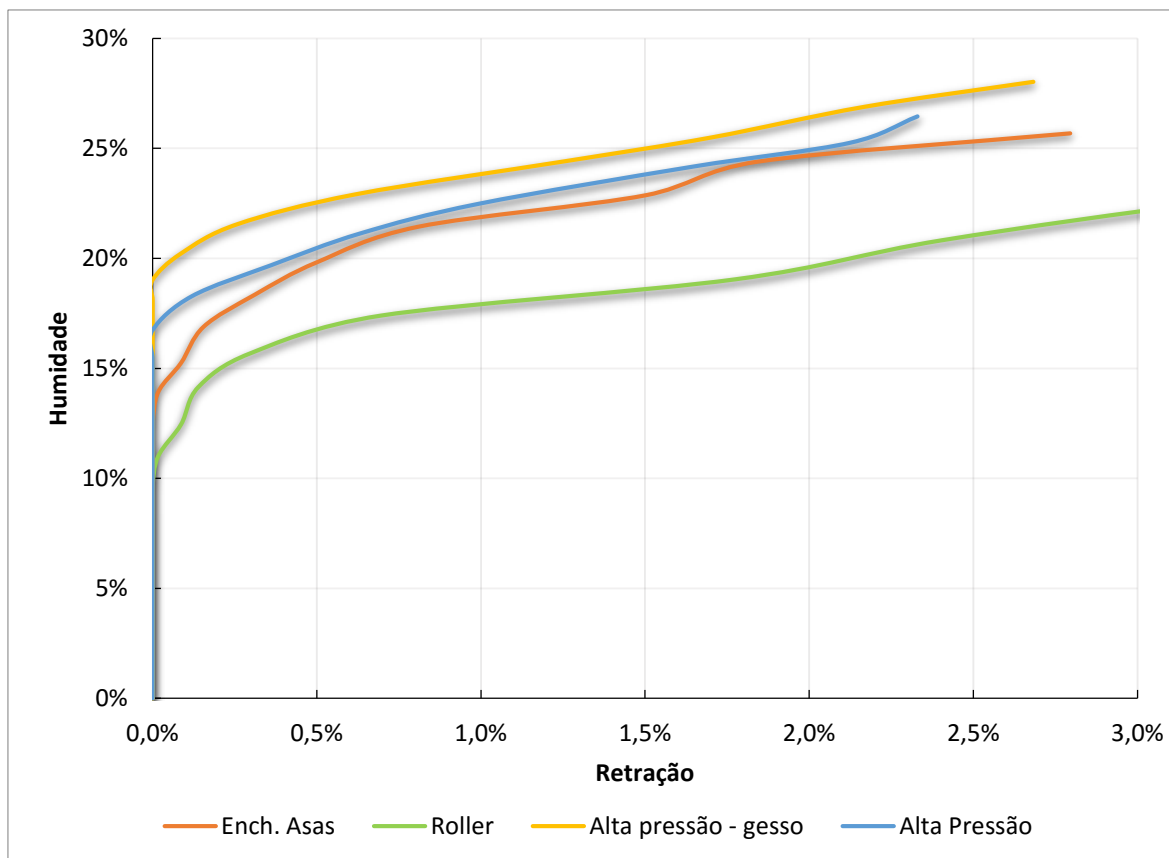


Figura 60 - Curvas de Bigot das pastas de alta pressão e de contramoldagem.

“Ench. Asas”: barbotina do enchimento das asas (PT asas);

“Roller”: conformado por contramoldagem (pasta PT);

“Alta pressão – gesso”: pasta de alta pressão (pasta PC), conformada por enchimento por gravidade;

“Alta Pressão”: conformado por alta pressão (pasta PC).

Observando os gráficos, verifica-se imediatamente que o declive das quatro curvas durante o regime linear é semelhante, levando a assumir-se que em qualquer caso a densidade em seco dos diversos casos é muito aproximada, tal como a velocidade de secagem durante o regime linear<sup>[22]</sup>. O arco das curvaturas do regime de retração não linear pode indicar comportamento diferente da secagem de argilosos.<sup>[22]</sup> Segundo esta referência, um arco com curvatura mais apertada indica um material mais plástico, no entanto não se observam diferenças consideráveis nestes casos.

A forma das curvas de Bigot fornece ainda indicações sobre o comportamento das pastas, como o conteúdo crítico de humidade. Neste ponto, a humidade presente na amostra resume-se à humidade intersticial (os espaços entre as partículas), e a partir deste ponto a peça já não pode retrair muito mais.

Para a pasta PT verificou-se um conteúdo crítico de 16%, se for conformada por contramoldagem, e aproximadamente 19% por enchimento tradicional, que é o que acontece normalmente na produção de chávenas. Para a pasta de alta pressão (PC), os conteúdos críticos de humidade são superiores, sendo de aproximadamente 20% na conformação por alta pressão, e 21% se for conformada por enchimento tradicional.

Quanto mais elevado for o conteúdo de água intersticial, mais fácil se torna a secagem do material argiloso, uma vez que a retração termina mais cedo no processo de secagem. O primeiro estágio de secagem, em que se verifica a retração, é a fase mais crítica, sendo necessárias cuidados de forma a evitar defeitos como deformações ou fissuras à superfície,

visto que a água é eliminada da superfície. A partir do ponto em que resta a água intersticial (água presente nos poros entre as partículas, após a retração completa), o processo pode ser mais acelerado, recorrendo-se a temperaturas mais elevadas. Como se constata pelas curvas de Bigot, a secagem de peças produzidas com a pasta PC é mais simples, terminando a retração (1º estágio de secagem) mais rapidamente quando comparada com a pasta PT. Obviamente, não se podem descurar outros fatores importantes como a forma e tamanho da peça, mas estes fatores não têm relação com as propriedades pasta de porcelana usada.

Estas diferenças nas curvas de Bigot comprovam também que o processamento da mesma pasta por diferentes processos influencia o comportamento em secagem, com os processos mais mecanizados apresentando menor teor em água intersticial, verificando-se o mesmo para ambas as variantes da pasta de porcelana. Conclui-se que estes processos proporcionam uma distribuição mais compacta das partículas argilosas do que o processo tradicional de enchimento, devido às forças envolvidas de maior magnitude nos processos de alta pressão e de contramoldagem, existindo maior aproximação das partículas devido às forças aplicadas e à menor quantidade de água necessária para efetuar a conformação.

Uma das possíveis causas do descolamento da asa poderia estar relacionada com o diferencial de humidade entre a asa e o corpo, dependendo do conteúdo restante em humidade. A especificação de produção indica que a diferença de humidade entre a asa e o corpo, não devendo exceder os 3 pontos percentuais, não havendo indicação do conteúdo total.

