



Desenvolvimento de suportes de enforna para cozedura de peças de cerâmica sanitária

CATARINA MOTA ARAÚJO DE SOUSA BRITO

Setembro de 2023

Desenvolvimento de suportes de enforna para cozedura de peças de cerâmica sanitária

Catarina Mota Araújo de Sousa Brito

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Química, ramo opcional de Energia e Biorrefinaria

ARCH Valadares

Eng.^a Susete Soares

Dr.^a Margarida Ribeiro

Dr.^a Teresa Sena Esteves

Setembro 2023

Agradecimentos

Com a finalização desta dissertação, não posso deixar de agradecer a algumas pessoas que, direta ou indiretamente, me auxiliaram nesta caminhada tão importante.

Em primeiro lugar, gostaria de deixar um enorme agradecimento ao Engenheiro Henrique Barros, pela oportunidade para desenvolver este trabalho, pela orientação, pela disponibilidade e, especialmente, por acreditar em mim.

Queria deixar também um agradecimento muito especial à Engenheira Susete Soares, que me acompanha desde o meu primeiro dia de *ARCH* ao peito.

Gostaria ainda de agradecer às minhas orientadoras do ISEP, Engenheiras Margarida Ribeiro e Teresa Sena Esteves, por se mostrarem sempre disponíveis para me ajudar. Obrigada pela vossa insistência, rigor e compreensão.

Ao Sr. Camilo, por tudo o que me ensinou em tão pouco tempo. Obrigada pela sua ajuda, essencial nos meus dias e, especialmente, na conclusão deste trabalho. Obrigada pelas chamadas à razão, por acreditar em mim e por estar sempre do meu lado.

À minha Celestinha, a minha “mãezinha” da *ARCH*. Obrigada por seres “psicóloga” nas horas de almoço (e não só), por seres tão minha amiga e por todas as “*Salvé Rainha*” que rezaste por mim. Sem dúvida que estão a surtir efeito.

Ao Sr. Armando que, por motivos de força maior, não pôde contribuir para este trabalho como gostaria. Ainda assim, fico-lhe muito grata por se mostrar disponível para me ajudar.

Ao Sr. Adão, pela orientação dada no processo de modelação e pelo contínuo interesse que demonstrou pelo meu trabalho.

A toda a minha família pelo apoio incondicional, amor, carinho e educação. Obrigada, “Mãezinha” e “Papai”. Obrigada, Bia. Vocês são tudo para mim e sem vocês, dificilmente conseguiria chegar até aqui. São a minha sorte grande.

Ao Gustavo, por estar sempre lá para mim. Obrigada por seres “abraço-casa” e o meu fim-de-semana perfeito. Sou grata por ti.

Às amigas que fiz nesta Instituição, Diana e Sofia. Levo-vos para a vida. Obrigada por tudo.

Para o final, o mais importante: os meus avôs. As minhas referências. As melhores pessoas deste mundo. Obrigada, “Bôzinho” e “Bózinha”, pelos mimos, pelo conforto, pela paz e pelo amor, que renova a cada dia. A vocês, dedico a conclusão deste ciclo.



Resumo

Esta dissertação focou-se no desenvolvimento de suportes de enforna inovadores, para a cozedura de peças de cerâmica sanitária, visando a minimização de defeitos, tais como empenos, durante o processo. Os principais objetivos incluíram o desenvolvimento de suportes eficazes, a investigação de métodos para mitigar tensões durante a cozedura, a avaliação da redução da inércia térmica dos suportes e a análise das consequências nos âmbitos económico e ambiental.

A tecnologia desenvolvida envolveu quatro elementos móveis, estrategicamente posicionados num tabuleiro que, por sua vez, está coberto por uma camada de alumina. Estes quatro elementos devem acompanhar, no processo de cozedura, a contração das peças cerâmicas, reduzindo o atrito entre estas e o suporte de enforna, prevenindo empenos.

Os resultados dos ensaios revelaram um progresso contínuo, com o segundo ensaio a resultar na movimentação das placas, embora tenha ocorrido a fratura dos tabuleiros. No terceiro ensaio, obteve-se sucesso na redução dos empenos, enquanto no quarto, apesar da modificação do *design* das placas para facilitar o seu movimento, observou-se a aderência destas ao tabuleiro. De modo a evitar esta aderência, no quinto ensaio, adicionou-se uma maior quantidade de alumina, calcinada e peneirada, ao tabuleiro. Tal facto permitiu a movimentação das placas e obter sucesso na redução dos empenos das bacias.

A substituição parcial dos suportes tradicionais pelos desenvolvidos proporciona uma redução anual de 14 905 Nm³ de gás natural, o que corresponde a uma economia de 5 363 €, e uma diminuição de 32 ton de emissões de dióxido de carbono.

Em suma, este estudo apresenta uma tecnologia promissora para a indústria cerâmica, reduzindo defeitos, mais concretamente, empenos. Para além disso, proporciona benefícios económicos e ambientais.

Palavras-chave: Suportes de enforna, Louça sanitária, Empenos.

Abstract

This dissertation focused on the development of innovative hanging supports for the firing of sanitary ceramic tiles, with the aim of minimizing defects such as warping during the process. The main objectives included the development of effective supports, the investigation of methods to mitigate tensions during firing, the evaluation of the reduction in the thermal inertia of the supports and the analysis of the economic and environmental consequences.

The technology developed involved four movable elements, strategically positioned on a tray which, in turn, is covered in a layer of alumina. These four elements should accompany the contraction of the ceramic pieces during the firing process, reducing friction between them and the hanging support and preventing warping.

The results of the tests showed continuous progress, with the second test resulting in the movement of the slabs, although the trays did fracture. In the third test, there was a successful reduction in warping, while in the fourth, despite modifying the design of the slabs to facilitate their movement, they adhered to the deck. In order to prevent this adhesion, in the fifth test, a greater amount of calcined and sieved alumina was added to the tray. This allowed the slabs to move and successfully reduced the warping of the basins.

Partially replacing the traditional supports with the developed ones will result in an annual reduction of 14 905 Nm³ of natural gas, which corresponds to a saving of €5 363, and a reduction of 32 tons of carbon dioxide emissions.

In short, this study presents a promising technology for the ceramics industry, reducing defects, specifically warping. It also provides economic and environmental benefits.

Keywords: Hanging supports, Sanitaryware, Warping.

Índice

1.	Enquadramento.....	1
1.1.	Apresentação da empresa	1
1.2.	Tema e objetivos do estágio	2
1.3.	Organização da dissertação	3
2.	Produção e fornos: um olhar detalhado sobre a <i>ARCH</i>	5
2.1.	Barbotinas cerâmicas.....	5
2.1.1.	Porcelana sanitária – <i>Vitreous China</i>	6
2.1.2.	<i>Gresanit</i> [®]	6
2.1.3.	<i>HighCer</i>	7
2.1.4.	<i>HighPor</i> [®]	7
2.1.5.	Incorporação de lamas.....	8
2.2.	Processo produtivo	10
2.2.1.	Matérias-primas da pasta e do vidro.....	10
2.2.2.	Conceção e produção dos modelos, madres e moldes.....	11
2.2.3.	Fabrico de barbotinas (pastas).....	12
2.2.4.	Conformação	13
2.2.5.	Acabamento.....	13
2.2.6.	Secagem	14
2.2.7.	Vidragem das peças.....	14
2.2.8.	Cozedura	15
	Transformações físicas e químicas	15
2.3.	Fornos.....	19
	Material refratário	23
3.	Defeitos	27
3.1.	Análise preliminar	27
3.2.	Defeitos provenientes da cozedura.....	28
3.3.	Empeno	30

4. Tecnologia proposta	37
4.1. <i>Design</i>	37
4.2. Conceção da peça.....	39
5. Método de cálculo	45
6. Resultados e discussão	49
6.1. Primeiro ensaio.....	49
6.2. Segundo ensaio.....	51
6.3. Terceiro ensaio	55
6.4. Quarto ensaio	56
6.5. Quinto ensaio	58
6.6. Redução de consumos e emissões	61
7. Conclusões e perspectivas futuras.....	65
Bibliografia	67
Anexos.....	69
A. Objetos de estudo	69
B. Tecnologia desenvolvida – desenho técnico	70
C. Cálculos.....	72

Índice de figuras

Figura 2.1 - Economia linear versus economia circular. [6]	8
Figura 2.2 – Carregamento do material a ser queimado.....	19
Figura 2.3 – Interior do forno intermitente com os queimadores em funcionamento.	20
Figura 2.4 - Entrada da loiça num forno de chama aberta.....	20
Figura 2.5 - Placa de cordierite.	24
Figura 2.6 - Longarinas de carboneto de silício, SiC, revestidas com alumina, Al ₂ O ₃	24
Figura 2.7 - Longarinas e pilares em carboneto de silício, SiC.....	25
Figura 3.1 - Fissura.	28
Figura 3.2 - Lavatório com empeno superior a 3 mm.	28
Figura 3.3 – Pia de lavatório com depressões	29
Figura 3.4 – Poro.....	29
Figura 3.5 – Quebra de superfície.	29
Figura 3.6 – Falta de vidro no arco de uma bacia.	30
Figura 3.7 – Bidé, da série Two suspensa, empenado.....	30
Figura 3.8 – Bacia, da série Two suspensa, empenada.	31
Figura 3.9 – Esquema representativo das direções da contração e força de atrito, durante a cozedura.	32
Figura 3.10 – Locais da peça que possam estar empenados [12].	33
Figura 3.11 – Enforna de uma bacia Oceanus compacta.	34
Figura 3.12– Placa refratária partida que, conseqüentemente, deu origem a uma peça empenada [11].	34
Figura 4.1 – Esquematização de um dos elementos móveis, em formato quadrado.....	37
Figura 4.2 – Esquematização da tecnologia idealizada (os quatro elementos móveis – A, o caixilho – B, e a alumina, Al ₂ O ₃).	38
Figura 4.3 – Esquematização da vista de cima dos elementos móveis.	38
Figura 4.4 – Esquematização da vista de baixo dos elementos móveis.	39
Figura 4.5 - Esquematização da tecnologia idealizada (vista de corte).....	39
Figura 4.6 – Fusão do modelo da placa com uma placa de gesso quadrada.	40
Figura 4.7 – Forma perdida das placas.....	40
Figura 4.8 – Uma das duas partes do molde final das placas.	41
Figura 4.9 – Molde das placas.....	41
Figura 4.10 – Método de enchimento com gesso.....	42
Figura 4.11 – Enchimento do molde das placas.....	42

Figura 4.12 – Molde das placas aberto, após secagem da barbotina.....	43
Figura 4.13 – Secagem, em verde, do tabuleiro.....	43
Figura 4.14 – Tabuleiro a iniciar o processo de cozedura, após secagem branca.....	44
Figura 4.15 – Peça final, pronta a ser ensaiada.....	44
Figura 5.1 – Curva de cozedura do forno 1.....	45
Figura 6.1 – Alumina em pó, não calcinada, sobre o tabuleiro.....	50
Figura 6.2 – Bacia da série Nautilus suspensa, sobre o suporte desenvolvido.....	50
Figura 6.3 – Movimentação verificada pelas placas, após cozedura (1º ensaio).....	51
Figura 6.4 – Espaldar da bacia Nautilus suspensa, com uma ligeira deformação (1º ensaio).....	51
Figura 6.5 – Redução substancial da quantidade de alumina sobre o tabuleiro.....	52
Figura 6.6 – Movimentação verificada pelas placas, após cozedura (2º ensaio), para a bacia Nautilus (A) e Two suspensa (B).....	52
Figura 6.7 – Suportes de sustentação, para as bacias Nautilus (A) e Two suspensas (B), ambos com o tabuleiro fraturado.....	53
Figura 6.8 – Deformação acentuada apresentada pela bacia Nautilus suspensa (2º ensaio).....	53
Figura 6.9 – Análise da fratura verificada no tabuleiro.....	54
Figura 6.10 – Esquema da alteração do molde do tabuleiro.....	54
Figura 6.11 – Bacia da série Two suspensa, colocada em cima do suporte desenvolvido (que incorpora as quatro placas e o tabuleiro fraturado).....	55
Figura 6.12 – Movimentação verificada pelas placas, após cozedura (3º ensaio). Na figura, a letra A representa o lado direito da bacia e a letra B o lado esquerdo.....	56
Figura 6.13 – Empeno verificado na bacia da série Two suspensa, após cozedura (3º ensaio).....	56
Figura 6.14 – Movimentação verificada pelas placas, após cozedura (4º ensaio).....	57
Figura 6.15 – Disposição da alumina no tabuleiro.....	58
Figura 6.16 – Movimentação verificada pelas placas, após cozedura (5º ensaio).....	59
Figura 6.17 – Empeno verificado na bacia da série Two suspensa, após cozedura (5º ensaio).....	59
Figura 6.18 – Movimentação verificada pelas placas, após cozedura (reprodução do 5º ensaio).....	60
Figura 6.19 – Tabuleiro, originado a partir do molde com 6 pontos de enchimento, fraturado.....	61
Figura 6.20 – Empeno verificado na bacia da série Two suspensa rimless, após cozedura (reprodução do 5º ensaio).....	61
Figura 6.21 – Bacia Two suspensa rimless, enforcada em cima do suporte 1.....	62
Figura 6.22 – Bacia Two suspensa rimless, enforcada em cima do suporte 2.....	62
Figura 6.23 – À esquerda, temos um tanque, e à direita, a Bacia Two suspensa rimless, enforcada em cima do suporte 1.....	63
Figura B.1 – Desenho técnico referente à tecnologia desenvolvida.....	70

Índice de tabelas

Tabela A.1 - Desenhos técnicos e dimensões antes e após cozedura, referentes às bacias da série Two e Nautilus suspensas [23].....	69
Tabela C.1 – Poder calorífico, c_p , em $\text{kJ}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$, e massa, em kg, referentes ao suporte 1 e ao suporte 2.....	72
Tabela C. 2 – Temperatura inicial, T_i , em $^\circ\text{C}$, temperatura final, T_f , em $^\circ\text{C}$, gradiente de temperatura, ΔT , em $^\circ\text{C}$, e energia consumida pelo suporte 1, $Q_{\text{sup.1}}$, e pelo suporte 2, $Q_{\text{sup.2}}$, em kJ.....	73
Tabela C. 3 – Somatório da energia consumida, Q , em kJ, quantidade de gás natural equivalente, V_{GN} , em Nm^3 , e custo equivalente, Custo_{eq} , em €, para cada um dos suportes, e por ciclo de cozedura.....	73
Tabela C.4 – Número de placas, n , quantidade de gás natural equivalente, V_{GN} , em Nm^3 , e custo equivalente, Custo_{eq} , em €, para cada um dos suportes, e por ano.....	74
Tabela C.5 – Poupança, em €, referente à redução anual de gás natural, V_{GN} , em Nm^3 , e respetiva redução de energia consumida, Q , em MWh, e de emissões de CO_2 , em ton.....	74

1. Enquadramento

O estágio curricular foi realizado na empresa ARCH (*Advanced Research Ceramic Heritage*) Valadares, no departamento produtivo, com o tema “Desenvolvimento de suportes de enforna para cozedura de peças de cerâmica sanitária”. Este estágio insere-se na unidade curricular de Dissertação/Estágio (DISEST) de 34 ECTS do segundo semestre do segundo ano do mestrado em Engenharia Química. O estágio decorreu entre 27 de fevereiro e 11 de agosto, de segunda a sexta-feira, com um horário entre as 8h00 e as 17h00.

1.1. Apresentação da empresa

A ARCH Valadares situa-se em Valadares, Vila Nova de Gaia, e é uma empresa portuguesa que teve origem na centenária Valadares e que se dedica à produção de loiça sanitária. Combinando tradição, inovação e design, a produção da ARCH é 100% realizada em Portugal [1].

Atualmente, a ARCH conta com uma área de produção de cerca de 30000 m², estando dividida em vários setores, de acordo com as diferentes etapas de produção. As principais unidades fabris são:

- A **modelação**, zona onde são concebidos e elaborados os modelos, os moldes originais e as madres [2];
- A **fábrica de preparação de pastas**, onde se realiza a preparação das pastas que irão constituir as peças cerâmicas;
- A **fábrica 1**, onde se situam as olarias responsáveis pela criação das peças cerâmicas constituídas por *Vitreous China*, a estufa de secagem, a preparação de vidros, a vidragem, o forno de cozedura, a escolha e uma zona destinada ao retoque a quente e frio;
- A **fábrica 2**, que contém uma olaria responsável pela criação de peças constituídas por *Gresanit* e *Highcer*;
- A **fábrica 3**, zona destinada à fabricação de moldes;
- Os **laboratórios**, onde as matérias-primas e os produtos em curso, tais como o vidrado e a pasta, são submetidos a processos de controlo e de testagem física e química. Para além disso, também são desenvolvidos novos materiais e cores;

- O **armazém de produto acabado**, local para onde as peças conformes são encaminhadas e, posteriormente, armazenadas, de modo a estarem prontas para serem comercializadas [3];
- A **manutenção**, local onde se constrói e reparam todos os equipamentos [2].

