



Universidade de Aveiro

Departamento de Física

Ano 2017

David Morim Furtado

Demonstração do processo de cozedura
de porcelana por gás-microondas

David Morim Furtado Demonstração do processo de cozedura
de porcelana por gás-microondas

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Física, realizada sob a orientação científica do Doutor Luís Cadillon Costa, Professor Associado com Agregação do Departamento de Física da Universidade de Aveiro e coorientação pelo Mestre Jorge Miguel Simões Marinheiro da empresa Porcelanas Costa Verde, S.A.

Dedico este trabalho à minha esposa Andreia e filhas Alice e Eva pela motivação e apoio.

o júri

presidente

Prof. Dr. Manuel Almeida Valente

Professor associado da Universidade de Aveiro

vogais

Prof. Dr. Henrique Leonel Gomes

Professor associado com agregação da Universidade do Algarve

Prof. Dr. Luís Manuel Cadillon Costa

Professor associado com agregação da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar ao meu orientador, Professor Doutor Luís Manuel Cadillon Costa, pelo apoio, disponibilidade, motivação e empenho dando desta forma um enorme contributo para que este trabalho fosse concretizado.

Agradeço com igual destaque ao meu coorientador Mestre Jorge Miguel Simões Marinheiro, pela disponibilidade, apoio constante e ensinamentos na área da produção industrial de porcelana. Não posso deixar de destacar a excelente forma como me recebeu na equipa de trabalho estendendo desta forma o agradecimento ao Tiago Santos, colega de equipa assim como a todos os funcionários da empresa Costa Verde com quem trabalhei, que sempre me trataram bem, com enorme simpatia e disponibilidade, a todos o meu muito obrigado.

À Sílvia Soreto e Bruno Melo pela constante disponibilidade boa disposição e apoio no laboratório da Universidade de Aveiro.

palavras-chave

microondas, forno híbrido, porcelanas.

resumo

O presente trabalho propõe-se divulgar a mais recente técnica de cozedura de porcelana em ambiente industrial com produção em larga escala. A indústria cerâmica é um sector produtivo com elevado consumo energético. Daí a necessidade de desenvolver formas alternativas e eficazes na produção desses materiais. As temperaturas para o processamento de materiais cerâmicos, com as porcelanas brancas, são elevadas, aproximadamente 1400 °C. Atualmente o processamento destes materiais é realizado, maioritariamente, através do aquecimento induzido pela queima de gás ou carvão, ou calor proveniente de elementos radiativos como resistências elétricas. Como alternativa pode usar-se radiação de microondas, com elevado potencial tanto ao nível da eficiência ambiental como energética. Neste trabalho projeta-se um forno híbrido industrial, de gás e microondas, para a cura de porcelanas de cor branca. As tarefas incluem a simulação de campo eletromagnético e distribuição de temperaturas no interior de fornos, em diversas condições, o desenho de um protótipo que visa a otimização de um forno anteriormente desenvolvido, com a inclusão das soluções de engenharia para melhorar a qualidade das peças obtidas, bem como testes finais de funcionamento do protótipo.

Keywords

microwave, hybrid kiln, porcelain.

abstract

The present work proposes to disclose the latest porcelain firing technique in an industrial environment with large-scale production. The ceramic industry is a productive sector with high energy consumption. Hence the need to develop alternative and effective ways of producing these materials. Temperatures for the processing of ceramic materials, such as white porcelains, are high, approximately 1400 ° C. Till now, the processing of these materials is carried out, mainly, through the heating induced by the burning of gas or coal, or heat coming from radiative elements like electrical resistances. Alternatively, microwave radiation can be used, which can have a high potential both in terms of environmental and energy efficiency. In this work an industrial hybrid kiln, of gas and microwaves, is projected for the firing of white porcelain. Tasks include the electromagnetic field simulation and temperature distribution inside kiln under various conditions, the design of a prototype that aims at the optimization of a previously developed kiln, with the inclusion of engineering solutions to improve the quality of the parts obtained, as well as final testing of the prototype.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Radiação de microondas e o contexto industrial.....	1
1.2. Limitações e métodos alternativos.....	1
2. Revisão de Literatura	2
2.1. Efeitos da interação entre microondas e materiais.....	2
2.2. Efeitos da temperatura na interação microondas/material.....	6
2.3. Método das pequenas perturbações em cavidade ressonante.....	7
2.3.1. Princípios fundamentais.....	7
3. Metodologia e Dados	10
3.1. Determinação da permitividade complexa (ϵ^*).....	10
3.2. Simulação.....	11
3.2.1 Influência do número de magnetrões.....	12
3.3. Forno híbrido gás/microondas Costa Verde.....	15
3.3.1. Características do forno híbrido protótipo.....	16
3.3.2. Trabalhos de reativação do forno.....	16
3.3.3. Reparação das vagonas.....	17
3.3.4. Reparação da fibra refratária no interior do forno.....	19
3.4. Pasta de Porcelana.....	20
3.5. Fluxograma, das matérias-primas até ao produto final	22
3.5.1. Secagem.....	23
3.5.2. Forno de chacotado.....	23
3.5.3. Vidragem.....	26
3.5.4. Cozedura de vidrado.....	26
3.5.4.1. Atmosfera redutora.....	27
3.6. Forno de microondas.....	28
4. Análise e Resultados	29
4.1. Regulação dos queimadores para obtenção de atmosfera redutora.....	29
4.2. Análise e caracterização da porcelana cozida no forno protótipo de microondas	30

4.2.1. Comparação de propriedades físicas após cozedura de vidro por microondas e por gás natural.....	30
4.2.2. Análise por SEM	31
4.2.3. Análise SEM-EDX.....	33
5. Conclusões, Contributos, Limitações e Investigação Futura	34

Tabela de Símbolos

ϵ^*	Permitividade elétrica complexa
ϵ'	Constante dielétrica
ϵ''	Fator dielétrico de perda, perda dielétrica
λ	Comprimento de onda
σ	Condutividade elétrica
ρ	Densidade de carga
ω	Frequência angular
δ	Ângulo de perda
P	Potência
R	Coeficiente de reflexão
D_p	Profundidade de penetração
E	Campo elétrico
E_i	Campo elétrico interno
f	Frequência
$tg \delta$	Tangente de perda, ou fator de dissipação
K	Fator de despolarização
Q	Fator de qualidade

1. Introdução

1.1. Radiação de microondas e o contexto industrial

O uso da tecnologia de microondas em aplicações industriais é uma realidade com mais de 40 anos, mais concretamente a partir da década de 60, onde foram realizados vários estudos que evidenciaram que, com a aplicação desta técnica no processamento de materiais cerâmicos a altas temperaturas, é possível obter redução no consumo de energia e no tempo de processamento e promover um aquecimento seletivo.

A energia de microondas transforma-se em calor dentro do material, por intermédio da interação das moléculas e átomos com o campo eletromagnético, de tal forma que, regra geral, resulta numa redução de energia consumida e tempo de processamento, em comparação com os métodos convencionais. Estes dois fatores por si só têm um papel de relevo na aceitação do uso desta técnica em muitas aplicações industriais [1].