De acordo com informações compiladas no histórico de produção, não se verificou uma correlação direta entre o diferencial de humidade e o descolamento da asa, visto que por vezes tal acontecia mesmo com a produção dentro dos parâmetros estipulados. O conteúdo de humidade do corpo à saída da máquina *roller*, antes da colagem da asa, varia entre 15,5% e 19,5%, influenciado sobretudo pela espessura da peça. A colagem de asas com humidade superior a 20,5% ou inferior a 18% é, como registado no histórico, um acontecimento raro. Neste intervalo, a retração que as asas irão sofrer na secagem é já muito baixa, embora não possa ser desprezada. Uma vez que o corpo se encontra também bastante próximo do ponto em que apenas possui água intersticial, a separação dos dois componentes devida a retração em secagem é pouco provável.

Apesar de as percentagens de humidade na altura da operação de colagem se encontrarem dentro de parâmetros aceitáveis, convém no entanto não descurar os resultados da curva de secagem, sendo estes úteis para estabelecer uma janela de segurança quanto ao conteúdo em humidade das peças. Medindo o nível de humidade das peças (corpo e asa) e situando o ponto nas curvas de secagem, é possível prever a retração que cada peça irá sofrer na secagem. Quanto mais aproximado for o valor da retração entre as duas peças, menor a possibilidade de se desenvolverem problemas e colagem durante a secagem, causados por retração diferencial entre a asa e o corpo (Figura 61).

Uma vez que antes da operação de colagem as asas ficam em repouso num ambiente controlado, mas que pode sofrer variações, vários dias de armazenamento podem levar a que as asas sequem excessivamente, tornando-se inadequadas para serem utilizadas. Como existe esta pequena perda de humidade, a rápida medida da humidade de uma asa com recurso à balança de humidade (controlo efetuado regularmente), verifica se o seu conteúdo está dentro de limites aceitáveis,

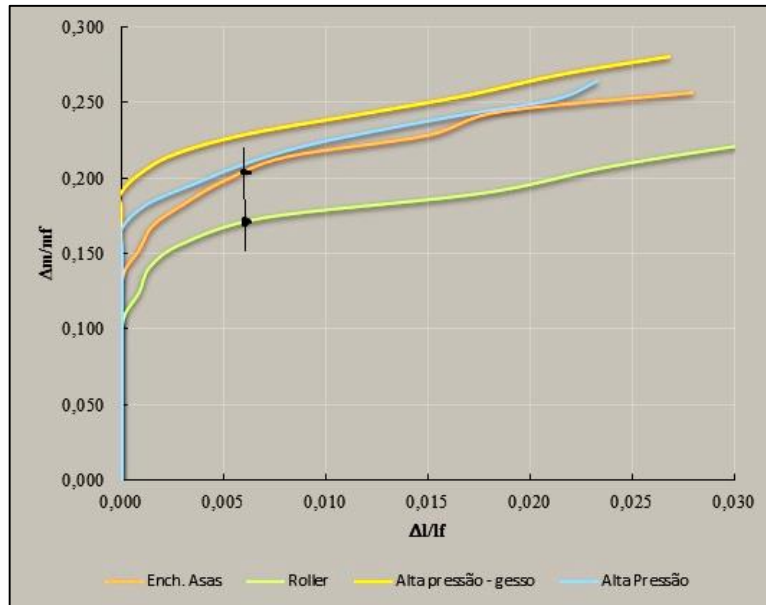


Figura 61 - Curvas de Bigot: marcação dos pontos de igual retração.

Uma forma de evitar efeitos negativos provenientes de diferentes taxas de retração na secagem das asas e corpos seria efetuar a colagem após a secagem de ambos os componentes entrarem no regime de retração nula. Esta abordagem é no entanto pouco prática, uma vez que adicionaria complexidade desnecessária ao processo produtivo, requerendo mudança no *layout* da linha, sem que tal resultasse em melhorias significativas.

No caso de se utilizarem pastas e processos de conformação que resultem em comportamentos muito diferentes na secagem, seriam expectáveis complicações na ligação corpo-asa devido a diferentes taxas de retração, o que seria facilmente verificado recorrendo a um ensaio de Bigot para escolher as taxas de humidade adequadas para a operação de colagem.

## 4. Conformação

### 4.1. Velocidade de formação de parede

As pastas cerâmicas utilizadas nos processos de contramoldagem e de alta pressão possuem ligeiras diferenças na composição e na granulometria. Algumas diferenças no comportamento das duas pastas em condições semelhantes são expectáveis, uma delas a velocidade de formação de parede. No ensaio efetuado, a pasta de alta pressão (PC) manifestou conformação a uma velocidade superior no enchimento por gravidade, atingindo espessura de parede 50% superior comparativamente à pasta plástica diluída usada para produzir as asas, como se observa nos gráficos da Figura 62.

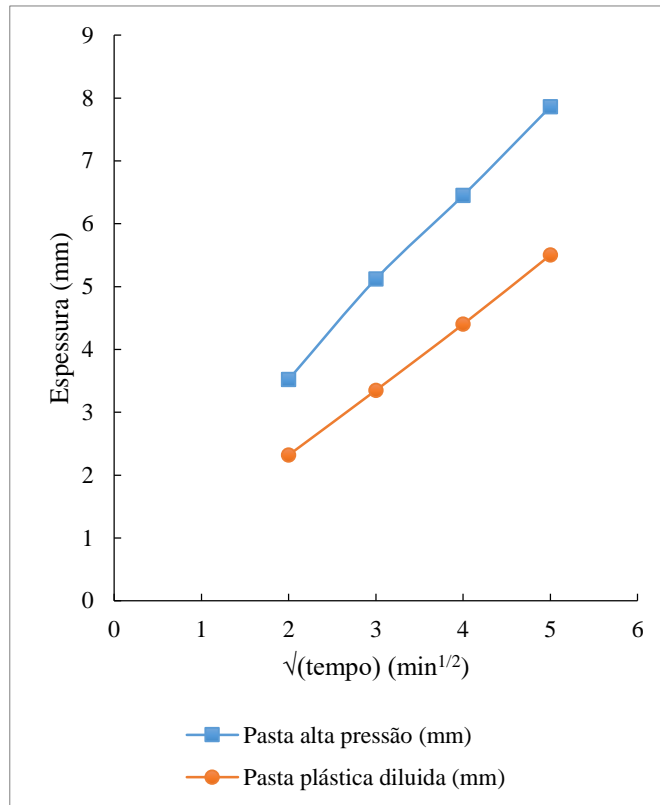


Figura 62 - Representação gráfica de velocidade de formação de parede de duas pastas: alta pressão e contramoldagem diluída.

No caso em estudo, é mais correto definir a formação de parede como duas vezes a formação de parede, uma vez que estas asas não são ocas, a sua parede forma-se desde a superfície do molde até ao centro, fechando a peça.

Em termos de produção, estes resultados permitiram criar uma simples tabela de referência para a conformação das asas, com a indicação de tempos mínimos de conformação total das asas (o tempo mínimo antes de se verter o excesso de barbotina nos moldes de discos) para cada modelo.