1.2. Tema e objetivos do estágio

O presente subcapítulo tem como objetivo apresentar o tema central desta pesquisa e os objetivos que orientaram o estágio de desenvolvimento aqui abordado. No âmbito da indústria de cerâmica sanitária, surge uma questão de relevância crucial: a busca incessante por aprimorar a qualidade e eficiência do processo de cozedura das peças cerâmicas.

O título desta dissertação, “Desenvolvimento de suportes de enforna para cozedura de peças de cerâmica sanitária”, reflete a essência deste trabalho, que se foca na conceção e desenvolvimento de suportes de enforna com o propósito específico de minimizar defeitos que surgem nas peças cerâmicas durante a cozedura. Este trabalho visa abordar e mitigar empenos, resultantes das tensões geradas pelo contacto da peça com o suporte de enforna. O desafio enfrentado pela indústria cerâmica em relação a estes defeitos representa uma oportunidade única de pesquisa e inovação, uma vez que a melhoria da qualidade dos produtos e a otimização dos processos de produção são objetivos essenciais.

Dentro deste contexto, os objetivos do estágio foram devidamente estabelecidos, destacando-se:

- O **desenvolvimento de suportes de enforna eficazes**, projetados especificamente para atender às necessidades da indústria de cerâmica sanitária durante o processo de cozedura. Estes suportes visam oferecer uma solução prática e confiável para minimizar tensões geradas pelo contacto da peça com o suporte de enforna, prevenindo empenos;
- A **pesquisa e desenvolvimento de métodos e designs que minimizem as tensões** entre a cerâmica e o suporte de enforna, durante a cozedura. Este facto é fundamental para a prevenção de defeitos e consequente melhoramento da integridade e qualidade dos produtos cerâmicos;
- A avaliação da possibilidade de **redução do peso** dos suportes de enforna, sem comprometer a sua eficácia no suporte das peças cerâmicas;
- A demonstração de que a implementação bem-sucedida dos suportes de enforna pode resultar na **melhoria da qualidade dos produtos sanitários e na eficiência geral do processo** de produção;

- A análise das implicações **económicos** e **ambientais** resultantes da alteração do *design* e do material dos suportes, com efeito sobre a inércia térmica das vagonas.

O alcance destes objetivos visa consolidar um valioso *know-how* para a empresa e, possivelmente, abrir portas para futuras oportunidades de negócio.

1.3. Organização da dissertação

Esta dissertação divide-se em vários capítulos e subcapítulos. Inicia-se, no capítulo 1, com uma breve apresentação da empresa e com a indicação dos objetivos concretos do estágio.

No capítulo 2, exploram-se os aspetos relacionados com a produção cerâmica e os fornos utilizados no processo.

O capítulo 3 foca-se na investigação dos defeitos comuns encontrados nas peças cerâmicas, após cozedura, dando ênfase ao empeno. Examina-se a complexa relação entre este e o atrito, identificando fatores críticos que, por sua vez, afetam a qualidade das peças cerâmicas.

No capítulo 4, apresenta-se a tecnologia proposta como uma solução para os desafios identificados anteriormente. Descreve-se, em detalhe, como aplicá-la, a fim de otimizar o processo de cozedura e minimizar o empeno das peças cerâmicas.

No capítulo 5, descreve-se o método utilizado para calcular os benefícios energéticos, ambientais e económicos, associados à implementação da tecnologia proposta.

No capítulo 6, apresentam-se os resultados obtidos a partir da aplicação da tecnologia desenvolvida e discutem-se as suas implicações.

O capítulo 7 resume-se às principais conclusões do estudo e apresenta propostas para trabalhos futuros que, por sua vez, possam expandir e aprofundar a pesquisa realizada.



2. Produção e fornos: um olhar detalhado sobre a ARCH

Este capítulo proporciona uma visão aprofundada do processo produtivo e dos fornos utilizados pela empresa, fornecendo uma compreensão detalhada do ambiente em que as peças sanitárias são fabricadas.

2.1. Barbotinas cerâmicas

A cerâmica de sanitário comum é um tipo de material que passa por um processo de tratamento térmico a alta temperatura, recoberto por um vidrado cerâmico branco ou colorido. Por norma, os produtos de loiça sanitária são produzidos a partir de um dos seguintes materiais cerâmicos: *Vitreous China* (porcelana sanitária), *Fine Fire Clay* e *Fire Clay* [2].

Cada um destes três materiais cerâmicos têm propriedades físicas e químicas distintas que justificam as suas diferentes aplicações. A porcelana sanitária é caracterizada por uma baixa absorção de água, alta resistência mecânica e excelente aderência ao vidrado, o que a torna mais higiénica e durável. No entanto, devido ao elevado nível de vitrificação, a porcelana sanitária apresenta uma elevada contração e deformação durante o processo de cozedura, o que limita a produção de peças de grandes dimensões. Por outro lado, materiais como o *Fine Fire Clay* ou *Fire Clay* são adequados para a produção de produtos de maiores dimensões, tais como bases de chuveiro ou lavatórios, uma vez que apresentam uma menor contração e deformação durante o processo de cozedura [2].

As diferenças existentes entre os materiais devem-se às suas propriedades físicas e químicas que, por sua vez, determinam o comportamento dos mesmos durante o processo de produção. Assim, a porcelana sanitária é vitrificada a altas temperaturas, o que lhe confere alta resistência e baixa absorção de água, enquanto materiais como *Fine Fire Clay* ou *Fire Clay* têm uma menor taxa de vitrificação, o que lhes permite manter a sua forma durante o processo de cozedura a altas temperaturas [2].

No seu processo produtivo, a ARCH utiliza barbotinas cerâmicas, que incluem o *Vitreous China*, o *Gresanit*[®], o *HighCer* e o *HighPor*.

2.1.1. Porcelana sanitária – *Vitreous China*

Este tipo de material cerâmico, muito utilizado na fabricação de produtos sanitários, é produzido a partir de matérias-primas naturais, tais como a argila, o caulino, o quartzo e o feldspato. Após submissão a altas temperaturas, este material adquire uma absorção de água de apenas 0,1%, proporcionando uma excelente impermeabilização e elevada dureza, além de possuir ótimas propriedades mecânicas quando submetido à compressão [2].

A barbotina de porcelana sanitária permite uma grande versatilidade na produção de peças sanitárias com diferentes formas e tamanhos, e com alta eficiência. O vidrado branco ou colorido confere resistência a ataques químicos (ácidos e bases) e manchas. A porcelana sanitária também é altamente resistente ao choque térmico, ao aparecimento de fissuras e fogo. Para além disso, possui uma baixa condutividade elétrica e térmica. Estas propriedades garantem que a porcelana sanitária atenda aos mais altos requisitos de higiene e a torne num material cerâmico reciclável e sustentável [2].

2.1.2. *Gresanit*[®]

O *Gresanit*[®] consiste num material que combina baixo nível de deformação, alta resistência mecânica e baixa absorção de água. Para além disso, utiliza o mesmo processo industrial da porcelana sanitária, o que o torna uma alternativa sólida ao *Fine FireClay*. É indicado para a fabricação de produtos de grandes dimensões, superfícies planas e formatos que, por sua vez, têm baixos níveis de deformação durante a cozedura [2].

Este material resulta da combinação de matérias-primas naturais com resíduos do processo cerâmico da porcelana sanitária. Dado o seu desenvolvimento contínuo, conseguiu-se obter um material com características únicas, incluindo uma resistência ao choque superior à porcelana sanitária. Para além disso, o *Gresanit*[®] é revestido com um vidrado branco ou colorido, o que proporciona uma resistência similar à porcelana sanitária, no que diz respeito a ataques químicos e manchas [2].

Assim, o *Gresanit*[®] foi desenvolvido tendo em consideração a sustentabilidade ambiental, com o objetivo de minimizar o desperdício e reduzir o consumo direto de matérias-primas. Posto isto, este material pode ser considerado uma escolha ecologicamente correta, com um impacto positivo no meio ambiente [2].

2.1.3. *HighCer*

O *HighCer* é um tipo de material cerâmico projetado para a produção de bases de chuveiro ultrafinas e lavatórios, que não requerem a aplicação de um vidro. Este material oferece uma superfície totalmente lisa, hidrófuga e impermeável [2].

Este material é produzido a partir de matérias-primas naturais, sendo submetido a um processo de cozedura a 1200 °C, o que resulta em excelentes propriedades de resistência mecânica e química, e durabilidade [2].

Uma característica interessante neste material é que não é necessário aplicar um revestimento cerâmico, o que elimina a possibilidade do aparecimento de futuras fissuras. Para além disso, a sua produção é mais sustentável, reduzindo o consumo de água e de matérias-primas naturais, e as emissões de CO₂ [2].

O *HighCer* é resistente ao fogo e apresenta uma baixa condutividade térmica e elétrica. Além disso, pode ser usado como revestimento cerâmico, ampliando as suas possibilidades de aplicação em termos de acabamento e textura, tornando-o adequado para projetos em que a estética inovadora é fundamental [2].

Importa realçar que o *HighCer* é um material cerâmico 100% reciclável e, por isso, é uma escolha sustentável para diversas aplicações [2].

2.1.4. *HighPor*[®]

O *HighPor*[®] é um revestimento cerâmico projetado para ser aplicado em artigos nos quais as propriedades antiderrapantes desempenham um papel crucial, tais como em bases de chuveiro. No entanto, no seu desenvolvimento, foi um desafio manter a impermeabilidade e a durabilidade que, por sua vez, são características de outros materiais cerâmicos da ARCH [2].

A produção deste revestimento segue um processo semelhante ao de outros revestimentos vítreos. Quando submetido a uma temperatura de 1200 °C, resulta numa superfície classificado como antiderrapante C (a classe mais alta), fácil de limpar, altamente resistente a produtos químicos e manchas. Para além disso, este revestimento inovador mantém uma alta resistência ao choque térmico, à formação de fissuras e ao fogo [2].

Este material pode ser aplicado em qualquer outra peça de cerâmica sanitária, oferecendo resultados esteticamente desafiadores, devido às texturas exclusivas que podem ser criadas, estabelecendo uma nova fronteira, no que diz respeito ao acabamento de peças sanitárias [2].

O *HighPor*[®] destaca-se pelo seu impacto ambiental reduzido, devido à redução significativa do consumo de matérias-primas naturais, e das emissões de CO₂ durante o processo de cozedura, graças ao uso de matérias-primas sem carbonatos. Além disso, é um material que possui total reciclabilidade.

2.1.5. Incorporação de lamas

A mudança do modelo económico linear tradicional, que envolve a extração, transformação, uso e eliminação de recursos, está-se a tornar cada vez mais urgente. As empresas estão a adotar a transição para uma economia circular (figura 2.1), contribuindo para a criação de valor sem depender do consumo de recursos finitos [4].



Figura 2.1 - Economia linear versus economia circular. [6]

Nesta nova abordagem, a atenção é direcionada para a reutilização, reparação, renovação e reciclagem de materiais e produtos já existentes. O que costumava ser considerado “resíduo”, pode agora ser transformado num recurso ou numa matéria-prima secundária, num novo ciclo de produção. No conceito de economia circular, a preservação do valor dos produtos pelo maior tempo possível, desempenha um papel crucial, colocando os produtos e toda a sua cadeia de valor no processo de transição [5].

As matérias-primas secundárias são resíduos ou materiais reciclados, que podem ser usados em substituição ou em conjunto com matérias-primas naturais. A sua utilização traz vantagens, tais como a redução do uso de materiais e energia, a diminuição dos impactos no clima e a redução de custos de produção [6].

Assim, para além de ser criado um caminho sustentável para estes resíduos, eles são introduzidos num novo ciclo produtivo, passando de resíduo a recurso. Simultaneamente, isso impulsiona o desenvolvimento de produtos inovadores.

A indústria cerâmica tem demonstrado interesse em utilizar resíduos industriais, desde que isso não afete de forma significativa as propriedades do seu produto final. Alguns estudos anteriores exploraram a possibilidade de incorporação de lamas industriais no processo produtivo.

Costa, M. G. et al. [7] abordaram a incorporação das lamas de uma Estação de Tratamento de Águas Residuais Industriais (ETARI) numa unidade cerâmica, produtora de peças decorativas de terracota. O objetivo do estudo foi avaliar a viabilidade de reintroduzir as lamas no processo de produção cerâmica, reduzindo assim os resíduos gerados.

Numa primeira fase deste estudo, são determinadas as características físico-químicas das lamas residuais. Esta análise foi fundamental para prever a sua influência no processo de produção cerâmica, especificamente, na barbotina. Para além disso, este estudo avalia a homogeneidade das lamas ao longo do tempo, facto que é crucial para garantir a consistência do material reciclado. São avaliados parâmetros, tais como a viscosidade e tixotropia. Estes, por sua vez, são fatores críticos para a qualidade do produto final e podem ser afetados pela adição de lamas [7].

Para além das propriedades da barbotina, este estudo procura perceber como a incorporação da lama afeta o produto final cerâmico. São considerados aspetos, tais como, a porosidade e resistência mecânica. Estes, por sua vez, são aspetos importantes para determinar se a reintrodução da lama no processo produtivo afeta a qualidade das peças cerâmicas [7].

Para corroborar os resultados laboratoriais, foi realizado um ensaio à escala industrial, obtendo-se as seguintes conclusões [7]:

- As lamas residuais possuem características relativamente constantes ao longo do tempo, o que torna possível a sua reintrodução direta em barbotinas cerâmicas;
- As lamas podem ser reincorporadas no processo produtivo, desde que sejam devidamente armazenadas, para evitar secagem que, por sua vez, pode dificultar a sua dispersão e, conseqüente, homogeneização com a restante barbotina;
- A reintrodução de até 3% em peso de lama na suspensão não altera significativamente o processo ou a qualidade final.

Assim, esta abordagem de reciclagem *in situ* é uma solução sustentável, que permite a redução de custos e o consumo de recursos naturais na indústria cerâmica [7].

Ferreira, L. S. [8] centrou-se no estudo da incorporação das lamas das Estações de Tratamento de Água (ETAs) da empresa Águas do Douro e Paiva, S.A, em barbotinas cerâmicas. Em particular, às que se destinam à cerâmica do barro vermelho.

Para tal, caracterizou-se esses resíduos, tendo em conta aspetos químicos, mineralógicos, granulométricos e térmicos. Em seguida, foram preparadas composições cerâmicas com uma argila vermelha comum e diferentes teores de lamas. Os parâmetros funcionais, tais como, contração, resistência mecânica e absorção de água, foram avaliados após secagem e cozedura [8].

Com este estudo, infere-se que a incorporação de lamas nas pastas cerâmicas resultou em pequenas alterações nas propriedades avaliadas. No entanto, para todos os casos testados, a incorporação das lamas mostrou-se tecnicamente viável, uma vez que os valores permaneceram dentro dos limites aceitáveis para a produção de cerâmica estrutural. Assim, à escala de produção industrial, conclui-se que é possível adicionar até 5% de lamas nas barbotinas cerâmicas, especialmente para temperaturas acima dos 950 °C [8].

Para que as lamas de clarificação de água sejam valorizadas pela indústria cerâmica, outros aspetos devem ser considerados, tais como as emissões gasosas durante a queima e a lixiviação do produto final. Este estudo infere que, com base na experiência com as lamas da ETA de Lever, é razoável supor que esses aspetos não terão um impacto ambiental significativo [8].

Logo, esta pesquisa ressalta a viabilidade técnica da incorporação de lamas de ETAs em barbotinas cerâmicas de barro vermelho, proporcionando uma alternativa sustentável para lidar com estes resíduos [8].

Assim, a reutilização de um resíduo exige uma caracterização adequada que, por sua vez, inclui: composição química e mineralógica, distribuição granulométrica, teor de humidade, comportamento térmico e grau de toxicidade. Para prever e minimizar as alterações que a incorporação de um resíduo pode causar no processo produtivo e no produto final, também é necessário estudar a homogeneidade dessas propriedades dentro do mesmo lote e a sua consistência ao longo do tempo. No entanto, quando os processos de geração de resíduos são adequadamente controlados, as variações costumam ser menores do que as apresentadas pelas matérias-primas originais.

2.2. Processo produtivo

O processo de fabricação de produtos sanitários pode ser dividido em três fases principais: conceção e *design* do produto, produção e embalagem/armazenamento. A ARCH Valadares é responsável por todo o processo de desenvolvimento e produção, não terceirizando nenhuma etapa do processo fabril. Posto isto, a empresa possui um *layout* fabril complexo e extenso.

2.2.1. Matérias-primas da pasta e do vidro

Geralmente, para fabricar a pasta sanitária, são usados os seguintes materiais: caulino, argila, feldspato e quartzo. O quartzo é um dos componentes mais importantes que, por sua vez, possui dois efeitos diferentes. Antes da cozedura, o quartzo atua como um material inerte e não

plástico, reduzindo a plasticidade da argila e também a sua resistência mecânica, mas aumentando a fluidez. Durante a cozedura, o quartzo eleva a temperatura de vitrificação da pasta. Aos 573 °C, o quartzo sofre uma transformação de quartzo alfa para beta, o que causa um rearranjo dos cristais e um aumento de volume. Este fenómeno requer que o processo de cozedura tenha um baixo gradiente térmico quando as temperaturas do forno se aproximarem desse valor [2].

Na pasta, também podem ser adicionados aditivos, tais como desfloculantes, que são utilizados para ajustar o comportamento reológico da pasta [2].