1.2. Limitações e métodos alternativos

A cozedura de porcelana em forno de microondas tem algumas limitações de relevo, das quais, se destacam duas. A primeira é o facto de a porcelana ser praticamente transparente à radiação de microondas para temperaturas abaixo de 1000 °C, dificultando imenso o aquecimento inicial das peças. A segunda é a impossibilidade de se obter porcelana de cor branca sem a existência de uma atmosfera redutora no interior do forno.

O recurso ao gás permite a criação da atmosfera redutora assim como o aquecimento inicial do forno até cerca de 1000 °C. Desta forma, a solução passa inevitavelmente pela implementação de um forno híbrido a gás-microondas.

Obter porcelana com qualidade idêntica às produzidas pelo método convencional, reduzindo o consumo energético e o tempo de sinterização é o objetivo base deste trabalho.

Este assenta na continuação de um projeto anterior, projeto “Greenwave” iniciado em 2009, onde foi construído um forno híbrido gás-microondas, peça fundamental neste projeto, resultado de uma série bastante alargada de estudos, simulações e experiências. Foi possível, neste forno, obter peças de porcelana, com boas propriedades mecânicas, mas dificuldades no controlo da quantidade de gás, não permitiram obter peças de cor branca, por não se conseguir obter na zona de redução do forno, uma atmosfera redutora adequada. A demonstração e otimização deste processo/forno foi então incluída num novo projeto demonstrador da técnica híbrida, projeto CerWave, [2].

2. Revisão de Literatura

2.1. Efeitos da interação entre microondas e materiais

As microondas são ondas eletromagnéticas com frequências entre 0,3 e 300 GHz, com o correspondente intervalo de comprimento de onda entre 1 m e 1 mm. À semelhança das ondas de luz visível, as microondas podem ser transmitidas, absorvidas ou refletidas, dependendo do tipo de material com que interagem.

Desta forma poderemos observar três tipos de materiais no que diz respeito à forma de interação com as microondas (figura 1.1).

Numa primeira categoria podemos enquadrar os materiais transparentes à radiação de microondas, que permitem a total passagem das ondas sem perdas significativas de energia. Na segunda categoria encontram-se os materiais opacos que refletem as ondas eletromagnéticas. Resta a terceira e última categoria de materiais absorventes que é composta por materiais com significativas perdas dielétricas, contendo uma ou mais fases. Estes materiais interagem com as microondas de uma forma muito eficiente, isto é, têm uma taxa de absorção elevada provocando o seu aquecimento.

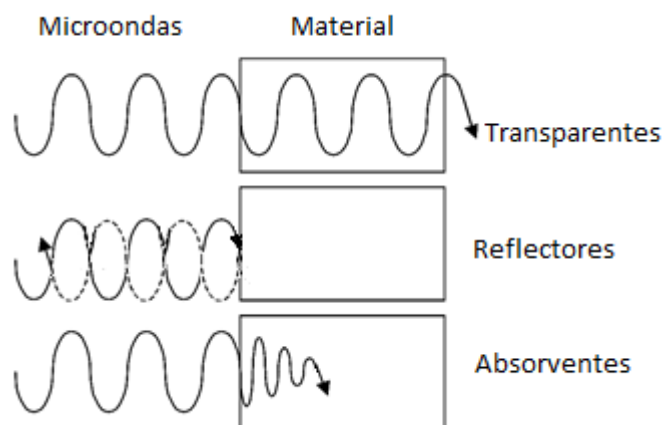


Figura 1.1 - Interação das microondas com os materiais.

A interação das microondas com um material dielétrico está relacionada com a sua permitividade complexa, ϵ^* , que é composta por uma parte real, ϵ' (constante dielétrica) e por uma parte imaginária, ϵ'' (fator de perda dielétrica), sendo ambas função da frequência da radiação:

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon'(\omega) - i\epsilon''(\omega) \quad (2.1)$$

onde $i = (-1)^{1/2}$ e ω é a frequência angular.

A constante dielétrica relaciona-se com a quantidade de energia elétrica armazenada no material, enquanto o fator de perdas se relaciona com a energia dissipada na forma de calor dentro do material.

Quando as microondas penetram e se propagam através de um material, o campo elétrico interno, gerado dentro do volume afetado, induz o movimento translacional das cargas livres, como iões ou eletrões, e a rotação de cargas complexas, como os dipolos. A resistência a esses movimentos induzidos, devido à inércia elástica e forças de atrito, causa perdas e atenua o campo elétrico. Como consequência dessas perdas, ocorre o aquecimento do material.

Assim, de uma forma geral, a radiação de microondas pode interagir com os materiais através de processos de polarização ou condução. A polarização envolve a formação e rotação de dipolos elétricos, enquanto a condução requer o transporte de cargas de longa distância. Ambos os processos provocam perdas em

determinadas frequências, não sendo fácil diferenciar os dois mecanismos experimentalmente. Consequentemente, as perdas são tipicamente reportadas como perdas efetivas, quando os mecanismos de perdas são desconhecidos ou não podem ser claramente separados.

Como mencionado, as perdas são todas combinadas num único fator de perdas, ϵ'' , e a tangente de perdas, $\text{tg } \delta$, é o parâmetro comumente utilizado para as descrever, [1]

$$\text{tg } \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2.2)$$

A tangente de perdas também pode ser referida como fator de dissipação.

A condutividade AC, σ_{AC} , pode ser expressa por:

$$\sigma_{AC} = \omega \cdot \epsilon'' \cdot \epsilon_0 \quad (2.3)$$

que inclui todos os efeitos de dissipação de energia e onde ϵ_0 é a permissividade no vácuo ($\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ F/m).

A tangente de perdas e a constante dielétrica relativa são dois parâmetros que podem ser usados para determinar a potência absorvida, P , pelo material. [3, 4]

$$P = \int_V \sigma_{AC} |E_i|^2 dV \quad (2.4)$$

onde E_i é o campo elétrico interno e utilizando a equação (2.3), resulta:

$$P = \int_V \omega \epsilon'' \epsilon_0 |E_i|^2 dV \quad (2.5)$$

Considerando o campo eletromagnético, distribuído dentro do material, uniforme, podemos simplificar a equação,

$$\frac{P}{V} = \frac{\omega \varepsilon'' \varepsilon_0 E_i^2}{2} \quad (2.6)$$

Podemos apresentar esta equação em termos da tangente de perdas e da constante dielétrica, recorrendo à equação (2.2), temos: [5]

$$\frac{P}{V} = \frac{\omega \varepsilon' t g \delta \varepsilon_0 E_i^2}{2} \quad (2.7)$$

À medida que as microondas penetram e se propagam dentro do material verifica-se uma atenuação do campo elétrico. Entende-se por profundidade de penetração do campo como a distância onde o campo elétrico é reduzido a 1/e do seu valor inicial [6],

$$D_P = \frac{\lambda}{2\pi} \left[\frac{2}{\varepsilon' (\sqrt{1+tg^2\delta}-1)} \right]^{1/2} \quad (2.8)$$

onde λ é o comprimento de onda da radiação incidente.

O coeficiente de reflexão é outro parâmetro importante quando se processam materiais com microondas, sendo este definido pela fração de potência refletida da onda eletromagnética incidente na superfície do material, que pode ser representado por [6],

$$R = \frac{1 - \sqrt{2\varepsilon' [1 + \sqrt{1+tg^2\delta}] + \varepsilon' \sqrt{1+tg^2\delta}}}{1 + \sqrt{2\varepsilon' [1 + \sqrt{1+tg^2\delta}] + \varepsilon' \sqrt{1+tg^2\delta}}} \quad (2.9)$$

Estas equações, (2.8) e (2.9), permitem observar quais os materiais que são mais facilmente processados por radiação de microondas.