#### 4.2. Enchimento de asas usando a pasta do enchimento de alta pressão.

Procedeu-se a um enchimento de asas, substituindo a pasta PT diluída pela pasta PC (do processo de alta pressão) sabendo-se que esta pasta, otimizada para enchimento de alta pressão, tem algumas diferenças em relação à pasta PT, como a inclusão de matérias-primas mais duras. Estudaram-se as diferenças em conformação e a influência no comportamento da ligação asa-corpo.

O enchimento dos moldes de asas com pasta do processo de alta pressão resultou em grau de fissuração muito inferior ou mesmo inexistente no caso de asas de menores dimensões, quando comparado com o uso da pasta PT.

O processo de enchimento tradicional possui algumas limitações na produção de peças maciças, como o caso das asas em estudo, originando as fissuras frequentemente verificados, presentes no centro da peça. As fissuras desenvolvem-se no estágio final da conformação, durante a organização de partículas no centro da peça, manifestando-se apenas durante o

estágio final de secagem (Figura 63), fase em que já se efetuou a colagem ao corpo, pelo que estas se encontram ocultas.



Figura 63 - Asa seca (pasta PT), evidenciando as fissuras originadas no enchimento.

As fissuras tornam-se ainda mais evidentes e com maior dimensão após a chocotagem (Figura 64) e cozedura (Figura 65), consequência da retração que se processa durante a cozedura. Verifica-se maior incidência em asas de maior dimensão, em especial nas de maior espessura, devido ao maior volume de material envolvido. A morfologia destas leva a concluir que a sua origem está na conformação das asas, durante a formação de parede ainda dentro da cavidade do molde, existindo relação com a orientação preferencial das partículas da suspensão.



Figura 64 - Área de colagem de asa chocotada (pasta PT).



Figura 65 - Área de colagem de asa após cozedura (pasta PT).

O uso da pasta de alta pressão (PC), por seu lado, resultou em menos fissuras na asa em relação à pasta PT, ao ponto de estas não se manifestarem em asas de pequena dimensão, o que foi observado removendo as asas (Figura 66). Isto refletiu-se na ausência de asas descoladas nas unidades deste ensaio, devido a uma melhor ligação entre a asa e o corpo.

A redução da incidência destas fissuras proporciona uma colagem mais eficaz, uma vez que a interface de colagem é de área superior. Também importante, o ângulo da concavidade da área de colagem da asa, entre antes e depois da cozedura, é menor, pelo que não se afasta da circunferência exterior do corpo, proporcionando um “encaixe” com maior precisão (comparar Figura 66 com Figura 67).



Figura 66 - Aspeto de asas conformada com pasta PC. Note-se a ausência ou baixa incidência de fissuras.



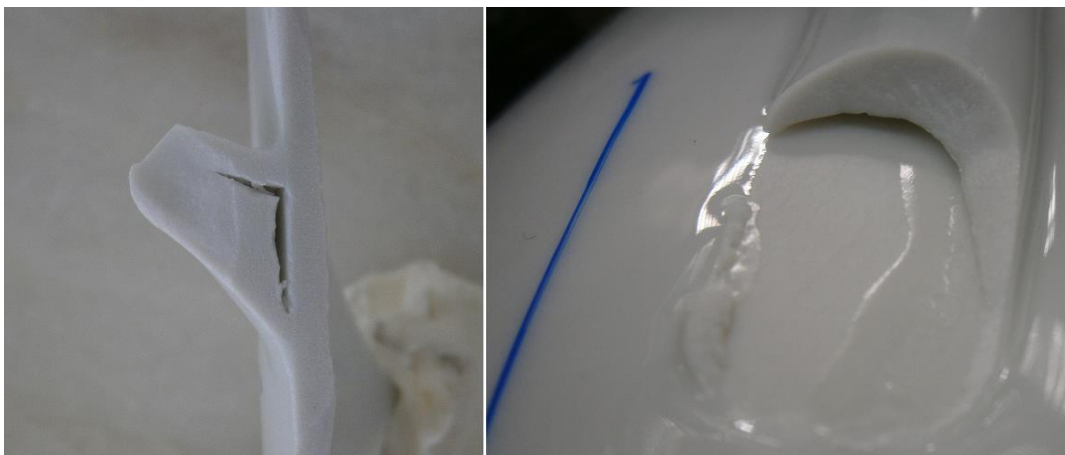


Figura 67 - Afastamento do entre o corpo e a curvatura da área de colagem da asa.

A principal explicação está na caracterização das pastas. Sabe-se que a pasta de alta pressão difere ligeiramente da pasta plástica habitualmente usada para o enchimento das asas, nomeadamente em distribuição granulométrica e na composição mineralógica, com a inclusão de materiais mais duros, sob a forma de uma porção de porcelana moída após cozida ou chacoalhada, da mesma composição para não criar variações na composição final. A velocidade de formação de parede da pasta PC é também superior (Figura 62). Estas características contribuem para o diferente comportamento de ambas as pastas, com a pasta para alta pressão (PC) possuindo plasticidade inferior à pasta de contramoldagem (PT). Este comportamento menos plástico foi evidente no corte do excesso de material da moldagem das asas.

As duas pastas têm a mesma composição química, como registado na Tabela 6. As ligeiras variações resultam das ligeiras flutuações encontradas nas matérias-primas naturais, algo perfeitamente normal em cerâmicos tradicionais.

Tabela 6 - Composição química das pastas PT e PC.

<b>Óxido</b>	<b>Contramoldagem (PT)</b>	<b>Alta Pressão (PC)</b>
SiO <sub>2</sub> (%)	64,5	64,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	24,0	24,2
K <sub>2</sub> O (%)	3,19	3,10
Na <sub>2</sub> O (%)	0,63	0,63
MgO (%)	0,14	0,17
CaO (%)	0,19	0,18
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,40	0,40
TiO <sub>2</sub> (%)	0,04	0,02

A granulometria das pastas por seu lado, apresenta diferenças mais significativas. A distribuição granulométrica da pasta de alta pressão é um pouco mais alargada relativamente à pasta de contramoldagem, refletindo-se no tamanho médio de partícula da pasta de alta pressão ligeiramente superior.

Estas diferenças nas distribuições granulométricas podem ser observadas detalhadamente na Figura 68 e na Figura 69. Ao comparar os gráficos nas duas figuras, é fácil constatar que a pasta de alta pressão é composta por mais partículas de tamanho superior

a 20  $\mu\text{m}$  em relação à pasta de contramoldagem, destacando-se um pequeno “pico” visível na representação gráfica entre os 30 e 40  $\mu\text{m}$ .