Os vidrados são compostos, principalmente, por quartzo, feldspato, caulino, carbonato de um metal alcalino terroso e óxido de zinco. O silicato de zircónio é frequentemente usado como opacificante. Para além destes constituintes, também podem ser adicionados aditivos aos vidrados, tais como aglutinantes e fluidificantes que, por sua vez, ajudam a melhorar a aderência e a fluidez do vidrado durante o processo de aplicação [2].

2.2.2. Conceção e produção dos modelos, madres e moldes

A fabricação de novas peças na indústria sanitária é uma operação, simultaneamente, complexa e sensível. É complexa, porque o sucesso da produção depende em grande parte das escolhas técnicas feitas durante a conceção do modelo, a fim de prever com precisão os níveis de deformação e contração mecânica das peças. É também uma tarefa delicada, pois a tecnologia de conformação selecionada no processo de conceção pode afetar o desempenho produtivo e a qualidade final alcançada. Em resumo, o processo de conceção exige um amplo conhecimento do processo industrial e das variáveis tecnológicas envolvidas, algumas das quais requerem validação empírica [2].

A qualidade do produto acabado depende muito do nível de qualidade de todo o procedimento de produção, desde a criação do modelo até a fabricação do molde-mãe. Em primeiro lugar, é necessário desenvolver os desenhos, que são feitos à escala de 1:1, definindo todas as características estéticas e funcionais do produto a ser fabricado. Esses desenhos devem ser baseados no conhecimento das transformações físico-químicas que a peça cerâmica sofre durante o processo de cozedura, enchimento e secagem. Portanto, é crucial ter uma ampla experiência e um profundo conhecimento do material e do processo de produção para lidar com problemas de deformação e contração que possam ocorrer durante as várias etapas de produção [2].

A partir dos desenhos, passa-se à produção manual dos modelos em escala 1:1. Esses modelos são aumentados, tendo em consideração a contração do produto final. Uma vez obtido o

modelo, é criado o primeiro molde, também conhecido como molde original que, por sua vez, será usado para produzir várias peças, que são, posteriormente, testadas. Se atenderem aos requisitos técnicos e funcionais, e não apresentarem deformações ou defeitos relacionados com modelo, este está pronto para avançar para a próxima fase. No entanto, isso, por norma, não acontece à primeira tentativa. Se os resultados não forem satisfatórios, são feitas as alterações necessárias até obter o resultado desejado [2].

A etapa final do desenvolvimento de uma nova série de louça sanitária é a construção da madre, que é a peça utilizada para criar os moldes das peças. A madre é composta por partes em plástico, resina ou borracha, dependendo da complexidade da forma a ser desenvolvida. A escolha do material é determinada por razões técnicas e económicas [2].

Após a construção das madres, os moldes são produzidos para realizar o enchimento das peças. Durante muitos anos, os moldes de enchimento para louças sanitárias eram feitos, exclusivamente, de gesso. No entanto, nos últimos anos, com o avanço das técnicas de enchimento, como a média e alta pressão, tornou-se necessário introduzir materiais com maior resistência mecânica e à abrasão. Por esse motivo, foram desenvolvidos moldes feitos de plástico e resina para uso em média pressão, e moldes feitos somente de resina para uso em alta pressão. Esses materiais proporcionam maior durabilidade e capacidade de resistir às exigências do processo de enchimento das peças [2].

2.2.3. Fabrico de barbotinas (pastas)

A quantidade e o tipo de argila e caulino utilizados na formulação de um corpo cerâmico dependem das características desejadas para a pasta. Isso inclui fatores, tais como viscosidade, tixotropia, tempo de formação de espessura, tempo de arrefecimento, plasticidade da pasta endurecida, resistência mecânica do corpo cru e contração do corpo cru [2].

O processo de preparação das pastas começa com uma pesagem precisa das matérias-primas, seguida de uma mistura com uma quantidade específica de água. A presença da água tem o papel de facilitar o transporte dos materiais cerâmicos até ao molde que irá dar origem à peça [2].

Em seguida, a mistura, denominada por barbotina, passa por um processo de homogeneização. Posteriormente, é peneirada para remover impurezas, desmagnetizada e transferida para um tanque de armazenamento, onde fica em estabilização, sendo submetida a uma agitação lenta durante 48 horas ou mais. Seguidamente, a barbotina é afinada, passando por

alguns testes de qualidade. Após aprovação, é enviada para a olaria, onde será utilizada na produção das peças cerâmicas [2].

2.2.4. Conformação

O processo de enchimento nas olarias segue os seguintes passos [2]:

1. Enchimento dos moldes: a barbotina é bombeada para a tubagem de cada máquina, alimentando os moldes de produção;
2. Formação de espessura: a parte do corpo cerâmico que se encontra em contato com o molde solidifica à medida que perde água, formando a espessura desejada da peça;
3. Remoção do excesso de pasta: qualquer excesso de barbotina é removido para garantir a precisão das dimensões da peça;
4. Endurecimento e abertura do molde: a barbotina endurece dentro do molde, perdendo água. O molde é aberto para permitir a extração da peça;
5. Furação e desmoldagem: A peça é furada e removida do molde. Em seguida, é realizada a etapa de acabamento, que compreende a limpeza e ajustes finais por parte do oleiro.

Quanto à tecnologia de conformação das peças nas olarias, podem ser utilizados equipamentos de baixa pressão (0,20 a 0,40 bar) ou de alta pressão (10 a 15 bar). Esses equipamentos podem ser manuais, semi-automáticos ou robotizados, e a escolha depende do tipo e complexidade da peça a ser produzida [2].

2.2.5. Acabamento

O processo de acabamento pode ser realizado antes ou após a secagem branca ou verde (subsecção 2.2.6). Consiste numa série de operações realizadas manualmente, nas quais o operador corrige eventuais imperfeições presentes na peça. Alguns dos ajustes mais comuns incluem [2]:

- Remoção de saliências formadas nas junções dos moldes;
- Ajuste dos orifícios funcionais nos produtos semi-processados;
- Eliminação de pequenos buracos ou defeitos superficiais de diferentes naturezas.

Estas operações são realizadas com o objetivo de aprimorar a qualidade estética e funcional das peças cerâmicas, garantindo que cumprem com os padrões desejados. O

acabamento manual permite que o operador trabalhe de forma precisa e delicada, corrigindo pequenas imperfeições, de modo a obter um resultado de alta qualidade [2].

2.2.6. Secagem

A etapa de secagem desempenha um papel crucial ao remover água do corpo cerâmico. Durante este processo, ocorre uma significativa contração dimensional, o que torna essencial realizar a secagem de acordo com a curva específica de secagem desses materiais. Caso contrário, podem surgir problemas graves durante a fase de cozedura ou comprometer a qualidade final do produto [2].

Na indústria sanitária, a secagem é geralmente realizada em duas fases, utilizando ar como meio de aquecimento [2]:

1. Secagem verde: após a extração do molde, a peça passa por uma secagem inicial que a torna mais consistente e facilita o seu manuseio para o acabamento;
2. Secagem branca: num secador, os produtos semi-processados são submetidos a uma secagem adicional até atingirem uma humidade residual de, aproximadamente, 1%. Importa realçar que o calor usado neste equipamento é obtido através da recuperação de ar quente do forno de cozedura.

Estas duas fases de secagem garantem que a peça atinja as condições adequadas para a etapa seguinte do processo de produção. Para além disso, contribui para a estabilidade dimensional, para evitar problemas durante a cozedura e para a obtenção de um produto final de qualidade [2].

2.2.7. Vidragem das peças

O vidrado desempenha um papel essencial ao revestir as peças, proporcionando brilho, cor e proteção às suas superfícies [2].

Antes da aplicação, o vidrado passa por um processo de preparação, no qual as matérias-primas são cuidadosamente doseadas, moídas e peneiradas. Em seguida, o vidrado é encaminhado para a área responsável pela aplicação nas superfícies exteriores das peças [2].

O processo de aplicação do vidrado começa com a limpeza das peças, através de um sopro com ar comprimido. Posteriormente, o vidrado é aplicado através de uma pulverização em todas

as superfícies visíveis das peças. Após o término desta etapa, as peças são encaminhadas para a área de carga do forno [2].

Importa realçar que o vidro resultante da pulverização que não atinge as peças é recuperado e reutilizado [2].

2.2.8. Cozedura

A cozedura é a fase final do ciclo de produção de louça sanitária. É um processo crucial, onde ocorre uma combinação de processos físicos e químicos, resultando nas características funcionais, técnicas e estéticas da peça [4].

As peças vão deformar (abater) e continuar a contrair até à dimensão pretendida. No final deste processo, apresentarão uma contração total de 12% quando comparadas às peças que saíram do molde [5].

Nesta fase, é possível reconhecer a ocorrência de erros nas etapas anteriores, uma vez que pequenos defeitos que possam ter passado despercebidos nas outras etapas são significativamente ampliados durante a cozedura, podendo originar deformações, fissuras, impurezas e quebras das peças cerâmicas [5].

De modo a assegurar a qualidade e evitar defeitos, é necessário um processo de cozedura controlado e regular. Durante a cozedura, as condições técnicas desempenham um papel vital no resultado, uma vez que qualquer pequena deficiência no corpo cerâmico será amplificada durante a transformação química e dimensional que tem lugar durante a cozedura [5].

Transformações físicas e químicas

Durante a cozedura de um corpo cerâmico, ocorrem transformações físicas e químicas que são essenciais para o desenvolvimento do produto final. Estas transformações podem ser divididas em várias fases, entre as quais [5]:

- Secagem: consiste na remoção da humidade residual do corpo cerâmico antes deste cozer. Por norma, esta fase decorre lentamente para evitar fissuras ou deformações do material;
- Decomposição: consiste na decomposição dos materiais orgânicos presentes no corpo cerâmico com o aumento da temperatura. Esta fase produz gases que podem ficar retidos no material;

- Sinterização: consiste na fusão, a altas temperaturas, das partículas individuais do corpo cerâmico, formando uma massa sólida. Este processo envolve a difusão de átomos e iões através das fronteiras entre partículas, resultando numa redução da porosidade e num aumento da força de atração intermolecular.

Posto isto, os corpos cerâmicos e os vidrados sofrem várias transformações significativas em várias gamas de temperaturas [5].

Os processos físicos e químicos que ocorrem durante a queima, bem como as temperaturas de início e fim das transformações, dependem de vários fatores, tais como [5]:

- A composição química e mineralógica dos corpos cerâmicos e vidrados. Por exemplo, um mineral que possua uma estrutura cristalina desordenada começará a perder a sua humidade residual a temperaturas mais baixas, quando comparado a um mineral semelhante com um maior grau de cristalinidade. Ou então, a temperatura em que se inicia a contração de um determinado vidro pode ser menor comparativamente a um outro que, por sua vez, contém menos óxido de zinco.
- Distribuição granulométrica das matérias-primas que compõe os corpos cerâmicos e vidrados. Por exemplo, vidros constituídos por partículas mais finas, vão fundir a temperaturas mais baixas;
- A temperatura máxima atingida, o tempo de patamar nos vários níveis de temperatura e a velocidade de aquecimento.

Quando se trabalha com louça sanitária, a forma e espessura da peça deve ser tida em consideração para estabelecer os limites de aquecimento e arrefecimento. A peça cerâmica tem áreas que recebe calor por convecção e radiação, enquanto outras áreas são afetadas somente por calor sob a forma de convecção ou condução. Assim, gera-se um gradiente de temperatura no interior da peça que, por sua vez, faz com que diferentes tipos de transformações ocorram em simultâneo, causando *stress* que, conseqüentemente, pode levar à quebra [5].

Posto isto, mencionam-se, a baixo, as principais transformações que os corpos cerâmicos e os vidrados sofrem, durante um ciclo, nas várias gamas de temperaturas [5]:

[30-150] °C

A humidade residual, que não deve exceder 1 a 1,5%, é removida. É importante evitar uma evaporação brusca no corpo cerâmico, pois isso pode resultar na sua destruição. Este deve ser aquecido gradualmente, a uma taxa de, aproximadamente, [100-130] °C por hora.

Essa etapa de aquecimento pode ser dispensada, caso o forno possua uma zona de pré-aquecimento, na qual as peças são completamente secas (humidade inferior a 1%).

[150-500] °C

As substâncias orgânicas presentes nas argilas passam por um processo de decomposição e queima. A cinética deste processo é amplamente influenciada por vários fatores, tais como:

- A natureza e a granulometria das substâncias orgânicas;
- A velocidade de aquecimento;
- A espessura do corpo cerâmico, uma vez que, quanto maior for a sua espessura, mais lento deve ser o aquecimento, de modo a garantir uma queima uniforme;
- Tipo de atmosfera no forno, sendo que, no caso da cerâmica, esta deve ser estritamente oxidante.

[500-700] °C

Durante este intervalo de temperaturas, registam-se várias transformações, tais como:

- Entre os 520 °C e os 650 °C, o caulino decompõe-se, libertando água que, por sua vez, irá migrar, criando um fluxo de vapor através da camada de vidro. Esta, como ainda é permeável, não é danificada;
- Por volta dos 573 °C, o quartzo passa abruptamente da sua forma alotrópica alfa (α) para a forma beta (β), o que resulta num aumento de volume do corpo cerâmico. Este aumento é parcialmente compensado pela contração decorrente da desidratação do caulino. É de realçar que a expansão do quartzo é facilmente absorvida pelos corpos cerâmicos porosos ou sem vidragem;
- Nesta gama de temperaturas, ocorre a decomposição da mica presente na argila, dos carbonatos do corpo cerâmico e do vidro. Estas transformações permitem um aquecimento a elevada velocidade, que pode exceder os 300 a 400 °C por hora.

[700-1050] °C

O carbonato de magnésio e o carbonato de cálcio completam o seu processo de decomposição aos 800 °C e aos 950 °C, respetivamente.

[950-1100] °C

Os sulfatos presentes na argila decompõem-se, dando origem à formação de gás. A partir desse momento, iniciam-se as reações de sinterização, especialmente devido ao efeito catalisador do sódio, potássio e óxidos de ferro. Estas reações são responsáveis pela contração do corpo

cerâmico. Posto isto, é crucial adotar uma taxa de aquecimento lenta, por volta dos [120-150] °C por hora, para não comprometer o produto final.

Por volta dos 1100 °C, a maior parte do vidro começa a fundir e, nesta fase, o processo de desgaseificação é concluído. É importante realizar esta etapa de forma prolongada para garantir a melhor qualidade de superfície do vidro. Caso o processo seja muito rápido, corre-se o risco dos gases ficarem retidos no vidro quando se iniciar o arrefecimento.

[1100-1230/1250] °C

Nesta gama de temperaturas, o vidro alcança o seu estado de maturação.

Quando a temperatura máxima é atingida, a contração e a vidragem dos corpos de porcelana sanitária estão totalmente concluídos, e, em parte, no caso dos corpos cerâmicos de grés. A vidragem conduz a um aumento da espessura da massa cerâmica, devido à formação da fase vítrea resultante da fusão do feldspato, que envolve e dissolve parcialmente os componentes cristalinos. Este fenómeno, característico dos corpos de porcelana sanitária, resulta num corpo que, após cozedura, possui uma fase vítrea, mulite microcristalina e um resíduo de quartzo.

O desempenho na temperatura máxima de cozedura afeta o final das reações entre o corpo cerâmico e os componentes do vidro.

[1230/1250-1100] °C

O arrefecimento deve ser efetuado muito lentamente, de modo a permitir a máxima evacuação de bolhas de gás presas na camada de vidro. A temperatura é reduzida cerca de [10-15] °C/h.

[1200-800] °C

Inicialmente, a temperaturas acima dos 950 °C, o corpo cerâmico apresenta um comportamento pirolástico, o que significa que um arrefecimento rápido é necessário até que as temperaturas sejam inferiores a 800 °C. Esse arrefecimento rápido promove o aumento da espessura do vidro, evitando a desvitrificação que, por sua vez, pode afetar o vidro, caso este seja mantido a altas temperaturas por longos períodos de tempo.

[800-600] °C

O arrefecimento deve ser efetuado de forma gradual, a cerca de [100-130] °C/h, uma vez que se atinge o final da transformação do corpo cerâmico entre os [750-800] °C.

A temperatura deve ser mantida uniforme nas várias partes da peça e em toda a sua espessura, devido às transformações do resíduo do quartzo beta (β) em alfa (α).

[600-500] °C

Aos 573 °C, o resíduo de quartzo transforma-se de beta (β) para alfa (α), com uma contração rápida de volume. Como o corpo cerâmico cozido é frágil, caso haja uma distribuição não uniforme de temperaturas, a peça vai sofrer diferentes contrações em diferentes direções, o que pode levar à quebra da mesma.

[500-50] °C

Nesta gama de temperaturas, o arrefecimento não precisa de ser feito com nenhuma precaução especial. Este deve ser efetuado a, aproximadamente, 50 °C/h, entre os 250 °C e os 180 °C.

2.3. Fornos

Os fornos utilizados na indústria cerâmica são classificados como contínuos ou intermitentes [5].

Os fornos contínuos funcionam durante 24 horas por dia, com um fluxo constante de material carregado em vagonas que entram no forno em intervalos regulares. São adequados para grandes quantidades de produção, o que se traduz em cerca de 700 a 800 peças por dia [5].