Materiais com elevada condutância, como os metais, possuem elevados fatores de perdas dielétricas, traduzindo-se em profundidades de penetração próximas de zero. Materiais com este comportamento são classificados de refletos.

Materiais com baixo fator de perdas dielétricas permitem uma elevada profundidade de penetração no qual resultam perdas de energia muito baixas por absorção do material. Estes materiais são considerados de transparentes à energia de microondas.

Desta forma são os materiais com os valores de perdas dielétricas intermédios aos dois casos extremos que se enquadram melhor entre os materiais que mais facilmente são processados por radiação de microondas.

2.2. Efeitos da temperatura na interação microondas/material

Já foi mencionado anteriormente, que tanto a constante dielétrica (ϵ') como o fator de perdas (ϵ''), são função da frequência da radiação (ω). No entanto importa relevar que estes parâmetros são também função da temperatura do material. Desta forma, à medida que a temperatura do material aumenta verificam-se alterações dos valores de potência absorvida e refletida do material.

Os efeitos da temperatura são, de uma forma geral, mais intensos sobre ϵ'' do que sobre ϵ' , sendo estes efeitos refletidos na tangente de perdas ($\tan \delta$) [7]. Inicialmente, quando se trata de materiais cerâmicos, com o aumento da temperatura verifica-se um aumento suave da tangente de perdas, até o valor da temperatura atingir um ponto crítico (T_{crit}), a partir do qual ocorre um aumento acentuado da $\tan \delta$. Este efeito pode ser manipulado com a introdução de aditivos ou impurezas nos materiais. Geralmente este efeito ocorre para temperaturas na ordem de 0,4 a 0,5 da temperatura de fusão, sendo este comportamento característico tanto em sólidos iônicos como covalentes. Uma vez atingida a temperatura crítica as ligações entre iões, nos cristais iônicos, começam a ser rompidas, aumentando assim a condutividade do material. Também o amolecimento de fases vítreas e amorfas é responsável por aumentos acentuados das perdas dielétricas dos materiais cerâmicos, sendo estas mais significativas em materiais com baixa pureza.

O “Thermal runaway” é um efeito muito importante a ter em consideração já que se não for controlado, pode provocar um aquecimento descontrolado do material, com a formação de pontos de superaquecimento (“hot spots”), fusão em regiões

específicas ou em todo material, tensões devido aos gradientes de temperatura no material, etc. [7].

A formação de “hot spots” deve-se à existência de heterogeneidades composicionais e/ou de densificação no material assim como a flutuações na intensidade do campo eletromagnético no interior do forno, dando origem a heterogeneidades na distribuição dentro do material cerâmico. Este efeito provoca um aquecimento não homogéneo do material.

2.3. Método das pequenas perturbações em cavidade ressonante

2.3.1. Princípios fundamentais

O método das pequenas perturbações em cavidade ressonante (figura 2.1) permite calcular o valor da permitividade complexa de materiais. No caso particular dos materiais cerâmicos que têm valores do fator de perdas (ϵ'') baixos, esta técnica é utilizada com resultados fiáveis e precisos. No entanto a aplicação desta técnica comporta restrições muito específicas, por forma a que os resultados sejam aceitáveis, uma das quais é a dimensão da amostra [15].



Figura 2.1 – Cavidade ressonante retangular.

As dimensões da amostra têm que ser bastante reduzidas em comparação com as dimensões da cavidade. O facto de as amostras terem a forma cilíndrica resulta da necessidade de obtenção de um campo elétrico no interior do material igual ao campo elétrico de excitação [8]. Tendo em consideração que, tal facto, aplica-se para cilindros infinitos, assume-se que os resultados obtidos com as amostras analisadas resultam de uma aproximação.

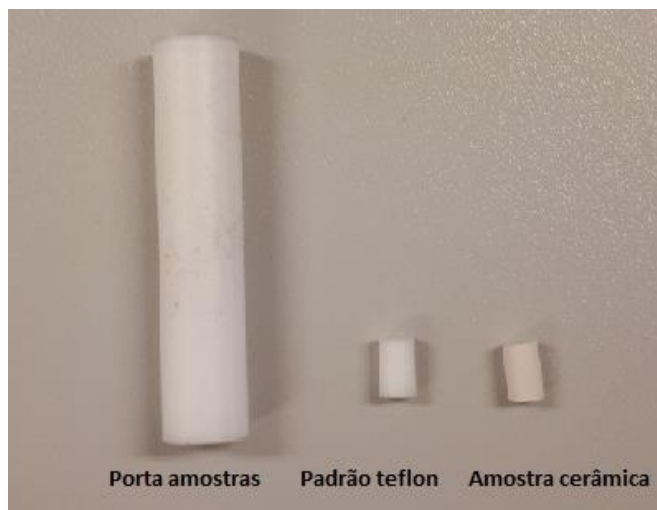


Figura 2.2 – Porta amostras, padrão de teflon e amostra cerâmica.

Quando se coloca a amostra na cavidade, resulta uma pequena alteração na frequência de ressonância, Δf , quando comparada com a frequência de ressonância da cavidade vazia, f_0 , sendo que essa perturbação é função das propriedades do material.

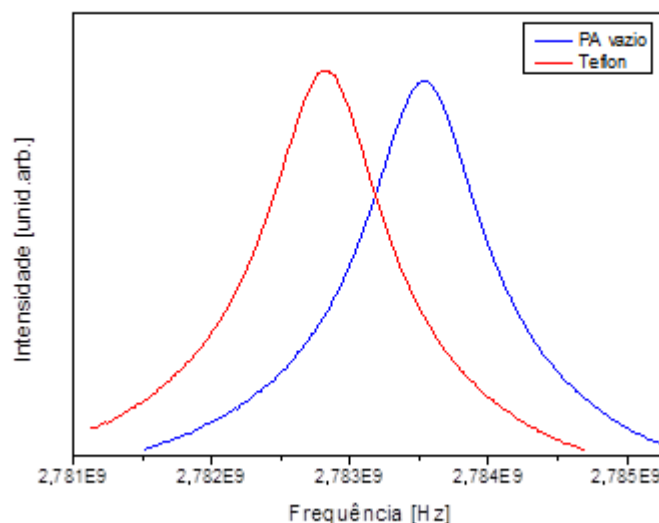


Figura 2.3 – Espectro de transmissão com porta amostras vazio e com amostra de teflon.

Na figura 2.3 mostra-se os espectros de transmissão da cavidade vazia e com uma amostra de teflon. Pode ver-se a deslocação da frequência de ressonância para

menores frequências. O fator de qualidade, neste caso, praticamente não foi alterado, por se tratar de um material de baixas perdas.

A frequência de ressonância da cavidade vazia f_0 , pode ser apresentada como $f_0 = Q.W$ [8], sendo Q um fator de qualidade e W a largura de banda da cavidade à frequência de ressonância.