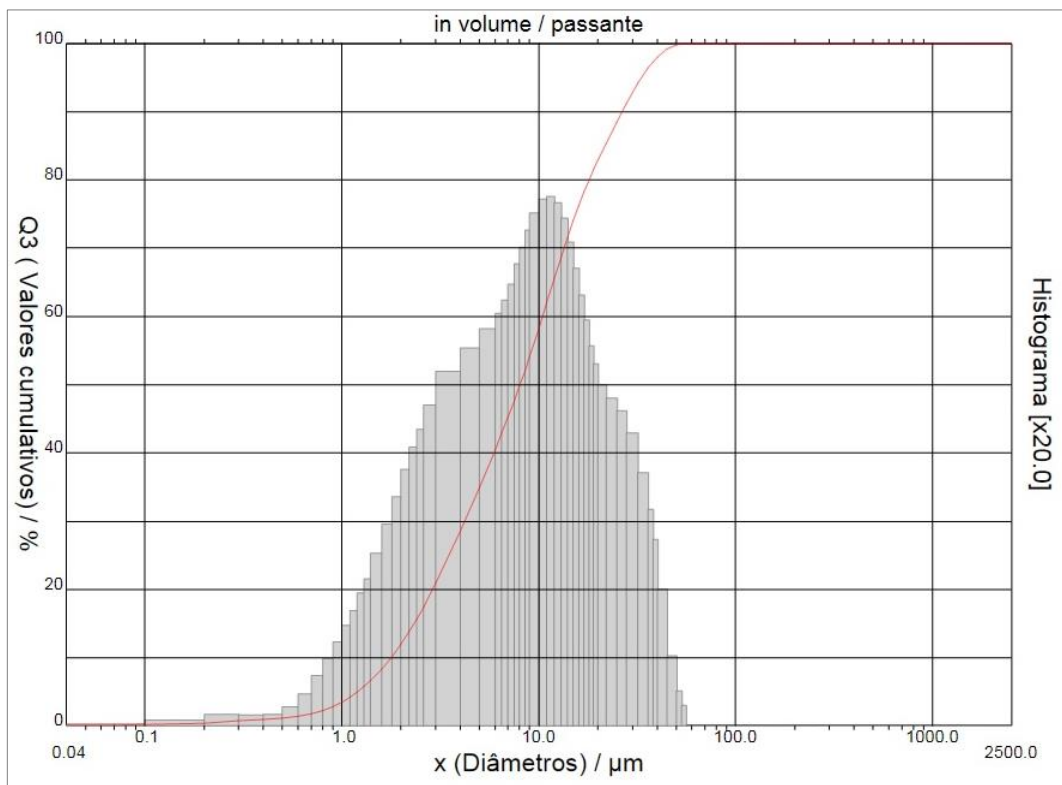


Figura 68 - Distribuição granulométrica da pasta PT.

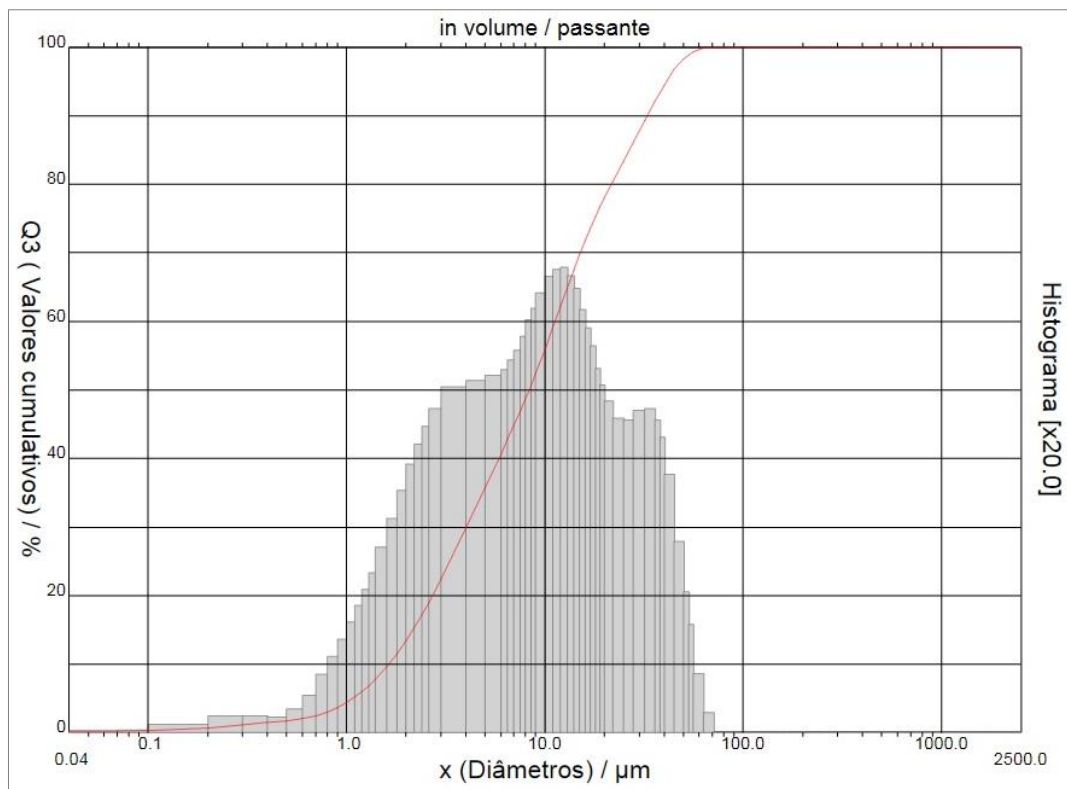


Figura 69 - Distribuição granulométrica da pasta PC.

Estes dados permitem explicar as diferenças em conformação observadas com o enchimento manual recorrendo às duas pastas. O enchimento com a pasta de alta pressão manifestou uma diminuição de fissuras internas em relação à habitual pasta de contramoldagem. Os fatores que terão contribuído mais para tal são a granulometria mais alargada, e a inclusão de maior proporção de matérias-primas duras, cujas partículas têm tamanho médio superior e forma mais aproximadamente esférica do que as plásticas, que possuem forma mais planar. Isto conduz a uma abertura da estrutura da conformação, com uma formação de parede mais rápida, que contribui para contrariar a tendência para a criação de fissuras no seio da peça, que são originadas no final da formação da dupla parede no enchimento das peças maciças, com o impacto negativo na ligação asa-corpo que se verifica com o enchimento usando a pasta PT.

### 4.3. Enchimento com mistura de pastas

Apesar do impacto positivo da utilização da pasta PC na ligação corpo-asa, observou-se um efeito negativo na fase do acabamento. Devido à menor plasticidade da pasta PC, o corte do excesso de material dos canais de enchimento dos moldes é pouco limpo, isto é, resulta numa superfície de corte excessivamente rugosa, com perda de material nas arestas, ficando com o aspeto da Figura 70 (as unidades apresentadas já se encontravam secas no momento em que foram fotografadas).



Figura 70 - Asas de enchimento manual com pasta PC, verificando-se a imperfeições de corte.