Nos fornos intermitentes, a produção ocorre em *batch*. O ciclo de cozedura inicia-se com o carregamento do material a ser queimado (figura 2.2). Assim que esteja completamente carregado, o forno é selado para dar início ao processo. Após a cozedura, o forno arrefece até ser atingida uma temperatura adequada para descarregar/manusear o produto [6]. Na figura 2.3., é possível observar o interior de um forno intermitente com os queimadores em funcionamento.



Figura 2.2 – Carregamento do material a ser queimado.



Figura 2.3 – Interior do forno intermitente com os queimadores em funcionamento.

Existem vários tipos de fornos contínuos, classificados com base no sistema de combustão e no método de troca de calor entre os gases de combustão e o material que está a ser cozido. De entre eles, incluem-se os fornos de chama aberta, os fornos semi-mufla e os fornos de mufla [5].

Os fornos de chama aberta (figura 2.4) possuem uma câmara de aquecimento diretamente exposta à chama. Geralmente, a fonte de calor é uma chama aberta de gás, que aquece diretamente o material colocado dentro do forno [4].



Figura 2.4 - Entrada da loiça num forno de chama aberta.

Os fornos de mufla possuem uma câmara de aquecimento fechada e isolada termicamente. Por sua vez, a mufla é uma estrutura refratária que protege o material do contacto direto com a fonte de calor. O aquecimento é realizado por resistências elétricas embutidas na mufla, que emitem calor de forma uniforme [4].

Os fornos de semi-mufla consistem numa variação entre o forno de chama aberta e o forno de mufla. Estes possuem uma mufla parcial, geralmente na parte superior do forno, enquanto a parte inferior é exposta diretamente à chama [4].

O forno 1, classificado como forno de chama aberta, é composto por um túnel reto isolado com fibras cerâmicas ou com tijolos isolantes. O material cru é colocado em carros de transporte para a cozedura, denominados por vagonas. Estas são constituídas [5]:

- Por uma estrutura metálica com rodas e eixos;
- Por uma plataforma constituída por tijolos;
- Por pilares;
- Pelo lastro, constituído por placas de cordierite que, por sua vez, são cobertas com alumina;
- Por barras refratárias que suportam as placas do lastro.

O lastro funciona como suporte direto das peças cruas, mas também para transportar conjuntos de “móvel” refratária que, por sua vez, servirão de apoio à loiça, de modo que esta não se danifique durante a cozedura [5].

Depois das peças cruas serem carregadas manualmente nas vagonas, são introduzidas em contínuo no forno através de um sistema mecanizado [5].

Os fornos devem ser concebidos de forma a otimizar o mecanismo de troca de calor por radiação e convecção, de modo que o calor seja transferido no menor tempo possível e de maneira uniforme [5].

O forno é dividido em, praticamente, três zonas: a zona de pré-aquecimento, a zona de cozedura e a zona de arrefecimento [5].

Nas áreas de pré-aquecimento, as temperaturas da parte superior e inferior do forno devem ser, aproximadamente, constantes, de modo a evitar quebras durante esta fase. Para isso, nesta zona, existe um sistema de recirculação de ar que, por sua vez, aquece as peças à custa dos gases de combustão gerados pelos queimadores localizados nas paredes laterais do forno na zona de pré-aquecimento e, especialmente, na zona de cozedura. Os queimadores são instalados de forma a evitar que a chama esteja em contacto direto com as peças. Por sua vez, os gases de combustão são extraídos por um ventilador e são enviados, em contracorrente, às peças cruas, permitindo que estas sejam aquecidas, como anteriormente mencionado, e cozidas gradualmente [5].

Nas áreas de arrefecimento, também é importante assegurar a uniformidade das temperaturas. Este encontra-se dividido em arrefecimento rápido e lento. O arrefecimento rápido

deve ser feito através da introdução de ar frio lateralmente e pelo topo. Este procedimento é efetuado para evitar gradientes de temperaturas dentro da peça e para minimizar a estratificação substancial do ar quente nas zonas mais altas da vagona. Para além da introdução de ar frio, o arrefecimento rápido envolve uma aspiração do ar quente, de modo a tornar a distribuição de temperaturas o mais uniforme possível. Posto isto, este aquecimento rápido é efetuado de forma direta. O arrefecimento indireto (ou lento) é feito essencialmente de duas formas [5]:

- Aspirando o ar quente do interior do túnel, favorecendo a entrada de ar no mesmo;
- Removendo o calor da estrutura do forno, através da circulação de ar frio em cavidades feitas nas paredes laterais do forno. Este sistema tem como vantagem a geração de ar quente limpo que, posteriormente, pode ser utilizado na secagem das peças ou dos moldes.

A capacidade térmica do forno é controlada mantendo constante o fluxo de ar e variando o fluxo de gás, de modo a manter uma razão ótima de ar/gás [5].

A eficiência térmica do forno é avaliada pela relação entre a energia necessária para cozer o material e a energia térmica que é fornecida ao forno. Assim, a eficiência térmica depende de fatores técnicos e processuais que, por sua vez, devem ser devidamente estudados e controlados. De entre estes fatores, destacam-se [5]:

- A densidade de carga por vagona (kg/m^3);
- A taxa de utilização do potencial de cozedura do forno;
- O controlo da queima e ventilação;
- A taxa de recuperação de calor;
- As condições de isolamento térmico;
- A massa de refratário utilizada.

A energia consumida serve não só para aquecer a loiça, mas também para aquecer o material refratário. A razão entre a massa da “móbilis” refratária e a massa da loiça é, aproximadamente, de 6:1. Esta pode ser diminuída através de um *design* mais apropriado da “móbilis” ou com o uso de materiais refratários em carboneto e nitreto de silício, com baixa massa térmica, oferecendo a mesma resistência e estabilidade em comparação com os materiais tradicionais. O uso destes materiais pode proporcionar uma redução na massa até 70%, o que se traduz em menores consumos de combustível, de funcionamento, de reparação e de manutenção [5].

Assim, a utilização de “móbilis” refratária mais leve permite: [5]

- Uma redução drástica da razão entre a massa do carro e a massa do material cozido;
- A redução da dispersão das temperaturas na parte inferior do forno;
- A diminuição da inércia térmica da vagona. Como consequência, o tempo de duração do ciclo pode ser reduzido.

Material refratário

Como já foi mencionado, o material refratário é um fator preponderante na cozedura da loiça sanitária, que se encontra relacionado com a otimização do consumo de energia nesta mesma fase.

Nos fornos cerâmicos, os materiais refratários são utilizados no isolamento das paredes do forno e na mobília refratária, de modo a manter a loiça na posição pretendida. Para tal, os materiais refratários devem ter as seguintes características:

- Elevada capacidade de isolamento (condutividade reduzida);
- Baixa acumulação de calor;
- Estabilidade e resistência mecânica;
- Comportamento neutro, à medida que a composição da atmosfera varia.

Assim, os materiais de enforna são produtos refratários extremamente resistentes aos choques térmicos e, por esta razão, e com a finalidade de diminuir o seu peso, devem ter a menor espessura possível.

Atualmente, na *ARCH* Valadares, utilizam-se materiais constituídos por complexos de cordierite-mulite, à base de óxidos (alumina) e à base de não óxidos (carboneto de silício).

A mulite e a cordierite são materiais que têm atraído a atenção nas últimas décadas por apresentarem uma combinação única de propriedades relacionadas com a resistência mecânica, a estabilidade química, o baixo coeficiente de expansão térmica, bem como boas propriedades óticas e dielétricas. Posto isto, são usadas numa ampla gama de aplicações, de entre elas, os materiais refratários. Alguns fatores, tais como a composição, o método de síntese, a presença de impurezas, o tratamento térmico, o número de fases cristalinas formadas e a porosidade, podem influenciar a condutividade elétrica e o mecanismo de condução nestes materiais [7].

Em função da temperatura, da carga e do tempo de cozedura, a estrutura do material de cordierite pode ser enriquecida com mulite. A cordierite garante a resistência aos choques térmicos, enquanto a mulite é responsável pela estabilidade mecânica [7].

Este complexo é utilizado para fazer placas (figura 2.5) e suportes, tais como, pilares, e tem excelentes resultados.



Figura 2.5 - Placa de cordierite.

A alumina ou óxido de alumínio, Al_2O_3 , é um material resistente a temperaturas elevadas, possuindo propriedades térmicas e mecânicas ótimas [8].

Por norma, a alumina é utilizada para revestir os refratários (figura 2.6), evitando a aderência das peças cerâmicas durante o processo de cozedura. Esta cria uma superfície mais lisa e resistente ao contacto com as peças. É comum utilizar uma mistura do pó da alumina com água, formando uma suspensão estável, na qual as partículas de alumina ficam dispersas uniformemente na água [8].

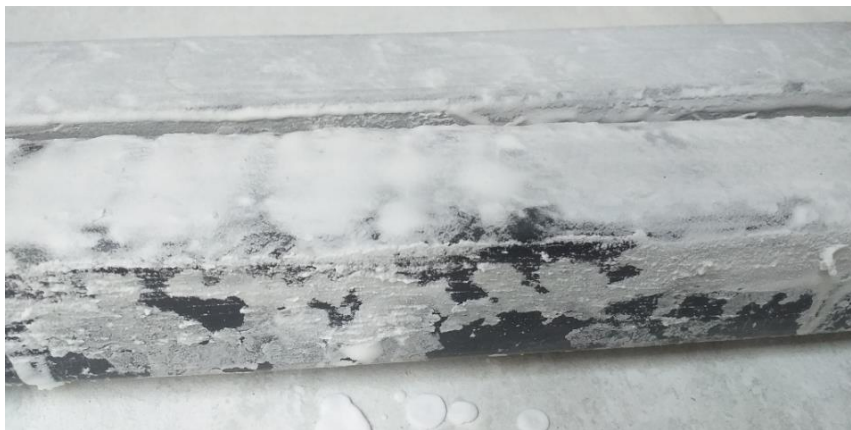


Figura 2.6 - Longarinas de carboneto de silício, SiC, revestidas com alumina, Al_2O_3 .

Os refratários de carboneto de silício, SiC, são importantes, porque exibem uma combinação de propriedades, tais como baixa densidade, alta resistência, tanto à temperatura ambiente como a temperatura elevada, alta condutividade térmica e alta resistência contra o choque térmico, a abrasão, a erosão e corrosão [8].

Na *ARCH*, utilizam-se longarinas (estruturas alongadas) e pilares (estruturas verticais) feitos de material compósito à base de carboneto de silício (figura 2.7), que funcionam como suporte, quer às placas de cordierite, quer às peças cerâmicas.



Figura 2.7 - Longarinas e pilares em carboneto de silício, SiC.



3. Defeitos

Neste capítulo, exploram-se os defeitos associados à cozeduras das peças cerâmicas de sanitário, dando ênfase ao empeno, e estuda-se a complexa relação que existe entre este e o atrito.

3.1. Análise preliminar

De modo a compreender-se plenamente a importância da dissertação, é crucial considerar o contexto real da indústria cerâmica nos últimos meses. Durante esse período, foi realizado um levantamento de dados, que evidencia a frequência com que as peças são encaminhadas para quebras com defeitos de empeno.

A partir de dados estatístico obtidos em relatórios da plataforma *Bang*, verificou-se que, de janeiro a julho de 2023, 17% das quebras registadas pela empresa estão diretamente relacionadas com defeitos de empeno. Dessas, 56% estão especificamente associadas a bacias e bidés, sendo que as restantes 44% se encontram associadas a lavatórios, pias e bases de chuveiro. Dentro das bacias e bidés de quebras com empeno, 93% são peças suspensas.

Importa realçar que, em algumas situações, especialmente em lavatórios, as peças empenadas são submetidas a um processo de recozedura, de modo a tentar contrariar o empeno. Este facto traduz-se em custos adicionais, devido à necessidade energética e de recursos.

As bacias e os bidés empenados não estão a ser submetidos à recozedura, devido ao facto do procedimento para contrariar o efeito do empeno ser mais complexo. Isto faz com que estas peças sejam mais propensas a serem encaminhadas diretamente para quebras. Tal facto reforça a necessidade de encontrar soluções eficazes que, por sua vez, minimizem o empeno na fase de cozedura, especialmente em bacias e bidés.

Este levantamento preliminar aponta para uma questão significativa na indústria de cerâmica de sanitário, que diz respeito à produção de peças empenadas. É exatamente essa problemática que motiva esta dissertação, procurando uma resposta inovadora e preenchendo uma lacuna crucial no entendimento e na abordagem deste desafio pelo setor.

3.2. Defeitos provenientes da cozedura

Durante a cozedura de peças cerâmicas, podem ocorrer vários defeitos que afetam a qualidade e a aparência das peças. Alguns dos defeitos comuns provenientes da cozedura em cerâmica de sanitário incluem [5]:

- Fissuras (figura 3.1): são aberturas que se formam nas peças cerâmicas durante a cozedura. Podem ser causadas por tensões térmicas, má distribuição de calor, coeficientes de expansão térmica diferentes entre as camadas de vidro e o corpo cerâmico, entre outros fatores;



Figura 3.1 - Fissura.

- Empeno (figura 3.2): ocorre quando as peças cerâmicas sofrem deformações indesejadas durante a cozedura. O empeno pode ser causado por diferenças na contração e expansão térmica entre diferentes áreas da peça ou entre a peça e a mobília de enforna;



Figura 3.2 - Lavatório com empeno superior a 3 mm.

- Depressões (figura 3.3) e porosidades (figura 3.4): são espaços vazios ou cavidades na estrutura cerâmica, que podem ser visíveis na superfície ou internamente. Estes defeitos podem ser causados pela presença de gases ou impurezas na matéria-prima, pela liberação de gases durante a cozedura ou por má distribuição de calor;



Figura 3.3 – Pia de lavatório com depressões



Figura 3.4 – Poro.

- Quebras da superfície (figura 3.5): são falhas estruturais nas peças cerâmicas que resultam na separação de partes da superfície ou na divisão da peça em fragmentos. Podem ocorrer devido a tensões internas, excesso de pressão ou manuseio inadequado das peças;



Figura 3.5 – Quebra de superfície.

- Despigmentação ou variação de cor (figura 3.6) que, por sua vez, podem ser causadas por variações na temperatura de cozedura, composição inadequada do vidrado ou devido à interação entre os componentes da peça e do vidrado.



Figura 3.6 – Falta de vidro no arco de uma bacia.

É importante realçar que a ocorrência desses defeitos pode ser influenciada por diversos fatores, tais como a formulação da barbotina, o processo de fabricação, a temperatura de cozedura, o tempo de cozedura, a taxa de aquecimento e arrefecimento, entre outros. Posto isto, a otimização dos parâmetros de cozedura e o controlo adequado desses fatores são essenciais para minimizar a ocorrência de defeitos nas peças [5].

3.3. Empeno

Um dos problemas comuns de qualidade da loiça sanitária é o empeno que, por sua vez, surge após as peças serem submetidas à cozedura [11]. O empeno consiste numa deformação ou curvatura indesejada, tal como é demonstrado nas figuras 3.7 e 3.8.



Figura 3.7 – Bidé, da série Two suspensa, empenado.



Figura 3.8 – Bacia, da série Two suspensa, empenada.

Durante o processo de cozedura a altas temperaturas, é importante compreender que a contração ocorre à medida que a peça cerâmica passa por alterações físicas e químicas. A contração consiste numa resposta natural ao calor e às transformações estruturais que ocorrem na cerâmica, à medida que esta é aquecida. Este fenómeno pode ser particularmente acentuado e crítico em várias etapas do processo produtivo [12].

Quando submetida à cozedura e antes da sinterização, a cerâmica passa de um estado frágil para um estado dúctil, o que significa que a sua fluidez aumenta, bem como a capacidade de ser deformada sob pressão [12].

À medida que as partículas cerâmicas se reorganizam e a estrutura química se fortalece, o corpo cerâmico contrai. A contração surge assim como resultado destas mudanças estruturais, sendo inevitável e, em alguns casos, bastante significativa [12].

Durante a contração, é crucial evitar deformações, tais como o empeno. Uma das principais causas deste defeito reside no facto de, durante a cozedura, parte do corpo cerâmico entrar em contacto com as placas de suporte à enforna, sendo que estas podem não permitir a contração adequada. Assim, o atrito que se gera entre a peça e a placa de suporte, cria tensões internas que, por sua vez, podem resultar em deformações [12]. Na figura 3.9, está representado um esquema da contração e da força de atrito verificadas durante o processo de cozedura.



Figura 3.9 – Esquema representativo das direções da contração e força de atrito, durante a cozedura.

O atrito é uma força que se manifesta sempre que duas superfícies entram em contacto e se movem, uma em relação à outra. Resulta das interações entre as irregularidades microscópicas das superfícies em contacto, que faz com que estas resistam ao movimento, gerando as forças de atrito. Estas forças consistem num fenómeno complexo que, por sua vez, depende de vários fatores, de entre eles destacam-se [19]:

- A força normal, proporcional à superfície de contacto. Esta depende da gravidade e da inclinação das superfícies. Quanto maior é a força normal entre as superfícies, maior será o atrito. O que significa que, pressionar as superfícies juntas, aumenta o atrito;
- O coeficiente de atrito. Cada material tem o seu próprio coeficiente de atrito, sendo que superfícies mais ásperas ou aderentes possuem coeficientes de atrito mais elevados;
- A área efetiva de contacto que, por sua vez, consiste na região em que as superfícies das partículas estão verdadeiramente em contacto umas com as outras. Mantendo-se outros fatores constantes, quanto maior essa área, maior será a força de atrito.