Se considerarmos apenas a perturbação de primeira ordem provocada pela introdução da amostra obtemos [8],

$$\frac{\Delta f}{f_0} + i \Delta \left(\frac{1}{2Q} \right) = \varepsilon_0 (\varepsilon^* - 1) \frac{\int_V E_i^* E_0 dV}{\int_V \varepsilon_0 E_0^2 dV} \quad (2.10)$$

onde f_0 é a frequência de ressonância da cavidade, ε^* a permitividade complexa do material, E_i e E_0 os campos elétricos dentro e fora do material. As integrações são feitas em ordem ao volume da amostra, v , e ao volume da cavidade, V .

Ao separar as partes real da imaginária, obtemos,

$$(\varepsilon' - 1)v = K \frac{\Delta f}{f_0} V \quad (2.11)$$

$$\varepsilon''v = \frac{K}{2} \Delta \left(\frac{1}{Q} \right) V \quad (2.12)$$

Onde K , é o fator de despolarização, dependente dos parâmetros geométricos, e

$$\Delta \left(\frac{1}{Q} \right) = \frac{1}{Q_i} - \frac{1}{Q_0} \quad (2.13)$$

$$\Delta f = f_0 - f_i \quad (2.14)$$

em que 0 e l são os índices referentes à cavidade vazia e com a amostra, respectivamente [9].

A análise dos dados experimentais foi realizada com o recurso aos Network Analyser HP 8753D e HP E8361A. O cálculo dos fatores de qualidade e da frequência central foi realizado com o ajuste de uma curva lorenziana aos pontos experimentais obtidos para um dado pico de ressonância [10]. O ajuste da lorenziana foi realizado com recurso do software Origin, o qual fornece os valores da frequência do máximo do pico do ajuste e a largura a meia altura necessários para o cálculo do fator de qualidade.

Recorrendo a uma amostra com permitividade complexa conhecida podemos determinar o fator de despolarização. Neste caso particular optou-se por uma amostra de politetrafluoretileno (teflon), com as mesmas dimensões e forma da amostra a analisar.

3. Metodologia e Dados

3.1. Determinação da permitividade complexa (ϵ^*)

Com o recurso ao método das pequenas perturbações em cavidade ressonante foi determinado o valor da ϵ' (constante dielétrica) e ϵ'' (fator de perda dielétrica), para uma frequência próxima da usada pelos magnetrons nos fornos de microondas (2,45 GHz), à temperatura ambiente. Assim, foi usada uma cavidade de 2,78 GHz. Como podemos ver, na figura 3.1, dos 3 picos, resultantes das 3 amostragens realizadas, porta amostras vazio, amostra padrão e amostra cerâmica, resultaram os valores apresentados na tabela 3.1.

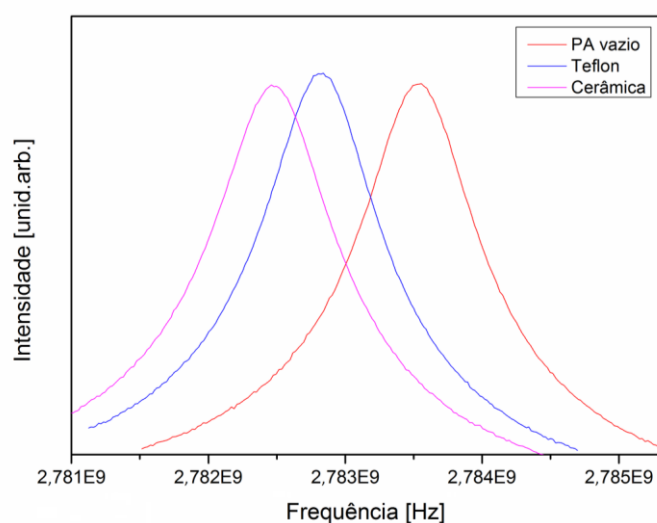


Figura 3.1 – Espectro de transmissão da cavidade com porta amostras vazio, teflon e cerâmica.

Tabela 3.1 – Valores calculados de ϵ' e ϵ'' .

	Teflon [17]	Cerâmica
ϵ'	2,1	2,64
ϵ''	$4,2 \times 10^{-4}$	$2,67 \times 10^{-3}$

O valor obtido para o fator de perdas (ϵ''), como era esperado é muito baixo. Isto comprova a transparência da cerâmica à radiação de microondas, neste caso, à temperatura ambiente.

3.2. Simulação

O comportamento/interação das microondas no interior de um forno está dependente de uma quantidade considerável de variáveis. Desta forma torna-se fundamental estudar esse mesmo comportamento e compreender os seus efeitos.

Com recurso a software de simulação é possível recriar condições próximas das condições reais de utilização da radiação de microondas em ambiente real.

Neste estudo foi projetado um forno com a dimensão 270x268x188 (mm) contendo no seu interior uma amostra cerâmica cilíndrica com as dimensões, 70 mm de altura e 50 mm de diâmetro, representado na figura 3.2. Em todas as simulações foram

mantidos constantes a frequência de emissão do magnetrão, $f = 2,45$ GHz, a sua potência, $P = 1$ kW, tempo de exposição, $t = 3600$ s e a permitividade complexa da cerâmica à temperatura ambiente, $\epsilon^* = 2,64 - i2,67 \times 10^{-3}$. Foi estudado o comportamento resultante da variação do número de magnetrões e a sua disposição no forno, observando a variação da distribuição do campo elétrico no interior do forno, assim como a conseqüente variação da temperatura no interior da peça cerâmica.

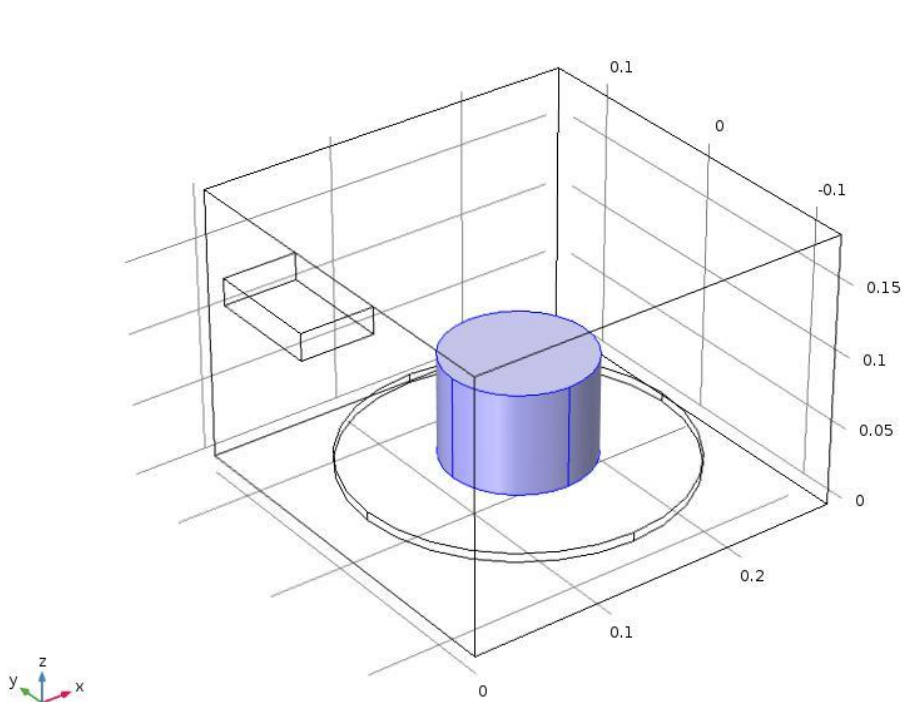


Figura 3.2 – Modelo do forno, com 1 magnetrão.