Esta perda de material cria resíduos de pequena dimensão que, como as peças ainda estão em verde e com considerável conteúdo em humidade, aderem facilmente à superfície, pelo que a asa adquire imperfeições superficiais. Os resíduos aderem também às esponjas das caixas de armazenamento (usadas para evitar danos nas asas em verde), tendo a tendência para aumentarem em utilizações sucessivas, requerendo uma limpeza muito mais cuidada e mais frequente do que a habitual, adicionando complexidade que de outra forma seria desnecessária a este processo. Nesta fase, estes resíduos são quase impercetíveis, pelo que as imperfeições apenas são detetadas depois da segunda cozedura, no controlo de qualidade

final, fase em que já não é possível proceder a retoque, pelo que a peça é imediatamente rejeitada.

A aplicação ao processo produtivo desta substituição da pasta *roller* pela pasta de alta pressão foi, por isso, rejeitada. A principal razão para tal deve-se a que, apesar do melhoramento do defeito em estudo, se criou outro problema (excesso de resíduos) que resultou na rejeição de um terço das peças do ensaio devido a resíduos na superfície, o que em termos práticos não é o resultado final desejado, que é o da redução da porção de unidades não conformes.

Anteriormente, o enchimento das asas era feito com a mesma barbotina da secção de olaria (designação da secção da fábrica onde é feito o enchimento manual de várias peças ocas), que mistura pasta proveniente de aparas provenientes do processo de alta pressão e do processo *roller*. A partir de certo ponto, o enchimento das asas passou a ser efetuado com a pasta plástica diluída, que resultou em diminuição de resíduos, devido à maior plasticidade que contribui para um corte mais “limpo” do excesso de material.

Tendo em conta esta modificação, procurou-se obter um compromisso entre os resultados da utilização da pasta plástica (menos resíduos) e os bons resultados conseguidos com recurso à barbotina de alta pressão, em que se reduziu drasticamente o descolamento da asa.

Os resultados dos enchimentos efetuados com as referidas misturas foram de encontro ao esperado, eliminado ou reduzindo os resíduos, enquanto mantendo a colagem eficaz das asas. Foram testadas várias misturas, representadas na Tabela 7, das quais o melhor resultado, em termos de percentagem de defeitos de asa descolada e dos resíduos, foi obtido com a percentagem volúmica de 60% de pasta de olaria e de 40% de pasta *roller* proveniente do normal enchimento das asas.

Tabela 7 - Comparação de porção de defeitos com diferentes misturas de pasta.

	% Volúmica (olaria-pasta PT)	Unidades não conformes	
		Asa descolada	Resíduos
<b>1</b>	75% - 25%	6%	11%
<b>2</b>	60% - 40%	0%	0%
<b>3</b>	50% - 50%	4%	5%
<b>4</b>	25% - 75%	>7%	0%

Um dos efeitos da utilização da composição 60% olaria-40% PT foi a redução do grau de fissuração em relação ao uso da pasta PT diluída (embora superior ao que se verificou usando apenas pasta de alta pressão). A redução da incidência destas fissuras proporciona uma colagem mais eficaz, uma vez que a interface de colagem é de área superior, como já se obtivera quando se utilizou a pasta do processo de alta pressão.

Nas Figura 71 e Figura 72 demonstra-se o que foi descrito no parágrafo anterior: na esquerda, apresenta-se uma chávena da produção normal à qual foi arrancada a asa no ponto crítico (da colagem), sendo possível observar que a asa estava unida ao corpo apenas pela margem mais exterior da superfície de colagem, com a zona central apresentando o brilho característico do vidrado, o que é natural uma vez que a cola é composta maioritariamente por vidrado (79%); à direita apresenta-se uma das chávenas do teste da asa com a composição **2** (ver Tabela 7), com a asa arrancada no mesmo ponto, sendo notória uma maior

área de união entre corpo e asa. A fissuração é também menor na asa da direita, não afetando a asa à mesma profundidade como no caso das chávenas da esquerda.



Figura 71 - Aspeto de zona de colagem da asa. Esquerda: pasta PT; direita, 60% olaria + 40% PT.



Figura 72 - Aspeto da asa. Esquerda: pasta PT; direita, direita, 60% olaria + 40% PT.

Para ser possível esta observação, a asa foi removida manualmente com recurso a um alicate, e no segundo caso foi necessário aplicar uma força superior para possibilitar a separação da asa do corpo da chávena, evidenciando um dos efeitos mais importantes da melhor colagem da asa: o aumento da resistência mecânica da união asa-corpo, que é uma das zonas mais frágeis de uma chávena.

#### **4.4. Enchimento de asas por alta pressão**

A colagem de asas produzidas por alta pressão serviu para testar o comportamento destas asas quando coladas em chávenas, utilizando a mesma cola rápida do processo de produção das chávenas. A Vista Alegre produz peças por enchimento de alta pressão; no entanto, estes equipamentos não se encontram adaptados para a produção de asas de chávena, pelo que se usaram peças já conformadas, fornecidas por outra empresa.

As unidades usadas para tal ensaio são conformadas com a pasta de porcelana dura usada pela empresa que efetuou o seu fornecimento, desconhecendo-se as suas propriedades e composição exatas, assumindo-se que não existem diferenças significativas na composição.

Nos resultados da análise por difração de raios-X (DRX), constatou-se que ambas as amostras de porcelana cozida produziram picos definidos nas mesmas posições  $2\theta$ , visíveis nos difractogramas da Figura 73 (amostra da Vista Alegre) e da Figura 74 (amostra de porcelana externa), e que são correspondentes ao quartzo e à mulite. Estas são as duas principais fases cristalinas da porcelana e, pela altura relativa entre os picos destas nas duas figuras, é possível assumir que em ambas as amostras de porcelana a proporção entre as fases de quartzo e mulite é muito aproximada, pelo que se conclui que as porcelanas são semelhantes.

As porcelanas diferem na proporção de fase vítrea baseada em sílica, em que o difractograma da Figura 73, correspondente à porcelana da Vista Alegre, manifesta uma “bossa” na banda entre  $2\theta=20^\circ$  e  $30^\circ$ , permite concluir que esta amostra é mais rica nesta fase, comparativamente com a porcelana de origem externa.