Existem dois tipos de atrito: o estático e o cinético.

O atrito estático ocorre quando dois objetos estão em repouso e uma força externa é aplicada para tentar movê-los. Inicialmente, os objetos permanecem parados devido ao atrito estático, que se opõe ao movimento [19].

O atrito cinético ocorre quando dois objetos estão em movimento relativo um em relação ao outro. Neste caso, o atrito cinético atua para resistir à continuação do movimento ou para desacelerar os objetos [19].

Assim como foi mensurado na subsecção 3.1, este problema de qualidade traduz-se numa série de perdas para a produção, surgindo com maior incidência em bacias e bidés suspensos. A área mais afetada destas peças está identificada, na figura 3.10, pela posição 11 [12]. Por sua vez, esta zona é a que entra em contacto com o suporte de enforna no processo de cozedura de bacias e bidés suspensos, tal como se encontra apresentado na figura 3.9.

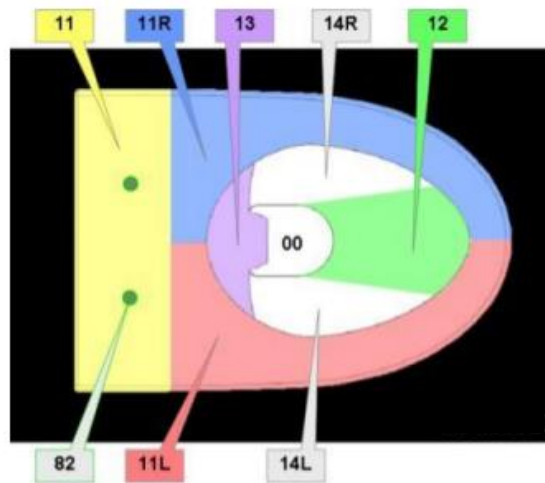


Figura 3.10 – Locais da peça que possam estar empenados [12].

Em bacias e bidés compactos (figura 3.11), a zona das peças que entra em contacto com a placa de enforna é o “pé”.



Figura 3.11 – Enforna de uma bacia Oceanus compacta.

A cozedura perfeita, sob o ponto de vista geométrico, é obtida quando as peças se encontram planas em todas as regiões do forno [13]. Por exemplo, na figura 3.12, é possível observar uma peça empenada a sair do forno, devido ao facto da placa refratária em que esta assentava ter partido [11].



Figura 3.12– Placa refratária partida que, conseqüentemente, deu origem a uma peça empenada [11].

Tal como foi mencionado na subsecção 2.3, os fornos de chama aberta estão divididos por zonas, sendo que cada uma delas desempenha um papel fundamental no processo de transformação das peças cerâmicas.

Zona de pré-aquecimento

Na região de pré-aquecimento, podem surgir problemas geométricos, principalmente de planaridade, quando a velocidade de aquecimento ou a diferença de temperaturas entre as partes superior e inferior do forno, não são adequadas para o material que está a ser queimado [13].

Este defeito pode ocorrer quando o gradiente térmico (diferença entre as temperaturas nas duas superfícies divididas pela espessura da peça) utilizado na fase de pré-aquecimento é demasiado elevado em relação às características do produto que está a ser queimado. Este gradiente gera tensões na peça de tal ordem que origina uma curvatura [13].

Zona de cozedura

A regulação do forno tem por finalidade a otimização da planaridade das peças cozidas. Contudo, temos de ter em consideração as variações dimensionais que a peça sofre quando expostas às temperaturas da curva de cozedura [13].

Considere-se uma peça no forno, imaginando-a cortada ao meio. Analisando, separadamente, o que ocorre em cada uma das partes, superior e inferior, pode-se dizer que a parte exposta a temperaturas mais elevadas irá sofrer uma contração maior face à outra parte, durante a cozedura. Da mesma forma, a parte superior da peça, que está “livre” e sem restrições, tende a contrair mais significativamente. A parte inferior da peça, por sua vez, como está em contacto com o suporte de enfora, sofre uma contração menor, devido ao atrito gerado pelo contacto com este. Nesta zona, é mais propício que a peça sofra uma deformação até ficar côncava [13].

O nível de deformação da peça depende da diferença de temperatura, da contração do corpo cerâmico quando submetido às duas temperaturas extremas e da espessura da peça. No que diz respeito a este último fator, a espessura da peça, sabe-se que, quanto maior esta for, menor será a deformação [13].

Acrescenta-se ainda que, no que diz respeito a ciclos de cozedura muito rápidos, as trocas de calor entre a camada envolvente e a peça, fazem com que a superfície da peça seja aquecida mais rapidamente face ao seu interior, dando origem a gradientes de temperatura. Esta situação torna-se ainda mais crítica para as extremidades das peças [13].

Assim, é conveniente considerar os efeitos, não só dos parâmetros cinéticos e dinâmicos, como também dos mecânicos, onde se insere o tipo de mobília de sustentação das peças e a planaridade da mesma [13].



4. Tecnologia proposta

O atrito que se gera entre a peça e o refratário de suporte à cozedura, resultado da contração térmica das peças cerâmicas durante esta fase, pode gerar tensões e deformações indesejadas, dando origem a defeitos, tais como o empeno. De forma a tentar minimizar este problema, desenvolveu-se uma mobília para sustentação das peças cerâmicas, constituída por elementos móveis, cujo movimento deve acompanhar a contração das peças e, simultaneamente, proporcionar o suporte adequado. O objetivo é que a peça, enquanto contrai, arraste as placas móveis. O acompanhamento do movimento de contração por parte do suporte de enforna promove a redução do atrito gerado entre a peça e a placa.

A aplicação da tecnologia desenvolvida é destinada, principalmente, às bacias da série *Two* e *Nautilus* suspensas. Esta escolha deve-se ao facto das bacias suspensas serem as mais afetadas pelo empeno, tal como está justificado na subsecção 3.1. A posição 11 (figura 3.10) destas bacias é a mais propensa a sofrer deformações por empeno.

4.1. *Design*

Esta tecnologia é composta por quatro elementos móveis quadrados com 18 cm de largura, esquematizados na figura 4.1.

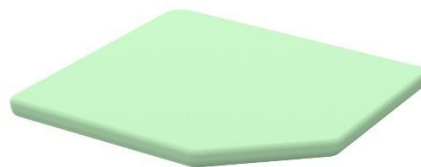


Figura 4.1 – Esquematização de um dos elementos móveis, em formato quadrado.

Estes elementos móveis estarão assentes numa manta refratária, constituída por alumina, Al_2O_3 , à qual se fez menção no subcapítulo 2.3 – material refratário. A alumina desempenha um papel fundamental ao proporcionar uma superfície lisa que, por sua vez, facilitará a movimentação dos quatro elementos, reduzindo o atrito. Para além disso, a alumina permite ainda que, durante a cozedura, as placas não colem ao tabuleiro.

A parte inferior dos elementos móveis (a que está em contacto com a alumina) deve possuir um acabamento liso para reforçar a minimização das tensões entre estas e a alumina.

A alumina, por sua vez, será colocada dentro de um caixilho, de modo a evitar a sua dispersão e consequente contaminação das peças vizinhas. De forma análoga à parte inferior dos elementos móveis, também a parte superior do tabuleiro, que se encontra em contacto com a alumina, deve possuir um acabamento liso. O losango, que se encontra no meio do tabuleiro, é oco para que seja facilitada a circulação de ar, o que vai auxiliar na homogeneidade de temperaturas nos vários pontos da peça, diminuindo o gradiente térmico gerado entre as suas extremidades e o seu interior. Na figura 4.1.2, encontra-se um esquema da tecnologia idealizada. O sentido das setas representa a trajetória do movimento.

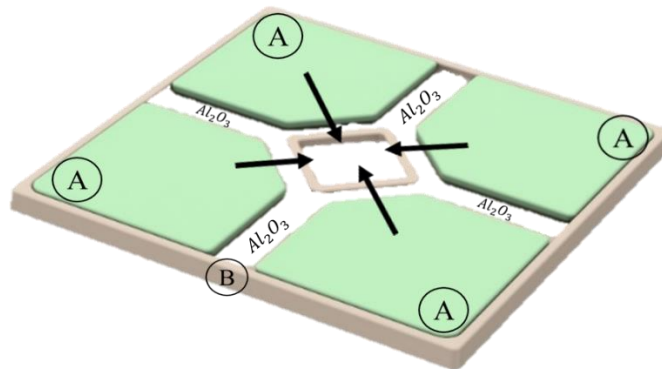


Figura 4.2 – Esquematização da tecnologia idealizada (os quatro elementos móveis – A, o caixilho – B, e a alumina, Al_2O_3).

Tanto os elementos móveis como o caixilho serão produzidos na ARCH em Gresanit[®], ao qual já se fez menção na secção 2.1.2. Esta barbotina cerâmica dá origem a um material que combina um baixo nível de deformação e alta resistência mecânica, daí ter sido escolhida para ser a base desta tecnologia.

Importa realçar que, tanto os elementos móveis como o tabuleiro, foram desenhados com uma certa inclinação. Assim, o grau de inclinação das placas é compensado por uma inclinação no tabuleiro, de modo a facilitar ainda mais o movimento. Nas figuras 4.3 a 4.5, isso é perceptível.



Figura 4.3 – Esquematização da vista de cima dos elementos móveis.



Figura 4.4 – Esquematização da vista de baixo dos elementos móveis.



Figura 4.5 - Esquematização da tecnologia idealizada (vista de corte).

Tanto o tabuleiro, como os quatro elementos móveis, são cheios por dentro, de modo a aumentar a resistência mecânica. Todas as esquinas verticais e gumes mais finos, incluindo o perímetro de espessura dos elementos móveis são arredondados, de modo a evitar que estes se partam.

4.2. Conceção da peça

A conceção da peça (tabuleiro e quatro elementos móveis) é um processo meticuloso, que passa por várias etapas cruciais, e cada uma desempenha um papel fundamental na criação da peça final.

Inicia-se com a conceção do molde, onde se traduz a forma e o *design* previamente definidos da peça em elementos concretos.

Numa placa de gesso, esculpiu-se o modelo referente aos elementos móveis, tendo em consideração as medidas e as inclinações pré-determinadas. De seguida, fundiu-se o modelo com uma placa de gesso quadrada, tal como está demonstrado pela figura 4.6.



Figura 4.6 – Fusão do modelo da placa com uma placa de gesso quadrada.

À volta do modelo, posicionou-se quatro placas de madeira, criando uma espécie de caixa que o vai envolver completamente. Para segurar firmemente as placas juntas, usou-se grampos ou presilhas, de modo que não houvesse vazamentos de gesso. Posteriormente, preparou-se uma mistura de gesso e despejou-se, cuidadosamente, para dentro da caixa formada pelas placas, procurando garantir que o modelo ficava completamente coberto pelo gesso. Após o gesso estar completamente seco, retirou-se os grampos, removeu-se as placas e separou-se ambas as partes, em que uma diz respeito ao modelo (figura 4.6) e a outra consiste numa forma perdida, que apresenta uma cavidade exata do modelo. Na figura 4.7, é apresentada a forma perdida que, por sua vez, será usada para fazer o modelo do tabuleiro.



Figura 4.7 – Forma perdida das placas.

Para fazer o molde dos elementos móveis, recorreu-se à estrutura apresentada na figura 4.6, posicionando-se quatro placas de gesso à volta desta, seguras com grampos. Preparou-se uma mistura rigorosa de gesso e despejou-se para dentro da caixa formada pelas quatro placas,

garantindo que o modelo ficava completamente coberto pelo gesso. Após o gesso estar completamente seco, retirou-se os grampos, removeu-se as placas e separou-se ambas as partes, em que uma diz respeito ao modelo (figura 4.6) e a outra consiste numa das partes do molde final, representada na figura 4.8.



Figura 4.8 – Uma das duas partes do molde final das placas.

Para fazer a parte complementar do molde, encheu-se com gesso a cavidade do molde apresentada na figura 4.8. Deixou-se secar, raspou-se e uniformizou-se a superfície, de forma que o gesso que encheu a cavidade do molde tenha a altura da restante superfície do mesmo. À volta do molde (figura 4.8), posicionou-se novamente quatro placas de gesso, seguras com grampos. Preparou-se uma mistura rigorosa de gesso e despejou-se para dentro da caixa formada pelas quatro placas. Após o gesso estar completamente seco, retirou-se os grampos, removeu-se as placas e separou-se ambas as partes. Estas, após serem submetidas a um ligeiro processo de acabamento, dão origem ao molde dos elementos móveis, apresentado na figura 4.9.



Figura 4.9 – Molde das placas.

O modelo do tabuleiro, por sua vez, foi efetuado através da fusão de quatro elementos móveis de gesso (obtidos a partir do enchimento da cavidade da estrutura apresentada na figura

4.7) com uma placa quadrada de gesso. Para além disso, teve de se esculpir um quadrado com a altura do tabuleiro e fundi-lo no meio do modelo, para que, posteriormente, desse origem ao losango oco (figura 4.2). O método que se seguiu para dar origem ao molde do tabuleiro é semelhante ao método seguido para dar origem ao molde dos elementos móveis. Na figura 4.2.5, apresenta-se o método de enchimento com gesso de uma das partes que iria constituir o molde do tabuleiro.



Figura 4.10 – Método de enchimento com gesso.

Em seguida, procedeu-se ao enchimento dos moldes com a barbotina cerâmica *Gresanit*[®].

Os moldes são constituídos por duas entradas, ambas para enchimento, de modo a otimizar a compactação da barbotina. O enchimento é efetuado manualmente, com o auxílio de funis. Esta etapa está representada pela figura 4.11.

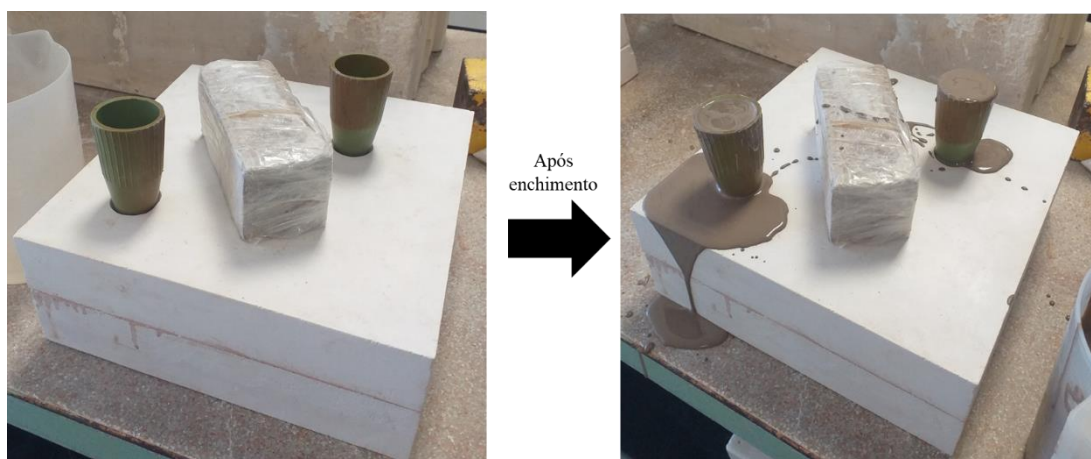


Figura 4.11 – Enchimento do molde das placas.

Após secagem da barbotina, o molde é aberto (figura 4.12) e a peça é removida cuidadosamente e deixada a repousar.

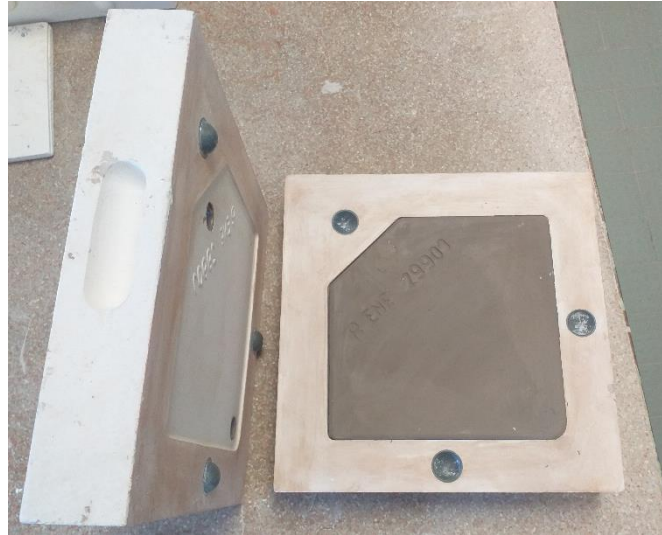


Figura 4.12 – Molde das placas aberto, após secagem da barbotina.

Posteriormente, a peça, após sair do molde, é submetida a duas etapas de secagem: a secagem em verde (figura 4.13) e a secagem branca, as quais foram mencionadas anteriormente na subsecção 2.2.6, de modo a garantir a estabilidade e resistência adequadas.



Figura 4.13 – Secagem, em verde, do tabuleiro.