3.2.1. Influência do número de magnetrões

Em resultado das diferentes simulações realizadas verificamos, a existência de uma relação direta na variação da distribuição do campo elétrico e o número e orientação de magnetrões instalados. Como podemos constatar pelas figuras seguintes, sempre que alteramos o número ou a orientação dos magnetrões obtemos como resultado uma diferente distribuição do campo elétrico no interior do forno. Estes resultados, eram de certa forma esperados, isto é, a variação do campo elétrico era espectável, no entanto esta ferramenta não só permite comprovar a variação do

campo como, ainda mais importante, apresenta a forma desta variação no interior do forno. Compreendemos também que existe uma relação direta entre o aumento da temperatura no interior da peça e o aumento do número de magnetrons instalados, aumento de potência instalada, como podemos constatar na tabela 3.1.

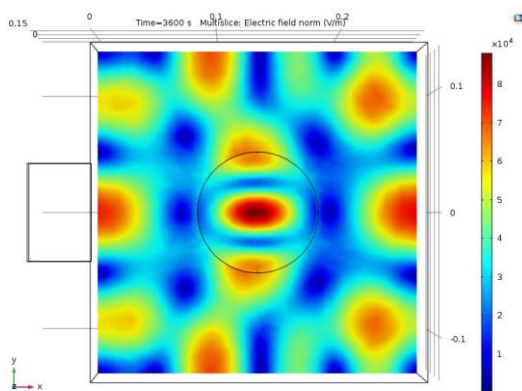


Figura 3.3 – Distribuição do campo elétrico no interior do forno, 1 magnetron.

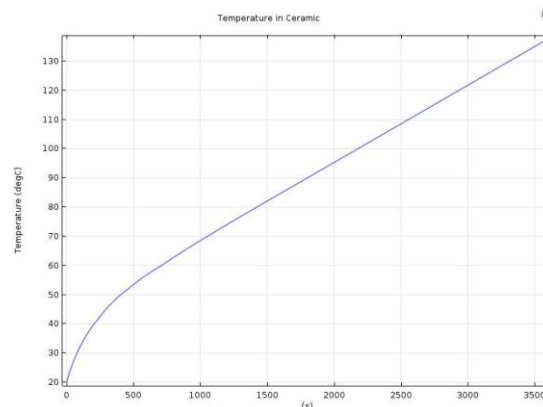


Figura 3.4 – Evolução da temperatura na amostra cerâmica, 1 magnetron.

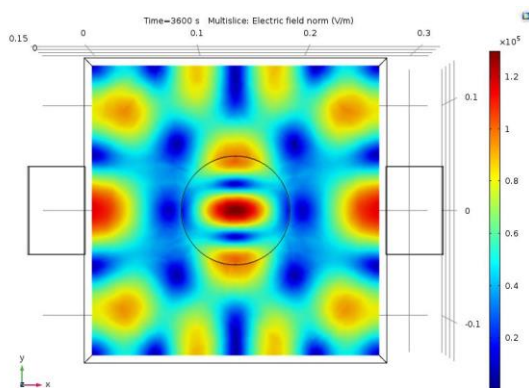


Figura 3.5 – Distribuição do campo elétrico no interior do forno, 2 magnetrons paralelos.

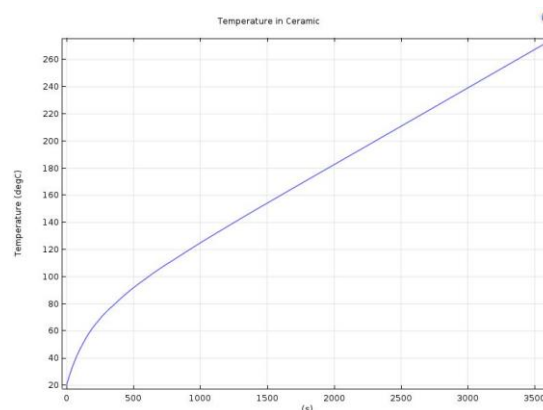


Figura 3.6 – Evolução da temperatura na amostra cerâmica, 2 magnetrons paralelos.

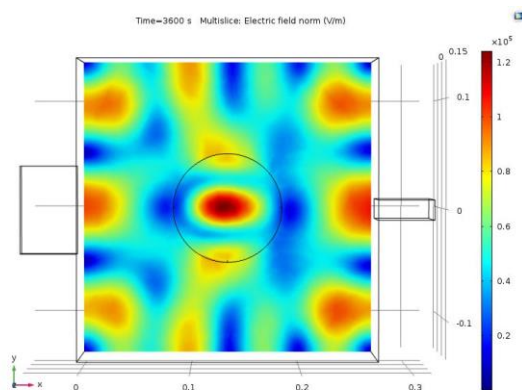


Figura 3.7 – Distribuição do campo elétrico no interior do forno, 2 magnetrons perpendiculares.

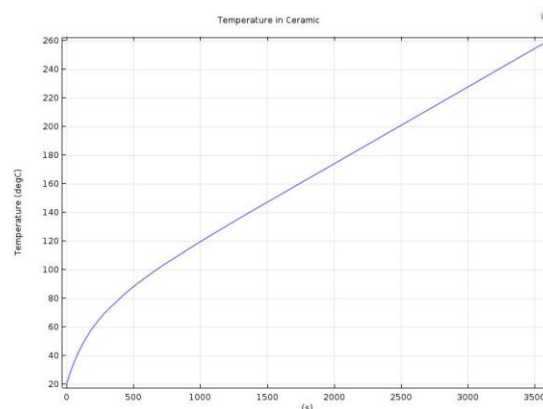


Figura 3.8 – Evolução da temperatura na amostra cerâmica, 2 magnetrons perpendiculares.

Demonstração de cozedura de porcelana por gás-microondas

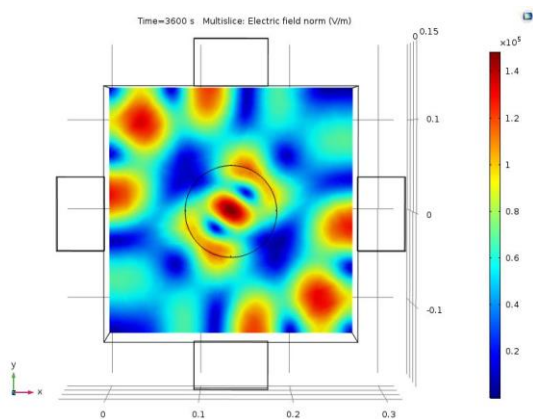


Figura 3.9 – Distribuição do campo elétrico no interior do forno, 4 magnetrões paralelos.

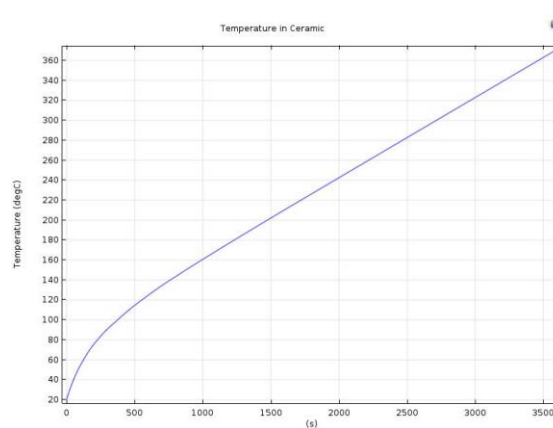


Figura 3.10 – Evolução da temperatura na amostra cerâmica, 4 magnetrões paralelos.