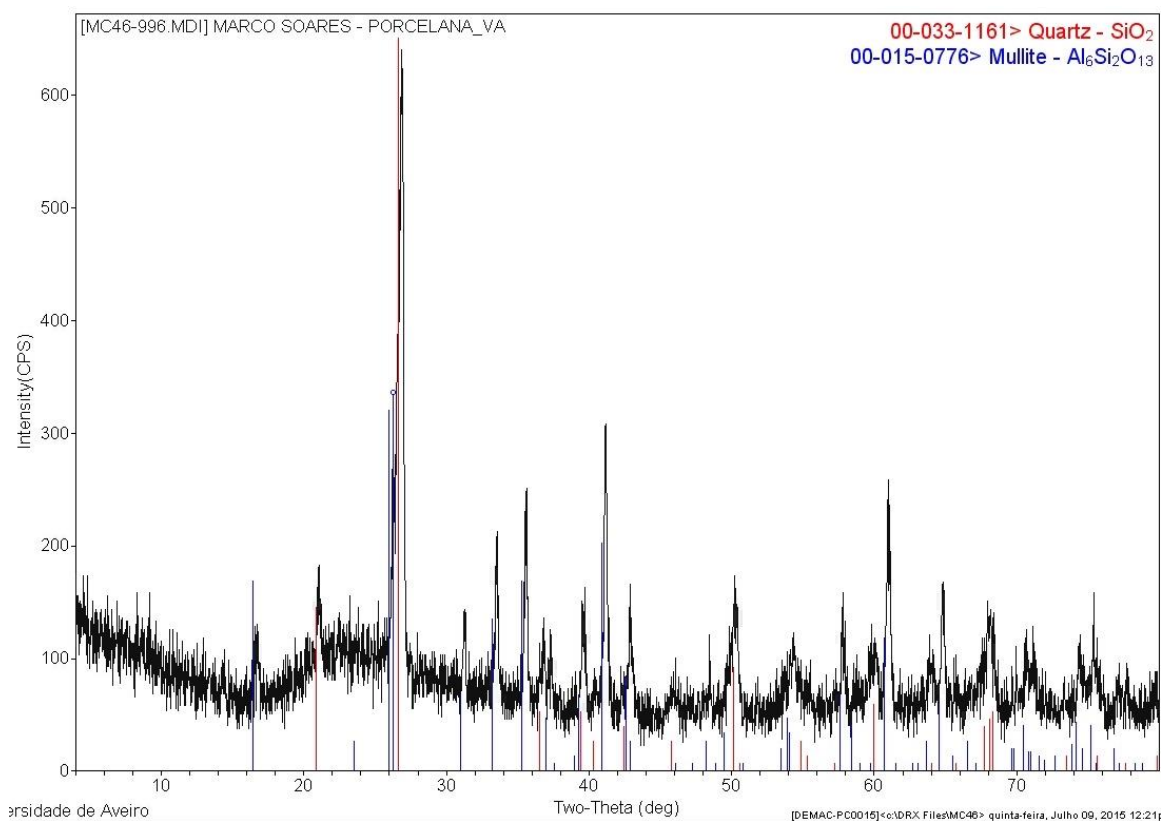


Figura 73 - Difractograma de raios X de porcelana da Vista Alegre.

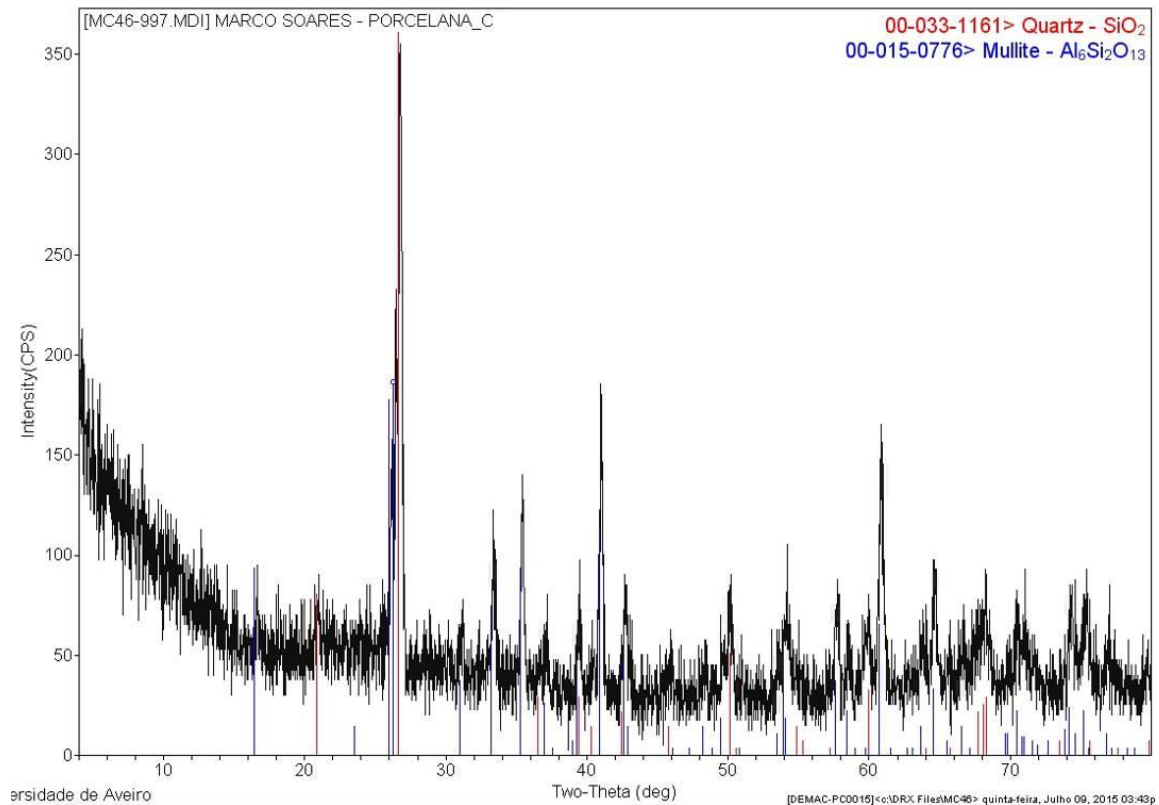


Figura 74 - Difractograma de raios X de porcelana de origem externa.

Não existem dados na análise de DRX que possam relacionar estas ligeiras diferenças com a eficácia da colagem da asa, que é relacionada com o processo de conformação (como já visto) e não com a microestrutura da porcelana.

O desenho destas asas não se considera importante, apenas a configuração de asa de um ou dois pontos de colagem foi considerada, selecionando-se os corpos de chávena que melhor se adaptassem à geometria destas asas produzidas externamente.

O resultado do ensaio foi considerado positivo pelo aspeto macroscópico da ligação corpo-asa. Não se verificou qualquer descolamento de asas do corpo no caso das asas de dois pontos, apesar de, após o processo de chacoagem, se verificar que não existia ajuste dimensional perfeito.

No entanto, após a vidragem e cozedura final, as unidades com asa de dois pontos não revelaram descolamento e as de um ponto de colagem revelaram apenas um afastamento entre a asa e o corpo de pouca dimensão, observável apenas na zona inferior da chávena. Este descolamento parcial decorreu visto que a asa não é concebida para este modelo de chávena, logo o seu ajuste total na vertical não é possível. A zona superior, por seu lado, manifestou colagem perfeita a olho nu e, na zona inferior de separação, a asa aproximou-se do corpo e esta pequena falha acabou por ser colmatada pela camada de vidrado da peça.



Figura 75 - Chávenas com asas conformadas por alta pressão.

Com recurso à observação com lupa de um corte transversal à linha de colagem, verifica-se apenas uma ténue linha que se identifica com a camada de cola entre a superfície de colagem da asa e o corpo da chávena, como se mostra na Figura 76.