Após os tempos de secagem terem sido devidamente cumpridos, a peça é submetida ao processo de cozedura. Na figura 4.14, está representado o tabuleiro a entrar no forno. Importa realçar que, tanto os tabuleiros como as placas móveis, devem ser cozidas em cima de placas totalmente niveladas, não podendo estar empenadas. Por isso, antes da enfora destas peças, deve ser efetuada uma verificação cuidada. Uma vez que o objetivo desta tecnologia é minimizar empenos, importa que, tanto as placas móveis, como o tabuleiro, estejam o mais niveladas possível.



Figura 4.14 – Tabuleiro a iniciar o processo de cozadura, após secagem branca.

Por fim, obtém-se a peça final (figura 4.15), pronta a ser ensaiada.



Figura 4.15 – Peça final, pronta a ser ensaiada.

5. Método de cálculo

Nesta secção, serão apresentados os métodos e as abordagens utilizadas para calcular e comparar o consumo energético e as reduções de dióxido de carbono entre a duas configurações, isto é, entre a mobília refratária de suporte e a tecnologia desenvolvida. A análise destes parâmetros é crucial para avaliar o impacto ambiental e económico das melhorias implementadas.

A curva de cozedura que, por sua vez, diz respeito ao forno 1, encontra-se representada na figura 5.1.

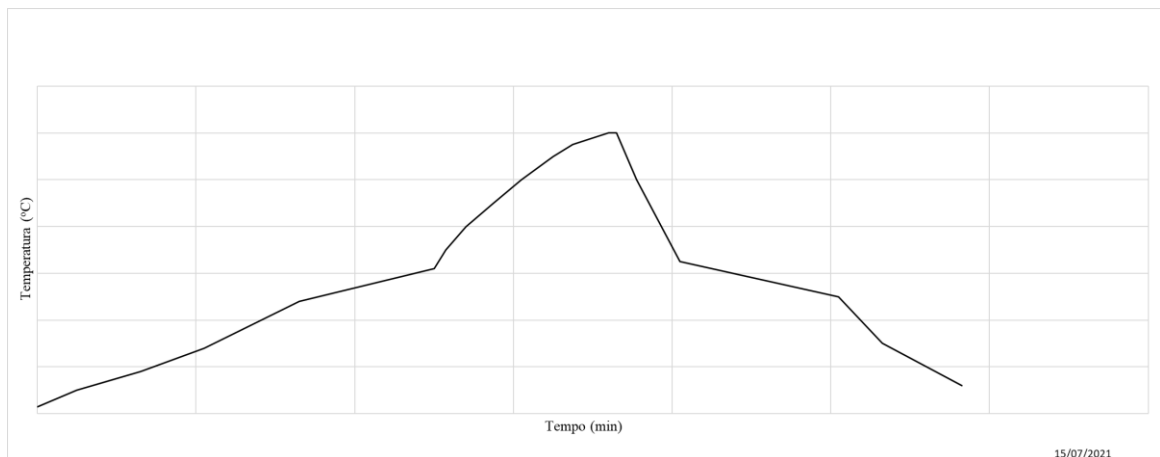


Figura 5.1 – Curva de cozedura do forno 1.

Para cada segmento da curva, é calculado o calor absorvido no aquecimento por cada configuração, através da equação 5.1:

$$Q = m \bar{c}_p \Delta T \quad (5.1)$$

Em que Q representa a energia absorvida, em kJ, m e \bar{c}_p a massa e o respetivo poder calorífico médio de cada configuração, em kg e kJ/(kg °C), respetivamente, e ΔT o intervalo de temperaturas registado na curva de cozedura, em °C.

Para a mobília refratária de suporte, que é composta essencialmente por cordierite, utilizou-se, por aproximação, o poder calorífico médio da cordierite, que é de 1,464 kJ/(kg °C). Da mesma forma, para a tecnologia desenvolvida que, por sua vez, é composta, na sua grande maioria, por mulite, utilizou-se, por aproximação, o poder calorífico médio da mulite, que é de 0,962 kJ/(kg °C) [21].

Após se obter o calor absorvido, faz-se um somatório dos vários segmentos (Q_1, Q_2, Q_3, \dots), obtendo-se a energia consumida para o aquecimento de ambas as configurações (equação 5.2), por cozedura, Q_T , em kJ.

$$Q_T = \sum (Q_1, Q_2, Q_3, \dots) \quad (5.2)$$

Posteriormente, obtém-se a quantidade de gás natural gasto (equação 5.3), V_{GN} , em Nm^3 , que equivale à energia absorvida, tendo em conta que o fator de conversão é de 37008 kJ/Nm^3 .

$$V_{GN} = \frac{Q_T}{37008} \quad (5.3)$$

O custo de cada Nm^3 , €/m^3 , de gás é de $0,36\text{€}$. Posto isto, o cálculo do custo do aquecimento de cada unidade de suporte utilizada (equação 5.4), Custo_{eq} , em euros, faz-se da seguinte forma:

$$\text{Custo}_{eq} = V_{GN} \text{ €/m}^3 \quad (5.4)$$

A ARCH labora 330 dias por ano e, cada ciclo de trabalho diário, envolve 42 vagonas. Para efeitos de cálculo, vamos assumir que cada vagona contém 3 placas de cada uma das configurações, o que totaliza 6 placas por vagona. Posto isto, anualmente, utilizam-se 41580 unidades de cada uma das configurações.

Para calcular a quantidade de gás natural consumido anualmente (equação 5.5), V_{GN}/ano , em m^3/ano , no aquecimento de cada configuração, o cálculo a efetuar é o seguinte:

$$V_{GN}/ano = 41580 V_{GN} \quad (5.5)$$

O custo associado ao gás natural consumido anualmente (equação 5.6), Custo_{eq}/ano , em euros/ano, para o aquecimento de cada configuração, é dado por:

$$\text{Custo}_{eq}/ano = 41580 \text{Custo}_{eq} \quad (5.6)$$

A redução do consumo de gás natural (equação 5.7), Redução_{GN} , em m^3/ano , é dada por:

$$\text{Redução}_{GN} = V_{GN}/ano_1 - V_{GN}/ano_2 \quad (5.7)$$

Sendo que o 1 em índice corresponde à mobília refratária de suporte e 2 à tecnologia desenvolvida.

Do mesmo modo, a redução do consumo de energia (equação 5.8), Redução_{Q_T} , em MWh, obtém-se através da seguinte expressão:

$$Redução_{Q_T} = \frac{41580 (Q_{T_1} - Q_{T_2})}{3600000} \quad (5.8)$$

Cada m³ de gás natural, emite para a atmosfera cerca de 2,164 kg de dióxido de carbono [22]. Posto isto, a redução das emissões de dióxido de carbono (equação 5.9), $Redução_{CO_2}$, em t/CO₂, é dada por:

$$Redução_{CO_2} = \frac{2,164 Redução_{GN}}{1000} \quad (5.9)$$



6. Resultados e discussão

No âmbito deste estudo, concentramo-nos no desenvolvimento e avaliação de uma tecnologia inovadora destinada a minimizar o atrito entre as peças cerâmicas e a mobília de sustentação durante o processo de cozedura, com o objetivo de prevenir empenos indesejados.

Esta tecnologia consiste em quatro elementos móveis, estrategicamente posicionados num tabuleiro, onde é colocada uma camada de alumina. Antes da cozedura, estes quatro elementos encontram-se adjacentes às margens do tabuleiro.

A eficácia desta mobília de sustentação é de vital importância para a indústria cerâmica, uma vez que o empeno de peças cerâmicas durante a cozedura pode resultar em defeitos significativos, fazendo com que as peças sejam encaminhadas para quebras, o que leva a custos adicionais de produção.

Os ensaios foram realizados no forno 1 da *ARCH*, classificado como forno de chama aberta (subsecção 2.3). Foram efetuados ensaios diários, onde uma bacia suspensa foi posicionada sobre a mobília de sustentação desenvolvida. A análise destes ensaios visa determinar se a tecnologia é eficaz na minimização do atrito e, conseqüentemente, na prevenção de empenos durante a cozedura.

Nesta secção, serão apresentados os principais resultados obtidos a partir dos ensaios realizados, sendo discutidas as suas implicações no contexto da pesquisa efetuada.

6.1. Primeiro ensaio

No primeiro ensaio, utilizou-se, no tabuleiro, uma camada de alumina em pó, não calcinada, com, aproximadamente, 3 mm de altura (figura 6.1).

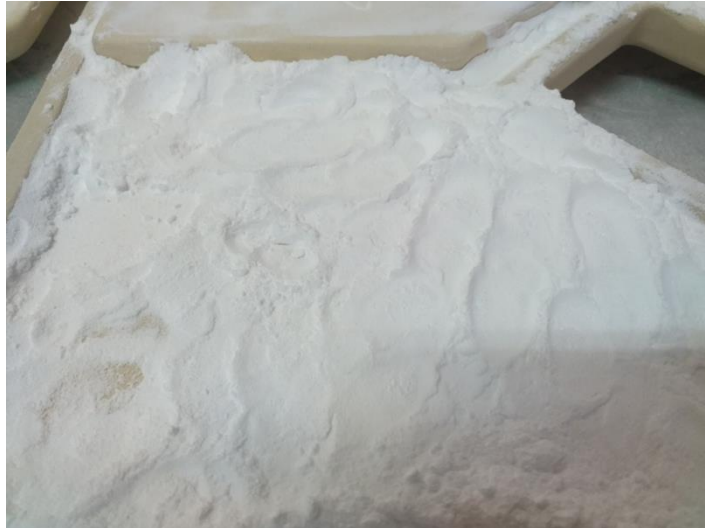


Figura 6.1 – Alumina em pó, não calcinada, sobre o tabuleiro.

Foi utilizada uma bacia da série *Nautilus* suspensa sobre o suporte desenvolvido, assim como demonstra a figura 6.2.



Figura 6.2 – Bacia da série Nautilus suspensa, sobre o suporte desenvolvido.

Através na análise da figura 6.3, é possível concluir que este ensaio não obteve sucesso, uma vez que as quatro placas de sustentação não se moveram durante o processo de cozedura.



Figura 6.3 – Movimentação verificada pelas placas, após cozedura (1º ensaio).

Para além disso, observou-se uma ligeira deformação no espaldar da bacia suspensa, tal como demonstra a figura 6.4.



Figura 6.4 – Espaldar da bacia Nautilus suspensa, com uma ligeira deformação (1º ensaio).

A quantidade elevada de alumina no tabuleiro pode ter contribuído significativamente para a falta de mobilidade das placas. Isto porque criou-se uma superfície de contacto mais extensa entre as placas de suporte e a superfície da alumina, o que gerou um atrito significativo e impediu o movimento pretendido. A ligeira deformação verificada no espaldar da bacia sugere a presença de tensões indesejadas durante o processo de cozedura.

6.2. Segundo ensaio

No segundo ensaio, foram realizadas ações de melhoria face ao primeiro ensaio, com o objetivo de abordar as observações feitas anteriormente. As principais melhorias incluíram a substancial redução na quantidade de alumina (figura 6.5) e a utilização de alumina calcinada,

que possui uma textura mais macia e acetinada. Para realizar este ensaio, recorreu-se a duas bacias, uma da série *Nautilus* suspensa e outra da série *Two* suspensa.



Figura 6.5 – Redução substancial da quantidade de alumina sobre o tabuleiro.

Pela observação da figura 6.6, percebe-se que, efetivamente, as placas moveram-se durante o processo de cozedura de ambas as bacias. É importante notar que, face ao seu maior peso, a Bacia *Nautilus* apresentou uma movimentação mais perceptível, face à bacia *Two*. No entanto, é relevante observar que, independentemente das diferenças de peso, as duas placas traseiras moveram-se mais do que as duas da frente.

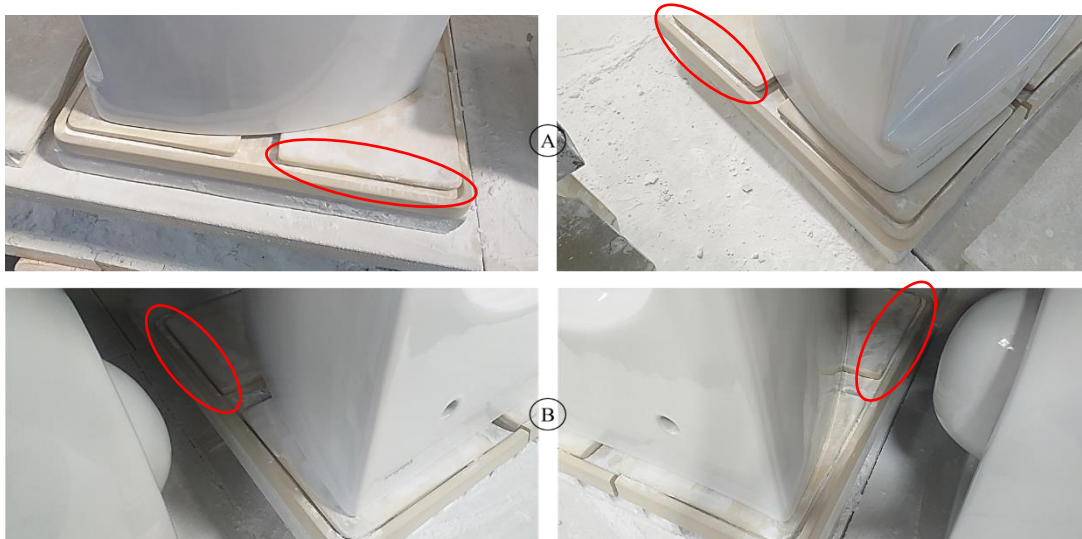


Figura 6.6 – Movimentação verificada pelas placas, após cozedura (2º ensaio), para a bacia Nautilus (A) e Two suspensa (B).

No entanto, destaca-se o facto do movimento das placas ter sido acompanhado por um evento crítico: a rotura dos tabuleiros, e de maneira idêntica em ambos os casos, tal como está demonstrado na figura 6.7.



Figura 6.7 – Suportes de sustentação, para as bacias Nautilus (A) e Two suspensas (B), ambos com o tabuleiro fraturado.

Uma vez que ambas as bacias se encontravam deformadas, ainda que as placas se tivessem deslocado, sugere que o facto de os tabuleiros terem partido tornou possível o movimento das placas de trás, uma vez que este fraturou por baixo destas. Na figura 6.8, está representada a deformação acentuada apresentada bacia *Nautilus* suspensa.



Figura 6.8 – Deformação acentuada apresentada pela bacia Nautilus suspensa (2º ensaio).

A fratura apresentada pelos tabuleiros está relacionada com os gradientes de temperatura gerados nos tabuleiros durante o processo de cozedura. Em áreas que estão em contacto com as placas, a temperatura é mais elevada. Enquanto nas áreas “descobertas”, a temperatura é mais baixa. Este contraste de temperatura gerou tensões significativas nos tabuleiros, levando à sua rotura.

É importante realçar que, no primeiro ensaio, a presença de uma camada de alumina com 3 mm atuou, possivelmente, como isolante térmico, reduzindo os gradientes de temperatura e evitando a rotura do tabuleiro. Neste segundo ensaio, ao remover essa camada, os gradientes de temperatura tornaram-se mais acentuados, o que resultou na rotura dos tabuleiros.

Após este ensaio, analisou-se a fratura verificada no tabuleiro (figura 6.9), e observou-se duas características distintas na sua superfície:



Figura 6.9 – Análise da fratura verificada no tabuleiro.

- A. Superfície lisa próxima do ponto de enchimento (A): esta área da superfície de fratura encontra-se relativamente lisa, o que indica que a região próxima do ponto de enchimento encontrava-se bem compactada.
- B. Superfície rugosa longe do ponto de enchimento (B): em contraste, a área distante do ponto de enchimento exibia uma superfície rugosa. Tal rugosidade pode ser interpretada como um sinal de que a compactação das partículas, nessa região, foi menos eficiente. O facto das partículas não estarem devidamente compactadas pode resultar numa estrutura menos coesa e, conseqüentemente, numa menor dureza e resistência mecânica.

Para se obter melhorias neste aspeto, introduziu-se uma modificação no molde do tabuleiro, adicionando-se dois novos pontos de enchimento, posicionados imediatamente acima e abaixo do losango. Anteriormente, havia apenas quatro pontos de enchimento localizados nas extremidades do molde. Essa alteração esquematizada na figura 6.10.

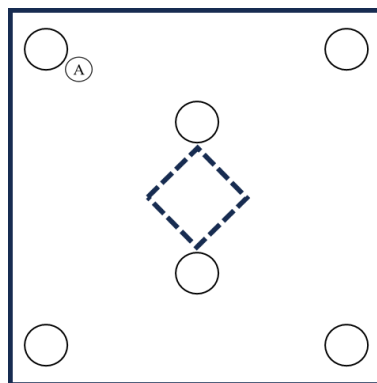


Figura 6.10 – Esquema da alteração do molde do tabuleiro.

A adição destes dois novos pontos de enchimento teve como objetivo assegurar que a barbotina cerâmica, ao entrar pelas extremidades do molde e alcançar esses pontos centrais, não

sofra mudanças abruptas de direção. Tal facto pode levar a uma má compactação das partículas, o que pode afetar negativamente a qualidade e a resistência do material.