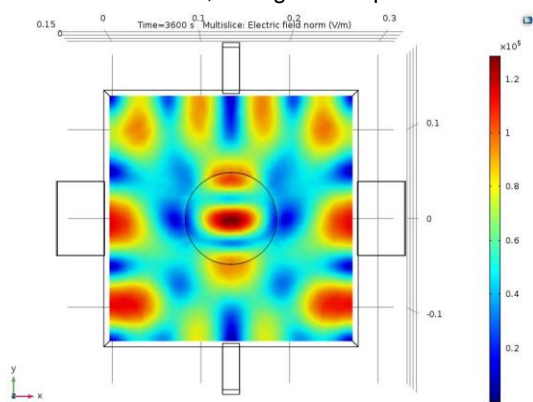


Figura 3.11 – Distribuição do campo elétrico no interior do forno, 4 magnetrões, 2 pares perpendiculares.

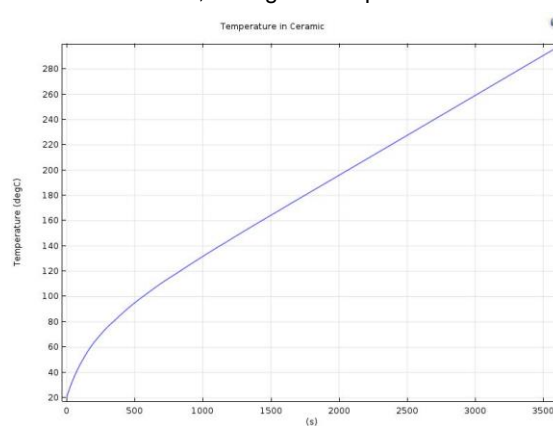


Figura 3.12 – Evolução da temperatura na amostra cerâmica, 4 magnetrões.

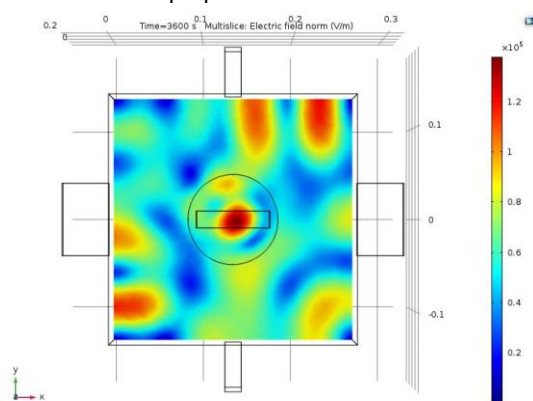


Figura 3.13 – Distribuição do campo elétrico no interior do forno, 5 magnetrões.

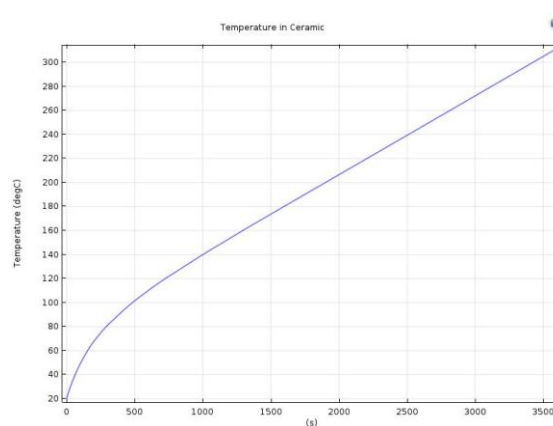


Figura 3.14 – Evolução da temperatura na amostra cerâmica, 5 magnetrões.

Tabela 3.1 – Relação entre o número e orientação dos magnetrões e a variação de temperatura.

Número e orientação de Magnetrões	Temperatura na peça cerâmica (°C)
1	140
2 (180° paralelos)	280
2 (180° perpendiculares)	260
4 (paralelos)	370
4 (2 pares perpendiculares)	290
5 (2 pares perpendiculares, 1 no topo)	300

3.3. Forno híbrido gás/microondas Costa Verde

O forno protótipo é resultado do projeto GreenWave, projeto este que foi levado a cabo entre o ano 2009 e 2011. Apesar dos dados anteriores terem sido considerados, neste projeto partiu-se do “zero” na busca de uma melhor afinação da atmosfera do forno. Dos quais, resultaram dados de regulação da movimentação das vagonas, da razão ar/gás de alimentação dos queimadores, da refrigeração a ar do interior do forno e por último, mas não menos importante, da distribuição de potência dos 40 magnetrões disponíveis no forno.

Como primeira tarefa, a equipa de trabalho realizou uma avaliação profunda ao projeto anterior visando a identificação das falhas e necessidades existentes no forno protótipo, para que fosse possível reiniciar a atividade do mesmo.



Figura 3.15 – Protótipo forno híbrido gás/microondas.

3.3.1. Características do forno híbrido gás/microondas protótipo

Foi desenhado um forno de túnel de baixa massa térmica (Figura 3.15). Neste tipo de forno as peças cerâmicas são colocadas em vagonas que se deslocam sobre carris num circuito fechado e contínuo. Como fonte de energia foram instalados no forno 40 magnetrões, correspondendo a uma potência nominal instalada de 40 kW, com um sistema de refrigeração próprio, e uma zona de gás natural, com 10 queimadores, perfazendo uma potência em gás instalada de 140 kW.

Foi desenvolvido um sistema de controlo e monitorização da temperatura no interior do forno com a colocação de termopares, em 8 pontos estratégicos. Para o controlo e monitorização de todas as variáveis foi utilizado um autómato da OMRON com a possibilidade de escolha do tipo de controlo, que pode ser manual, automático ou semiautomático, tanto na queima do gás natural como na potência e na homogeneização da radiação de microondas.

3.3.2. Trabalhos de reativação do forno

A reativação do forno implicou a realização de uma série de trabalhos de reparação. Desde logo foi identificada a necessidade de instalação de uma calha de areia (figura 3.16) no seu interior, para que o isolamento de calor seja mais eficaz. Isto evita um dos problemas que mais afetaram a estrutura, quer das vagonas, chapas laterais e rolamentos das rodas, quer da chapa inferior do forno, com grande relevo na zona central, onde a temperatura é mais elevada.



Figura 3.16 – Calhas de areia, no interior do forno.

Foram também alvo de trabalhos de reparação as vagonas de transporte de peças e a fibra do interior do forno, onde foram feitas algumas reparações nas paredes e teto.

3.3.3. Reparação das vagonas

As vagonas originais apresentavam algumas debilidades, quer de conceção quer de desgaste após serem submetidas a inúmeras horas de ensaios experimentais. A debilidade mais grave era o estado avançado de desgaste das chapas que formam as paredes laterais das vagonas, que demonstraram serem muito finas, tendo em consideração as temperaturas elevadas às quais estiveram sujeitas. Várias vagonas apresentavam as chapas laterais bastante deformadas, em alguns casos mesmo rompidas devido às sucessivas exposições ao calor.