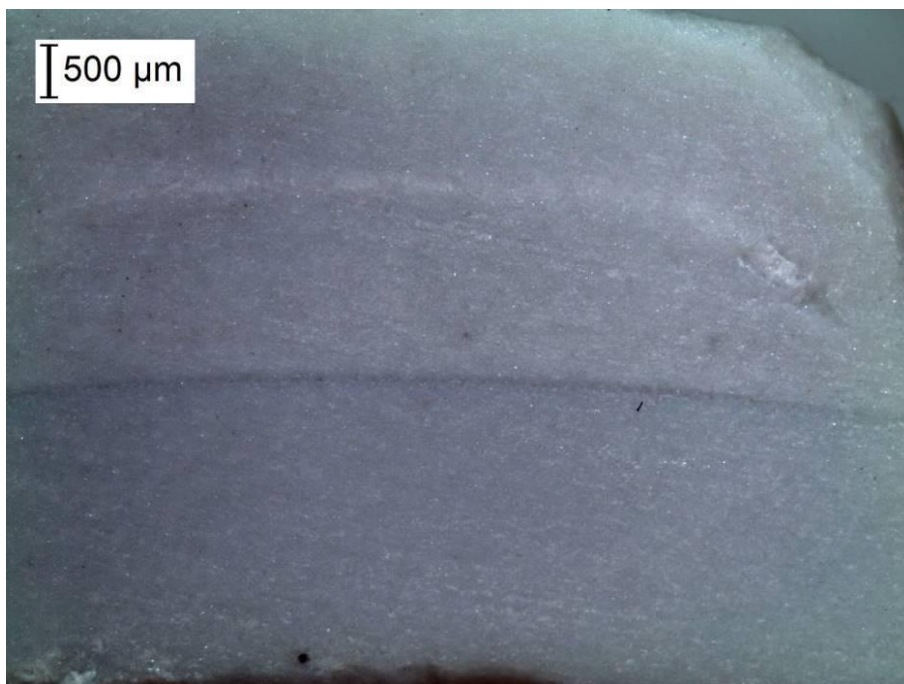


Figura 76 - Corte transversal de uma chávena na zona da asa. Observe-se a fina camada de cola entre o corpo e a asa. Ampliação de 12,5x.

Na Figura 77 apresenta-se uma amostra destas asas de alta pressão ao lado da amostra de uma chávena com asa produzida por enchimento (com a pasta de contramoldagem), observadas sob uma lupa na mesma ampliação de 35x. Esta comparação direta clarifica a diferença entre a colagem nas duas amostras. A linha da direita é mais espessa, sendo facilmente mais visível a camada de cola rápida, além de mostrar mais irregularidades na superfície de contacto.



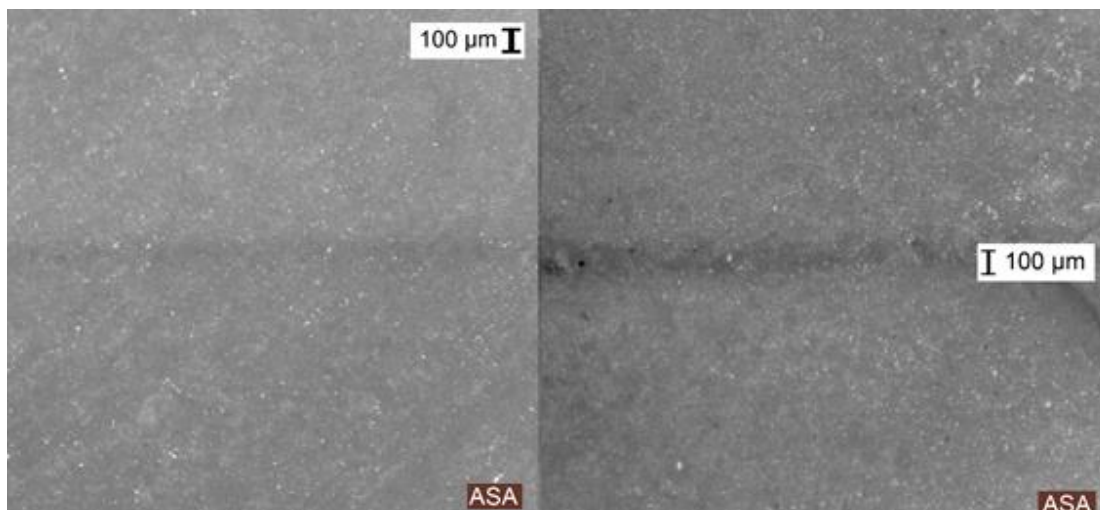


Figura 77 - Asa conformada por alta pressão (esquerda) e asa conformada por enchimento (direita)  
Ampliação de 35x.

A fissuração que se verifica em asas conformadas pelo processo de enchimento tradicional não se encontra presente nas asas conformadas por alta pressão, devido a diferente organização das partículas, com um preenchimento mais eficaz das cavidades do molde, devido à aplicação da pressão na pasta de enchimento. Na Figura 78 estabelece-se uma comparação do aspeto final, entre uma asa de enchimento tradicional e uma asa de enchimento de alta pressão. Note-se a evidência das fissuras numa das asas, que corresponde à asa de enchimento tradicional (com pasta PT). Ambas as asas seguiram o mesmo processo após serem conformadas, isto é, foram coladas, secadas e cozidas como qualquer outra unidade da produção de chávenas, pelo que as diferenças observadas tiveram origem anterior à colagem. A face de colagem da asa mostra alguma falta ou excesso de material, por ter sido quebradas da peça.



Figura 78 - Asa de enchimento tradicional e asa de enchimento por alta pressão. Verifica-se a ausência de fissuras na asa conformada por alta pressão

Uma vantagem da conformação pelo processo de enchimento de alta pressão é de estas asas não requererem operações de acabamento tão detalhadas. A alimentação de pasta no molde de alta pressão (gito) é feita por um canal de diâmetro muito baixo, localizado na superfície de colagem da asa, sendo muito simples a remoção do excesso de material,

produzindo poucas aparas e, mais importante, não interferindo com a geometria da superfície. Outra vantagem prende-se com a boa reprodutibilidade das dimensões das peças, evitando-se variações indesejadas nas peças.

Na análise deste ensaio procedeu-se à medição da absorção de água das amostras de origem externa, que foram comparados com os valores médios da porcelana produzida nas instalações da Vista Alegre. Estes valores servem apenas como uma comparação, uma vez que se desconhecem os parâmetros de enchimento das asas conformadas por alta pressão. O valor da absorção de água da porcelana de origem externa após a chacotagem é ligeiramente superior à porcelana de alta pressão da Vista Alegre, mas esta diferença é suficientemente baixa (1%) para não ser considerada relevante, atestando as semelhanças entre as duas porcelanas.

Tabela 8 - Valores de absorção de água das porcelanas.

<b>Amostra</b>		<b>Absorção de água (valor médio)</b>
<b>Chacotado</b>	Asa alta pressão (externa)	26,8 %
	Alta pressão (Vista Alegre)	25,8 %
	Contramoldagem (chávenas)	20,7 %

Os resultados deste ensaio serviram, sobretudo, para estudar a colagem com asas conformadas por alta pressão, caso no futuro a empresa estude a possibilidade de adaptar esta tecnologia para a conformação de asas não ocas.