6.3. Terceiro ensaio

Neste ensaio, como demonstrado na figura 6.11, optou-se por utilizar um dos dois tabuleiros que partiram ao meio no segundo ensaio (figura 6.7), uma vez que, nessa terceira cozedura, foram eliminadas possíveis tensões residuais acumuladas.

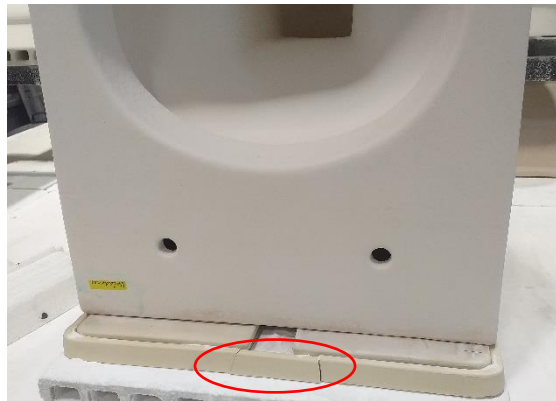


Figura 6.11 – Bacia da série Two suspensa, colocada em cima do suporte desenvolvido (que incorpora as quatro placas e o tabuleiro fraturado).

Tal facto é vantajoso, porque, uma vez libertadas as tensões, este tabuleiro não partirá mais em cozeduras subsequentes, tornando-o apto para uso. Em cima do tabuleiro, colocou-se uma reduzida quantidade de alumina.

Para a realização deste ensaio, recorreu-se a uma bacia da série *Two* suspensa.

Após cozedura da bacia (figura 6.12), observou-se que ambas as placas se movimentaram ligeiramente do lado direito. Do lado esquerdo, a placa da frente apresentou um movimento mais acentuado. Pode-se atribuir esta assimetria à contração não uniforme da bacia durante o processo de cozedura.

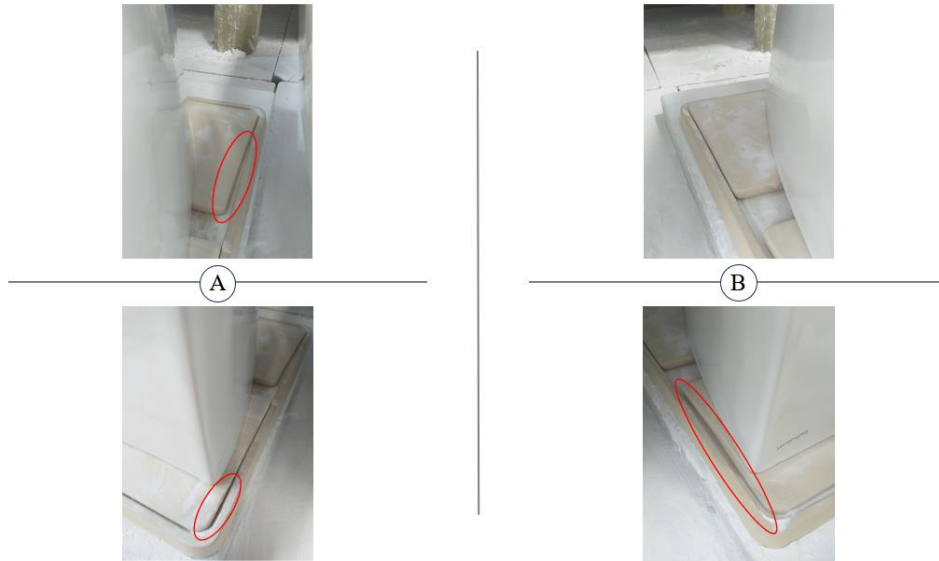


Figura 6.12 – Movimentação verificada pelas placas, após cozedura (3º ensaio). Na figura, a letra A representa o lado direito da bacia e a letra B o lado esquerdo.

No que diz respeito ao empeno, a bacia da série *Two* suspensa exibiu uma deformação praticamente insignificante e dentro dos limites aceitáveis, tal como se encontra demonstrado na figura 6.13.



*Figura 6.13 – Empeno verificado na bacia da série *Two* suspensa, após cozedura (3º ensaio).*

Apesar de se verificarem movimentações, implementou-se uma ação de melhoria, que envolveu a alteração do molde das placas e, logicamente, das placas. À zona inferior destas, foram adicionadas semiesferas, de modo a reduzir os pontos de contacto entre as placas e o tabuleiro e, conseqüentemente, aumentar a facilidade com que as placas efetuavam o movimento para o qual foram concebidas.

6.4. Quarto ensaio

Neste ensaio, foi utilizada uma bacia da série *Nautilus* suspensa, um tabuleiro partido e placas com semiesferas na zona inferior. Como já mencionado anteriormente, a introdução de

semiesferas visa melhorar a facilidade de movimento, reduzindo os pontos de contacto entre as placas e o tabuleiro. Para além disso, a quantidade de alumina colocada sobre o tabuleiro manteve-se a mínima.

Após cozedura da bacia, observou-se que as placas não apresentaram qualquer movimento (figura 6.14), mantendo-se adjacentes às margens do tabuleiro. Depois de remover a bacia de cima do suporte, conclui-se que as placas aderiram à base do tabuleiro, o que impediu o movimento destas.



Figura 6.14 – Movimentação verificada pelas placas, após cozedura (4º ensaio).

Por outras palavras, a base das semiesferas colou-se ao tabuleiro. A pressão exercida pela bacia, ao ser colocada em cima do suporte, fez com que as semiesferas perfurassem a camada de alumina e, conseqüentemente, aderissem ao tabuleiro. Como resultado, as placas não acompanharam o movimento de contração da bacia, e esta contraiu em cima destas, invés de as arrastar.

Para enfrentar este desafio e melhorar a capacidade das placas se movimentarem com maior facilidade, implementou-se uma ação de melhoria que, por sua vez, envolveu o aumento da quantidade de alumina no tabuleiro, tal como demonstrado na figura 6.15.



Figura 6.15 – Disposição da alumina no tabuleiro.

Importa realçar que, antes de ser utilizada, a alumina deve passar por um processo de calcinação e, posterior, peneiração, de modo a garantir uma distribuição uniforme das partículas. Tal facto irá promover a redução do atrito entre as placas e a alumina. Para além disso, a espessura da camada de alumina deve ser dimensionada, de modo a ser maior face ao raio das semiesferas.

6.5. Quinto ensaio

Para a realização deste ensaio, recorreu-se a uma bacia da série *Two* suspensa. O tabuleiro utilizado encontrava-se partido e, sobre este, foi colocada uma quantidade de alumina superior (figura 6.15), face ao ensaio anterior. Como já mencionado, a alumina encontrava-se calcinada e peneirada.

Após cozedura da bacia (figura 6.16), observou-se que as placas apresentaram um movimento significativo. As duas placas da frente apresentaram ambas um movimento claro. No que diz respeito às duas placas de trás, ambas se movimentaram, contudo, o movimento foi mais perceptível na placa do lado direito.



Figura 6.16 – Movimentação verificada pelas placas, após cozedura (5º ensaio).

Em termos de empeno (figura 6.17), a bacia apresentou um resultado altamente satisfatório, uma vez que a parte superior desta permaneceu em linha reta, não apresentando uma forma côncava. Tal facto, por sua vez, demonstra que as melhorias introduzidas contribuíram para a prevenção eficaz de defeitos, mais concretamente, do empeno.



Figura 6.17 – Empeno verificado na bacia da série Two suspensa, após cozedura (5º ensaio).

O movimento efetuado pelas placas, concordante com os objetivos desta dissertação, indicou que as mudanças implementadas, incluindo a introdução de semiesferas na parte inferior das placas e o aumento da quantidade de alumina (calcinada e peneirada) no tabuleiro, produziram os efeitos desejados.

É importante realçar o facto deste ensaio ter sido reproduzido várias vezes, segundo as mesmas condições. Na maior parte das repetições, os resultados mostraram-se favoráveis. Contudo, observou-se uma variação notável, com base no peso das bacias. Isto é, a cozedura de bacias mais leves resultou num movimento menos pronunciado por parte das placas. Enquanto a

cozedura de bacias mais pesadas traduziu-se num movimento mais significativo. Tal facto era esperado, uma vez que bacias mais pesadas, embora introduzam maior pressão sobre as placas, possuem uma maior capacidade em arrastá-las no seu movimento de contração.

Por exemplo, numa das reproduções deste quinto ensaio, utilizou-se uma bacia da série *Two* suspensa, da tipologia *rimless* que, por sua vez, é notavelmente mais leve em comparação com a bacia *Two* suspensa convencional. O tabuleiro utilizado encontrava-se inteiro e o molde que lhe deu origem apresentava seis pontos de enchimento. Esta alteração, que consistiu em aumentar a resistência mecânica do tabuleiro, encontra-se representada na figura 6.11.

Após cozedura da bacia, as placas moveram-se, porém de forma menos acentuada, como está demonstrado na figura 6.18.

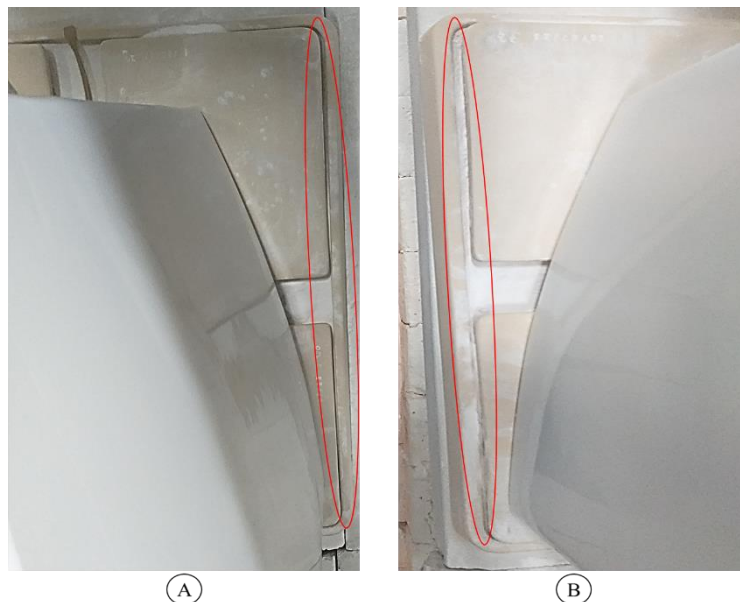


Figura 6.18 – Movimentação verificada pelas placas, após cozedura (reprodução do 5º ensaio).

O tabuleiro, apesar da alteração, fraturou (figura 6.19). Tal facto sugeriu que a alteração na quantidade de pontos de enchimento não foi suficiente para aumentar a resistência mecânica do tabuleiro. Outras estratégias, tais como o reforço da zona central do tabuleiro, devem ser consideradas, de modo a tentar solucionar este problema.



Figura 6.19 – Tabuleiro, originado a partir do molde com 6 pontos de enchimento, fraturado.

No que diz respeito ao empeno da bacia, apresentado na figura 6.20, o resultado foi aceitável. Comparando com o empeno verificado pela bacia referenciada na figura 3.8, é possível evidenciar uma redução significativa deste defeito.

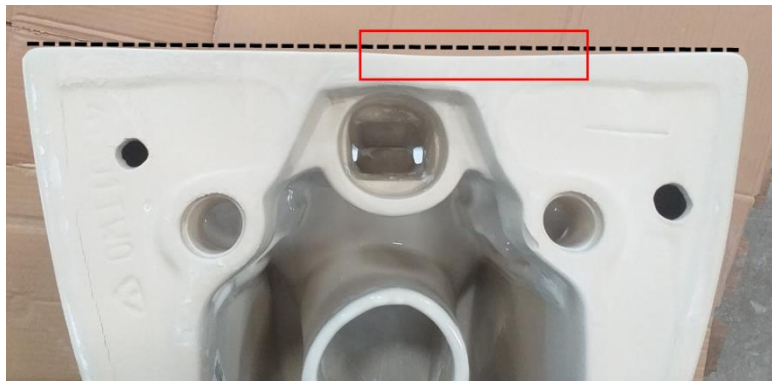


Figura 6.20 – Empeno verificado na bacia da série Two suspensa rimless, após cozedura (reprodução do 5º ensaio).

6.6. Redução de consumos e emissões

Um dos principais objetivos desta dissertação consistiu em analisar as implicações económicas e ambientais, resultantes da modificação do *design* e do material dos suportes usados no processo de cozedura de peças de cerâmica sanitária. Esta modificação não está apenas relacionada com a melhoria do desempenho dos suportes, mas também com a diminuição da inércia térmica de cada uma das vagonas.

É importante relembrar que a energia consumida durante o processo de cozedura não se destina apenas a aquecer a loiça, mas também é parcialmente direcionada para aquecer o material refratário utilizado como suporte. A proporção entre a massa da “móbil” refratária e a massa da

loça é, aproximadamente, de 6:1. No entanto, esta relação pode ser otimizada através de um design mais adequado da “móvel” de sustentação ou da adoção de materiais que, por sua vez, possuam baixa inércia térmica.

Focando no caso específico da bacia *Two* suspensa *rimless*, enforcada com uma placa e tijolo de cordierite (denominaremos este complexo como suporte 1, para efeitos de simplificação). A prática comum consiste em posicionar a placa por cima do tijolo, fazendo com que esta fique inclinada, tal como se encontra demonstrado na figura 6.6.1. O ângulo de inclinação da placa consiste numa estratégia para diminuir o atrito e, conseqüentemente, minimizar o empeno verificado na parte superior desta bacia.



Figura 6.21 – Bacia Two suspensa rimless, enforcada em cima do suporte 1.

Com a introdução do suporte desenvolvido (suporte 2), a configuração na enforca é completamente diferente (figura 6.22).



Figura 6.22 – Bacia Two suspensa rimless, enforcada em cima do suporte 2.

Analisando a figura 6.23, é perceptível uma vantagem evidente: a substituição do suporte 1 pelo suporte 2 permitiu otimizar o espaço da vagona, sendo possível inserir mais uma peça (neste caso, um tanque).

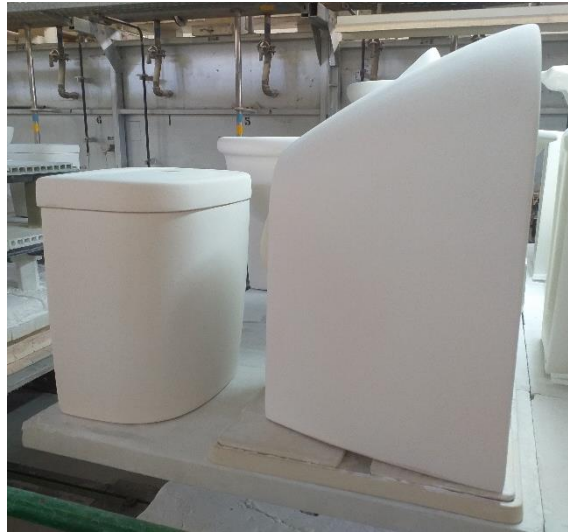


Figura 6.23 – À esquerda, temos um tanque, e à direita, a Bacia Two suspensa rimless, enfiada em cima do suporte 1.

Este suporte foi projetado para se ajustar às dimensões da bacia, enquanto a placa que constitui o suporte 1 possui dimensões superiores em comparação com a base da bacia que, por sua vez, assenta na placa. Tal facto resulta num aproveitamento mais eficaz do espaço de cada uma das vagonas, permitindo encaixar mais peças em cada ciclo de cozedura, sem aumentar o consumo de energia, melhorando a eficiência geral do processo.

No contexto da análise, considere-se uma situação em que a substituição dos suportes 1 pelos suportes 2 não é total, ou seja, ambos os suportes (1 e 2) são utilizados simultaneamente. Para efeitos de cálculo, assumiu-se que cada vagona era constituída por 3 suportes 1 e por 3 suportes 2. Esta abordagem híbrida proporciona uma perspetiva realista da transição para os novos suportes e os seus impactos.

Para aquecimento dos suportes 1, ao longo de um ano, é necessário um consumo considerável de gás natural, totalizando os 25 025 Nm³. No entanto, com a introdução dos suportes 2, observamos uma redução significativa desse consumo para 10 120 Nm³ anuais. Esta mudança resulta numa economia de 14 095 Nm³ de gás natural por ano, equivalente a uma economia financeira de 5 363 €/ano.

Para além disso, a redução do consumo de gás natural tem implicações diretas na redução do consumo de energia, representando uma economia de 153,22 MWh por ano. Esta economia energética resulta numa redução expressiva, anual, de 32,25 t de emissões de dióxido de carbono.

Tal facto constitui um passo significativo em direção a uma produção mais sustentável, alinhada com os objetivos de redução das emissões de gases de efeito de estufa.

Estes resultados demonstram que a introdução da nova tecnologia de suportes desenvolvidos (suportes 2), não proporciona apenas benefícios económicos substanciais, como também desempenha um papel crucial na mitigação das emissões de dióxido de carbono, promovendo uma produção mais eficiente e ecológica.

7. Conclusões e perspetivas futuras

No âmbito deste estudo, o desenvolvimento de suportes de enforna inovadores e a sua avaliação rigorosa revelaram-se fundamentais para a otimização do processo de cozedura de peças de cerâmica sanitária. Os objetivos estabelecidos foram abordados com sucesso, culminando em avanços significativos na redução de defeitos, na melhoria da qualidade dos produtos e na eficiência geral da produção.