Também as diversas camadas de fibra e placas refratárias apresentavam elevados níveis de desgaste, em alguns casos estavam mesmo fraturadas não sendo possível assegurar a sua manutenção na vagona durante o decorrer do ensaio. Todo o processo de substituição do refratário consistiu na colocação de duas camadas de placas refratárias e cinco camadas de fibra refratária. Foram também substituídos os tijolos de base para os suportes verticais de apoio das placas refratárias por um conjunto de tijolos bastante mais leve que permitiu uma redução de cerca de 15 kg por vagona, ver figura 3.17.

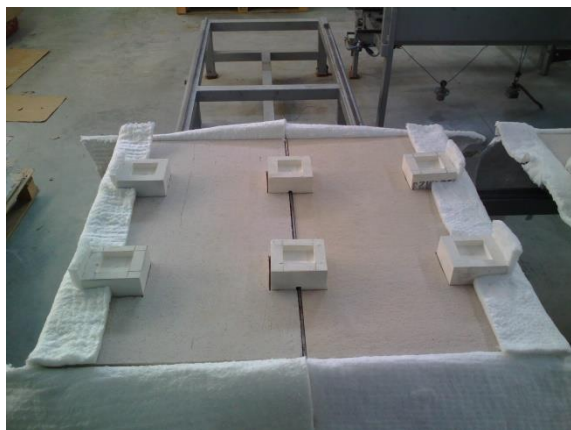


a)



b)

Demonstração de cozadura de porcelana por gás-microondas



c)



d)



e)



f)



g)



h)

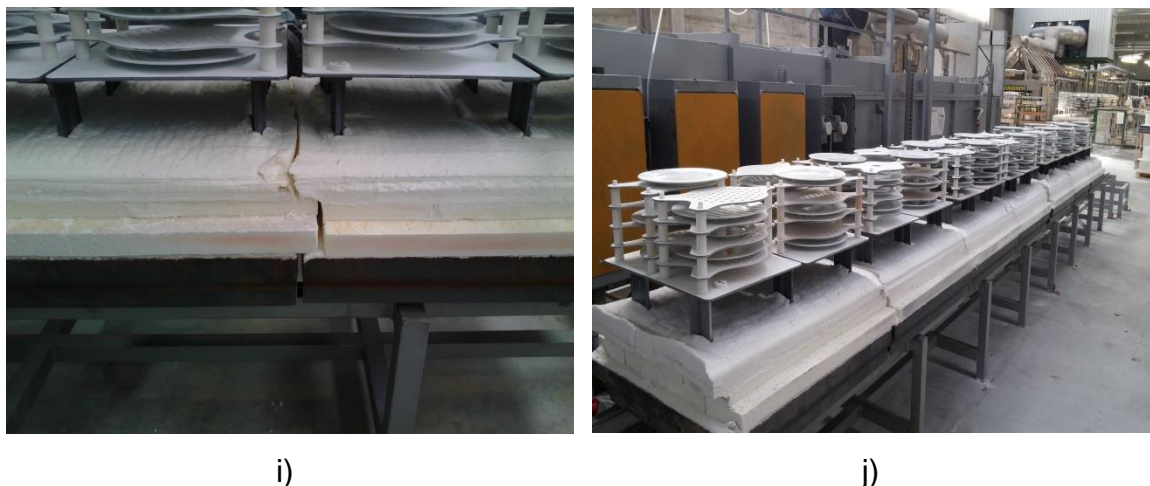


Figura 3.17 – Trabalhos de reparação das vagonas, a) tijolo base para suporte vertical, b) placas refractárias, c) primeira camada de placas refratárias, d) primeira camada de fibra refratária, e) segunda camada de placas refratárias, f) segunda camada de fibra refratária, g) terceira e quarta camadas de fibra refratária, h) colocação dos suportes verticais das placas de carboneto de silício, i) ensaio de interligação entre vagonas, j) conjunto de vagonas finalizadas e preparadas para ensaio.

3.3.4. Reparação da fibra refratária no interior do forno

Após uma inspeção ao interior do forno foram detetadas algumas falhas de fibra, quer nas paredes laterias quer no teto. Por forma a evitar a fuga de calor foi necessário proceder à reparação das falhas de fibra, existentes.



Figura 3.18 – Imagens das falhas de fibra no interior do forno.

3.4. Pasta de porcelana

A empresa Costa Verde tem como produto final a porcelana que serve na sua maioria o mercado da hotelaria, restauração e catering.

A porcelana é uma pasta composta essencialmente por quatro matérias-primas, sendo elas quartzo, caulino, feldspato e argila, que se descrevem sucintamente.

Quartzo - é o segundo mineral mais abundante da Terra (aproximadamente 12 % em volume), superado apenas pelo grupo de feldspatos. Possui uma estrutura cristalina trigonal composta por tetraedros de sílica (dióxido de silício, SiO_2), onde cada oxigênio fica dividido entre dois tetraedros.

Podem-se observar, exemplos de duas configurações cristalinas para o quartzo, denominadas quartzo- α e quartzo- β . A transformação entre elas envolve apenas uma rotação de um tetraedro em relação ao outro, sem alteração da forma como eles são ligados [11].

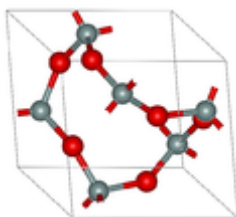


Figura 3.19 - Quartzo- α (Oxigênio em vermelho, Silício em Cinza).

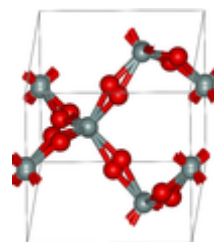


Figura 3.20 - Quartzo- β .

Feldspato – do alemão “feld”, campo, e “spat”, uma rocha que não contém minério. É o nome de uma importante família de minerais, do grupo dos tectossilicatos, constituintes de rochas que formam cerca de 60% da crosta terrestre [12].

Os feldspatos têm muitas aplicações na indústria, entre as quais, temos por exemplo:

- O fabrico de vidros sobretudo com feldspatos potássicos, que reduzem a temperatura de fusão do quartzo e ajudam a controlar a viscosidade do vidro.

- O fabrico de cerâmicas, onde é o segundo ingrediente mais importante logo a seguir às argilas, tendo como principal efeito o aumento da resistência e durabilidade das cerâmicas.
- O fabrico de produtos vidrados, como louça sanitária, louça de cozinha e porcelanas para aplicações elétricas.

Argila - formada pela alteração de rochas, como as que contêm feldspato, a argila geralmente é encontrada próxima dos rios. Apresenta-se em diversas cores, como por exemplo as cores branca, amarelada ou avermelhada. As suas dimensões são diminutas, com partículas menores que 4 μm de diâmetro. Tem origem na desagregação de rochas feldspáticas, a qual pode ocorrer por ataque químico como por exemplo, com água ou ácido carbónico, mas também pode ocorrer por processo físico tal como a erosão ou vulcanismo, que produzem a fragmentação em partículas muito pequenas [13].

Caulino – é um mineral composto por silicatos hidratados de alumínio, como a caulinite e a halosite, e apresenta características especiais que permitem a sua utilização na fabricação de papel, cerâmica, tintas, etc.