# Conclusões

Neste caso, o defeito observado deve-se majoritariamente a um problema na conformação da asa, causado por uma pasta que não tem o desempenho adequado para o processo de enchimento por barbotina em peças maciças, devido a alguma dificuldade no fecho do seio da peça. A outra origem do defeito é geométrica, e prende-se com o acabamento, em que a resultante curvatura da área de colagem da asa por vezes não coincide na totalidade com a curvatura do corpo. O desenho da peça (asa e corpo) pode também ser mais propício para o descolamento da asa, embora seja um caso menos comum.

No processo de produção de chávenas na Vista Alegre, a utilização de uma pasta mais dura, proveniente de outro processo utilizado nas instalações, melhora a conformação da asa. Esta pasta tem um melhor desempenho a fechar o centro da peça, pois a sua estrutura no enchimento é mais aberta, devido à diferente granulometria. Esta abertura possibilita uma formação de parede mais rápida. Aplicar um controlo mais apertado do corte que origina a superfície de colagem da asa contribui também para melhorar a ligação asa-corpo.

Este estudo permitiu perceber que a ocorrência de um defeito não tem necessariamente uma só origem, pode ter mais que uma origem diferente, e que com um conjunto de soluções, é possível eliminar ou reduzir a incidência de um problema.

Não se observaram problemas com a secagem das chávenas, e com os resultados das experiências de secagem, foi possível criar uma referência para comparar os conteúdos em humidade da asa e corpo da chávena no momento da colagem, através de curvas de Bigot, possibilitando a aplicação de um controlo mais apertado neste campo.

A introdução de uma pasta mais dura, proveniente de outro processo utilizado nas instalações, criou um efeito adverso, aumentando a incidência de outro defeito (resíduos), o que não é ideal. Procurou-se então obter um compromisso entre os resultados das duas pastas, juntando o melhor desempenho de conformação com a pasta mais dura, e a baixa incidência de resíduos da pasta plástica. Assim contrariou-se o descolamento da asa, sem aumentar a incidência de resíduos nas asas.

Uma forma de eliminar o problema de conformação das asas maciças é recorrendo ao enchimento das asas por alta pressão. Para tal seria necessário um novo equipamentos de enchimento por alta pressão (ou a adaptação dos existentes) para este tipo de peças, algo que iria requerer um estudo da viabilidade de tal investimento por parte da empresa, algo que se encontra fora do âmbito deste estágio.

Com este estágio, foi possível para o autor conhecer de perto o funcionamento interno de uma instalação industrial de processamento cerâmico e do seu dia-a-dia, no caso específico o da empresa Vista Alegre Atlantis. O estágio possibilitou analisar o processo de produção de uma perspectiva mais prática, aprender a abordar situações da indústria, desenvolver competências e expandir o conhecimento, tudo isto importante para o exercício da futura profissão de Engenheiro de Materiais.

## Referências Bibliográficas

- [1] T. A. Ring, *Fundamentals of Ceramic Powder Processing and Synthesis*. Academic Press, 1996.
- [2] M. W. Barsoum, *Fundamentals Of Ceramics*. Institute of Physics Publishing 2003.
- [3] C. B. Carter and M. G. Norton, *Ceramic Materials: Science and Engineering*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [4] Y. Iqbal and W. E. Lee, “Microstructural Evolution in Triaxial Porcelain,” *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 83, no. 189015, pp. 3121–3127, 2000.
- [5] W. M. Cam and U. Senapati, “Porcelain-Raw Materials, Processing, Phase Evolution, and Mechanical Behavior,” *J. Am. Ceram. Society*, vol. 81, no. 190529, pp. 3–20, 1998.
- [6] C. A. Harper, *Handbook of Ceramics, Glasses, and Diamonds*, McGraw Hill, 2001.
- [7] Boch, Philippe; Niepce, Jean-Claude, *Ceramic Materials*, ISTE Ltd, 2007.
- [8] M. N. Rahaman, *Ceramic processing and sintering*, Second Edition. CRC Press, 2003.
- [9] W. E. Worrall, *Ceramic Raw Materials: Second Revised Edition*, Pergamon Press, 1982
- [10] “Hosokawa Micron Powder Systems.” [Online]. <http://www.hmicronpowder.com/media/img/uploads/materials/Kaolin 2.jpg>. [Acedido: 15-Jul-2015].
- [11] “Shree Ram minerals.” [Online]. <http://shreeramminerals.com/minerals/about-kaolin/>. [Acedido: 24-Jul-2015].
- [12] “Sandia Exploration Consultants.” [Online]. <http://sandia-exploration.com/images/Kharampur-4861-kaol.gif>. [Acedido: 25-Jul-2015].
- [13] “Windows to the Universe Team, Tetrahedron Model,” *Boulder, CO: © 2010 National Earth Science Teachers Association*. [Online]. <http://www.windows2universe.org>. [Acedido: 15-Jul-2015].

- [14] S. Guest, “Simon Guest Homepage.” [Online].  
<http://www2.eng.cam.ac.uk/~sdg/symmetry/>. [Acedido: 16-Jul-2015].
- [15] “Planetary Surface Materials Research Group.” [Online].  
<http://epsc.wustl.edu/haskin-group/>. [Acedido: 26-Jul-2015].
- [16] C. W. Parmelee, *Ceramic Glazes*, Faenza Editrice, 1981.
- [17] K. P. Belous, Y. M. Rodichev, G. M. Okhrimenko, I. S. Bogatyr’, V. V. Veligura, N. P. Orlova, P. F. Zolotarev, and G. I. Perevorukhov, “Structural strength of hard porcelain with allowance for technological factors,” *Strength Mater.*, vol. 16, no. i, pp. 38–43, 1984.
- [18] J. S. Reed, *Principles of Ceramic Processing*, Second Edi. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [19] C. W. Hoogendam, a. de Keizer, M. a. Cohen Stuart, and B. H. Bijsterbosh, “Adsorption mechanisms of carboxymethyl cellulose on mineral surfaces,” *Langmuir*, vol. 14, no. 4, pp. 3825–3839, 1998.
- [20] A. Benchabane and K. Bekkour, “Rheological properties of carboxymethyl cellulose (CMC) solutions,” *Colloid Polym. Sci.*, vol. 286, pp. 1173–1180, 2008.
- [21] W. Ryan, C. Radford, and I. of C. G. Britain, *Whitewares production, testing, and quality control: including materials, body formulations, and manufacturing processes*. Pergamon Press, 1987.
- [22] M. Kornmann, “La courbe de Bigot revisitée, New explanation of the Bigot curve.,” *L’industrie céramique & verrière*, no. N° 1005, pp. 44–54, 2006.
- [23] A. E. McHale, *Phase Diagrams and Ceramic Processes*, Springer Science+Business Media.1998.