A tecnologia desenvolvida, composta por quatro elementos móveis estrategicamente posicionados sobre um tabuleiro, mostrou ser promissora. Esta tecnologia permite o acompanhamento, por parte do suporte à cozedura, da contração térmica das peças. Tal facto permite reduzir o atrito entre estas e o suporte, prevenindo empenos indesejados. Embora tenha havido desafios ao longo dos ensaios, as ações de melhoria introduzidas, quer no *design*, quer na quantidade de alguns componentes, permitiram superar obstáculos, aumentando a eficácia da tecnologia.

Os resultados obtidos revelaram melhorias progressivas ao longo dos ensaios. A introdução de semiesferas nas placas, após um ajuste cuidadoso da quantidade e textura da alumina, possibilitou um movimento mais eficaz das placas de suporte.

Além dos benefícios técnicos, a implementação desta tecnologia apresenta implicações económicas e ambientais significativas. A substituição parcial dos suportes tradicionais pelos suportes desenvolvidos resultou numa economia anual de 14 905 Nm³ de gás natural e 153,22 MWh de energia. Isto traduz-se numa economia financeira de 5 363 € e na redução de 32,25 ton de emissões de dióxido de carbono.

Estes resultados demonstram que a inovação na indústria cerâmica, não só pode melhorar a qualidade do produto, como também contribuir significativamente para a sustentabilidade ambiental e para a eficiência económica.

Olhando para o futuro, existem várias direções promissoras para pesquisas adicionais. Uma dessas perspetivas envolve a incorporação das lamas da Estação de Tratamento de Águas Residuais Industriais (ETARI) da ARCH no *Gresanit*[®] que, por sua vez, originou este novo suporte. Como a economia circular ganha cada vez mais relevância, a reutilização de resíduos industriais na produção de cerâmica sanitária pode ser uma estratégia vantajosa. Estudos anteriores, apresentados na revisão bibliográfica, demonstram a viabilidade técnica da incorporação de lamas nas barbotinas cerâmicas. Contudo, é fundamental realizar uma caracterização adequada das lamas, em termos de composição química, mineralógica, granulométrica, entre outros parâmetros. Para além disso, é necessário estudar a homogeneidade

dessas propriedades ao longo do tempo. Estes passos são cruciais para prever e minimizar as alterações que a incorporação de lamas possa causar no processo produtivo e no produto final.

Outra área de pesquisa promissora é a criação de suportes de enforna com *designs* mais eficientes para peças mais leves, tais como a bacia *rimless* da série *Two* suspensa. Reduzir as dimensões das placas pode ser um ponto de partida para alcançar este objetivo.

Uma vez que, após alteração do molde, os tabuleiros continuam a fraturar, é relevante avaliar a resistência mecânica dos mesmos. Tal facto pode envolver alterações no molde ou a incorporação de lamas na barbotina cerâmica que os origina, de modo a reforçá-los mecanicamente.

Em suma, esta pesquisa representa um marco importante no desenvolvimento de tecnologias inovadoras para a indústria cerâmica. As perspectivas para trabalhos futuros incluem a incorporação de lamas de ETARI na barbotina cerâmica, a busca por *designs* mais leves e o aperfeiçoamento dos tabuleiros, em termos de resistência mecânica.

Bibliografia

- [1] “A Empresa ARCH Valadares,” 2021. [Online]. Available: <https://archvaladares.com/empresa/>.
- [2] S. Soares, “Características técnicas dos materiais,” 2020.
- [3] L. Sousa, “Manual da qualidade ARCH Valadares,” 2017.
- [4] A. B. D. V. F. A. A. F. S. M. Almeida, “Revista KÉRAMICA, n.º 345,” *Análise da viabilidade da aplicação de estratégias de economia circular na indústria cerâmica*, pp. 8-13, março/abril 2017.
- [5] C. d. R. E. Circular, “Economia Circular,” CTCV, [Online]. Available: <https://ctcv.pt/economiacircular/acerca.html>. [Acedido em 16 setembro 2023].
- [6] M. Almeida, “Revista TÉCNICA #0,” *Economia Circular - Mesa temática nas Jornadas de Cerâmica 2019*, pp. 38-41, maio/junho 2020.
- [7] C. Europeia, *A Economia Circular – Interligação, criação e conservação de valor*, 2014.
- [8] M. G. Costa, M. J. Ribeiro e J. A. Labrincha, “Reutilização in situ das lamas residuais,” *Cerâmica Industrial*, 2002.
- [9] L. S. Ferreira, “Caracterização de lamas de ETAs para aplicação na indústria cerâmica,” Universidade de Aveiro, 2010.
- [10] M. Canotilho, “Processos de cozedura em cerâmica,” Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2003.
- [11] D. Fortuna, *Ceramic Technology (Sanitaryware)*, 2000.
- [12] W. Kawaguti, “Estudo do comportamento térmico de um forno intermitente,” Florianópolis, 2004.
- [13] V. J. Silva e E. P. Almeida, “Mineralogical and dielectric properties of mullite and cordierite ceramics”.
- [14] R. Sarkar, *Refractory Technology - Fundamentals and applications*, 2017.
- [15] C. C. Barry e N. M. Grant, *Ceramic Materials: Science and Engineering*, Springer, 2013.

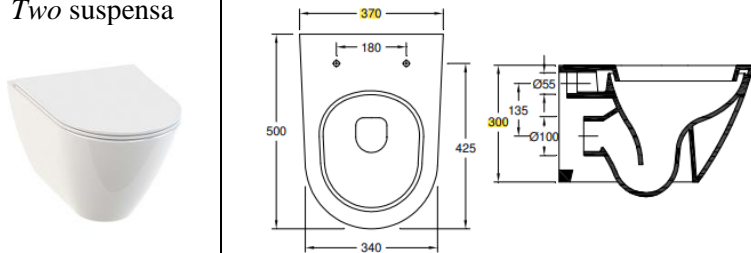
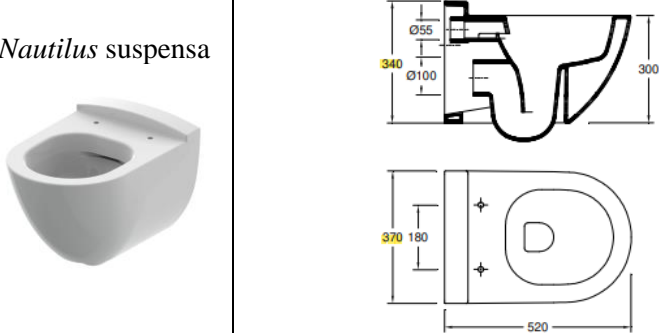
- [16] W. Kingery, H. Bowen e D. Uhlmann, Introduction to Ceramics, John Wiley & Sons, Inc., 1976.
- [17] T. Kiatcharoenpol e R. Seeluang, “Six Sigma Methodology for Reducing Warpage Defect of Sanitary Ware Production,” Bangkok, Thailand.
- [18] SACMI, “Ceramic Sanitaryware Technology - Volume II”.
- [19] M. Madhavi, “Friction,” 2017.
- [20] “Defeitos de revestimentos cerâmicos como uma consequência da regulação errada do forno,” 1997.
- [21] “Ceramic Materials Properties Charts,” Ceramic Industry, 2019. [Online]. Available: <https://www.ceramicindustry.com/ceramic-materials-properties-charts/>. [Acedido em 16 setembro 2023].
- [22] “Como ler a fatura?,” EDP, 2017. [Online]. Available: <https://www.edpgassu.pt/index.php?id=416>. [Acedido em 16 setembro 2023].
- [23] A. Valadares, “Ficha técnica - sanitas,” 2021. [Online]. Available: <https://archvaladares.com/sanitas/>. [Acedido em 17 setembro 2023].
- [24] U. Scheithauer e T. Slawik, “Additive Manufacturing and Strategic Technologies in Advanced Ceramics,” *New lightweight kiln furniture - production processes and properties*, pp. 177-184, 2016.

Anexos

A. Objetos de estudo

Este anexo fornece uma descrição detalhada dos objetos de estudo, que consistem nas bacias suspensas da série *Two* e *Nautilus*. Na tabela A.1, são apresentados os desenhos técnicos das bacias, bem como as suas dimensões antes e após o processo de cozedura.

Tabela A.1 - Desenhos técnicos e dimensões antes e após cozedura, referentes às bacias da série Two e Nautilus suspensas [23].

Bacia	Desenho técnico	Dimensões (mm)			
		Antes da cozedura		Depois da cozedura	
		H	W	H	W
<p><i>Two</i> suspensa</p> 	324	400	300	370	
<p><i>Nautilus</i> suspensa</p> 	367	400	340	370	

É importante realçar que as dimensões prévias à cozedura têm uma importância crucial neste contexto, uma que vez as bacias, ao serem submetidas ao processo de cozedura, sofrem uma contração de, aproximadamente, 8% nas suas dimensões. Estas dimensões iniciais devem ser tidas em conta na conceção da nova tecnologia desenvolvida.

mais próxima do centro do tabuleiro, têm, aproximadamente, 14,7 mm de espessura (dimensão após cozedura).

Os “R” que surgem na figura B.1 representam o raio de arredondamento, que consiste na medida do raio de uma curva. Estas curvas são usadas para evitar esquinas vivas, tornando a peça mais segura, mais fácil de fabricar e visualmente mais agradável. Por exemplo, o “R7” significa que o raio de arredondamento é de 7 mm, o que indica que um canto afiado deve ser suavizado com uma curva de raio igual a 7 mm.

Este desenho servirá como orientação na etapa de modelação, garantindo que a peça (tabuleiro e as quatro placas) seja criada com precisão, de acordo com as especificações pretendidas.

C. Cálculos

Este anexo apresenta uma série de cálculos detalhados que, por sua vez, permitem avaliar a poupança monetária, e as reduções energéticas, de gás natural e de emissões de dióxido de carbono, associadas à substituição (parcial) da mobília refratária atualmente utilizada (suporte 1) pela mobília desenvolvida (suporte 2).

Na tabela C.1, são apresentados o poder calorífico e a massa dos suportes 1 e 2.

Tabela C.1 – Poder calorífico, c_p , em $\text{kJ}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$, e massa, em kg , referentes ao suporte 1 e ao suporte 2.

	Mobília refratária (suporte 1)	Mobília desenvolvida (suporte 2)
Poder calorífico, c_p ($\text{kJ}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$)	1,464	0,962
Massa (kg)	13	8

Na tabela C.2, são apresentadas as temperaturas inicial e final, e respetivo gradiente de temperatura, que dizem respeito à curva de cozedura do forno 1, apresentada na figura 5.1. Os gradientes de temperatura foram calculados a partir da equação C.1:

$$\Delta T = T_f - T_i \quad (\text{C.1})$$

Para além disso, na tabela C.2, é apresentada a energia consumida no aquecimento de ambos os suportes que, por sua vez, foi calculada a partir da equação 5.1.

Para o segmento 1, apresenta-se a equação C.2, que diz respeito ao cálculo do gradiente de temperatura, e a equação C.3, que diz respeito ao cálculo da energia consumida pelo suporte 1:

$$\begin{aligned} \Delta T_1 &= 100 - 30 \\ \Leftrightarrow \Delta T_1 &= 70 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (\text{C.2})$$

$$\begin{aligned} Q_{sup.1_1} &= 13 * 1,464 * 70 \\ \Leftrightarrow Q_{sup.1_1} &= 1333 \text{ kJ} \end{aligned} \quad (\text{C.3})$$

Tabela C. 2 – Temperatura inicial, T_i , em °C, temperatura final, T_f , em °C, gradiente de temperatura, ΔT , em °C, e energia consumida pelo suporte 1, $Q_{sup.1}$, e pelo suporte 2, $Q_{sup.2}$, em kJ.

Segmento	Temperatura inicial, T_i (°C)	Temperatura final, T_f (°C)	Gradiente de temperatura, ΔT (°C)	Energia consumida pelo suporte 1, $Q_{sup.1}$ (kJ)	Energia consumido pelo suporte 2, $Q_{sup.2}$ (kJ)
1	30	100	70	1333	539
2	100	180	80	1523	616
3	180	280	100	1904	770
4	280	480	200	3807	1540
5	480	620	140	2665	1078
6	620	700	80	1523	616
7	700	800	100	1904	770
8	800	900	100	1904	770
9	900	1000	100	1904	770
10	1000	1100	100	1904	770
11	1100	1150	50	952	385
12	1150	1200	50	952	385

Na tabela C.3, é apresentado, para cada um dos suportes, o somatório da energia consumida, a quantidade de gás natural equivalente a esta e o custo do mesmo. Estes valores foram calculados a partir da aplicação das equações 5.2, 5.3 e 5.4, respetivamente, e dizem respeito a um ciclo de cozedura.

Tabela C. 3 – Somatório da energia consumida, Q , em kJ, quantidade de gás natural equivalente, V_{GN} , em Nm^3 , e custo equivalente, $Custo_{eq}$, em €, para cada um dos suportes, e por ciclo de cozedura.

	Por ciclo de cozedura		
	Σ Energia consumida, Q_T (kJ)	Gás natural equivalente, V_{GN} (Nm^3)	Custo equivalente, $Custo_{eq}$ (€)
Suporte 1	22274	0,602	0,22
Suporte 2	9007	0,243	0,09

Para o suporte 1, o método de cálculo, referente aos dados da tabela C.3, encontra-se representado pelas equações C.4 a C.6.

$$Q_{sup.1T} = \sum (1333, 1523, 1904, \dots) \quad (C.4)$$

$$\Leftrightarrow Q_{sup.1T} = 22274 \text{ kJ}$$

$$V_{GN_{sup.1}} = \frac{22274}{37008}$$

$$\Leftrightarrow V_{GN_{sup.1}} = 0,602 \text{ Nm}^3 \quad (C.5)$$

$$\begin{aligned} \text{Custo}_{eq} &= 0,602 * 0,36 \\ \leftrightarrow \text{Custo}_{eq} &= 0,22 \text{ €} \end{aligned} \quad (\text{C.6})$$

Na tabela C.4, apresenta-se, por ano e para cada uma das configurações, o número de placas utilizadas, a quantidade de gás natural gasto para o aquecimento destas e o respetivo custo.

Tabela C.4 – Número de placas, n, quantidade de gás natural equivalente, V_{GN} , em Nm^3 , e custo equivalente, Custo_{eq} , em €, para cada um dos suportes, e por ano.

	Por ano		
	Número de placas, n	Gás natural equivalente, V_{GN} (Nm^3)	Custo equivalente, Custo_{eq} (€)
Suporte 1	41580	25025	9004
Suporte 2		10120	3641

Para ambos os suportes, o número de placas foi calculado a partir da equação C.7:

$$\begin{aligned} n &= n_{dias} * n_{vagonas} * \frac{n_{placas}}{vagona} \\ \leftrightarrow n &= 330 * 42 * 3 \\ \leftrightarrow n &= 41580 \end{aligned} \quad (\text{C.7})$$

A quantidade de gás natural e o respetivo custo foram calculados a partir das equações 5.5 e 5.6, respetivamente. Para o suporte 1, o método de cálculo encontra-se representado pelas equações C.8 e C.9.

$$\begin{aligned} V_{GN_{sup.1}}/ano &= 41580 * 0,602 \\ \leftrightarrow V_{GN_{sup.1}} &= 25025 \text{ Nm}^3 \end{aligned} \quad (\text{C.8})$$

$$\begin{aligned} \text{Custo}_{eq}/ano &= 41580 * 0,22 \\ \leftrightarrow \text{Custo}_{eq} &= 9004 \text{ €} \end{aligned} \quad (\text{C.9})$$

Na tabela C.5, apresenta-se a poupança monetária anual, que diz respeito à redução da energia consumida e conseqüente redução da quantidade de gás natural consumido. Para além disso, quantifica-se a diminuição das emissões de dióxido de carbono.

Tabela C.5 – Poupança, em €, referente à redução anual de gás natural, V_{GN} , em Nm^3 , e respetiva redução de energia consumida, Q, em MWh, e de emissões de CO_2 , em ton.

	Gás natural, V_{GN} (Nm^3)	Energia consumida, Q (MWh)	Poupança (€)	Emissões de CO_2 (ton)
Redução anual	14905	153,22	5363	32,25

A redução dos consumos de gás natural (equação C.10) e de energia (equação C.11), e das emissões de dióxido de carbono (equação C.12), foram calculadas a partir das equações 5.7, 5.8 e 5.9, respetivamente.

$$\begin{aligned} \text{Redução}_{GN} &= 25025 - 10120 \\ \leftrightarrow \text{Redução}_{GN} &= 14905 \text{ Nm}^3 \end{aligned} \quad (\text{C.10})$$

$$\begin{aligned} \text{Redução}_{QT} &= \frac{41580 (22274 - 9007)}{3600000} \\ \leftrightarrow \text{Redução}_{QT} &= 153,22 \text{ MWh} \end{aligned} \quad (\text{C.11})$$

$$\begin{aligned} \text{Redução}_{CO_2} &= \frac{2,164 * 14905}{1000} \\ \leftrightarrow \text{Redução}_{CO_2} &= 32,25 \text{ ton} \end{aligned} \quad (\text{C.12})$$