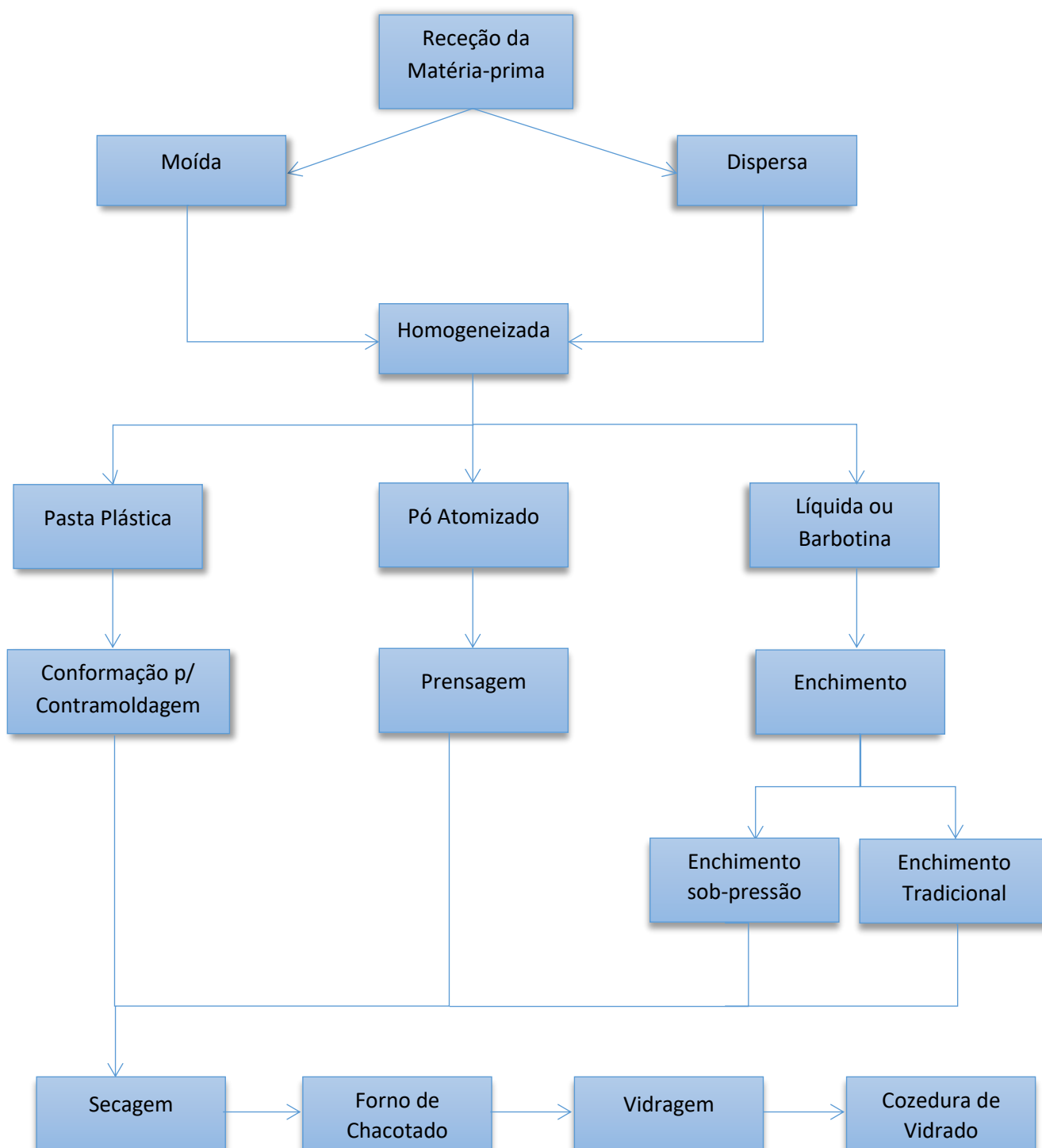
Apresentam plasticidade e resistência mecânica, a seco. O mineral é formado pela caulinita, em geral de cor branca ou quase branca, devido ao baixo teor de ferro sendo um dos seis minerais mais abundantes da crosta terrestre [14].

Embora a porcelana seja um produto cerâmico existem particularidades que a caracterizam e colocam num patamar de destaque, dentro do vasto leque de produtos cerâmicos existentes, no mercado. Desde logo destacam-se três propriedades fundamentais que são a dureza, a brancura e a translucidez.

As peças de porcelana, na sua grande maioria, são sujeitas diariamente a um elevado número de esforços de resistência e tensão, sem perda das suas características originais. Assim, e para que o seu tempo de vida útil seja elevado é

fundamental que tenham também um conjunto de outras características estruturais, tais como, elevada resistência mecânica, baixa porosidade e alta densidade.

3.5. Fluxograma, das matérias-primas até ao produto final



Neste diagrama de blocos, não estão representados todos os processos existentes na produção de peças de porcelana. Foram excluídos todos os que estão a jusante da cozedura de vidro, por serem considerados processos que não têm influência no objeto de estudo deste projeto.

Da análise do diagrama de blocos apresentado podemos constatar que desde o primeiro processo, receção da matéria-prima, até ao processo de secagem são vários os processos intermédios envolvidos no tratamento e processamento da pasta de cerâmica. No entanto, importa dar especial destaque aos últimos quatro processos.

3.5.1. Secagem

As peças provenientes dos processos de produção a montante são carregadas em vagonas. Estas circulam em circuito fechado contínuo e automático do qual fazem parte o secador e o forno de chacotado. O túnel de secagem está permanentemente aberto na sua entrada e saída, permitindo assim o movimento contínuo das vagonas no seu interior. Todo este movimento realiza-se a uma velocidade muito baixa, de aproximadamente 4 m/h, perfazendo um total de ciclo de secagem de cerca de 8 h. O processo de secagem faz o reaproveitamento da exaustão de ar quente, que, é redirecionado para o túnel de secagem a uma temperatura de aproximadamente 170 °C. Este processo visa a extração de todo o teor de água existente na superfície das peças, que devem estar secas à saída do túnel, sob pena de comprometerem o êxito do processo seguinte, a cozedura de chacote.

3.5.2. Forno de chacotado

Num movimento contínuo, as peças provenientes da secagem iniciam o processo de chacote, que é considerado como uma primeira cozedura, uma vez que as peças cerâmicas são sujeitas a uma temperatura de cerca de 1000 °C. À semelhança de todos os fornos da empresa, o forno de chacotado é do tipo contínuo, isto é, as peças estão sempre em movimento no seu interior. Este é um processo de longa

duração, pois a velocidade de avanço do comboio de vagonas é idêntica à do túnel de secagem, aproximadamente 4 m/h, tendo o forno um comprimento total de 60 m e um impulso de entrada de cada vagona de 32 minutos, tendo então um ciclo total, desde a entrada até à saída do forno, de 16 horas.

As peças chacoalhadas apresentam maior resistência, provocada pela aglomeração das partículas que estão em contacto entre si, do qual resulta uma redução da superfície e da porosidade das peças.

A existência de reações físicas e químicas, por si só acarreta especial cuidado e responsabilidade, no controlo dos processos de aquecimento e arrefecimento, sob pena de comprometer algumas das características da composição da pasta, tais como a granulometria, condutividade térmica, geometria dos materiais e a elasticidade a várias temperaturas. Podemos também acrescentar outros fatores considerados importantes e que estão relacionados com o processo de cozedura, tais como o tempo, a estabilidade da temperatura no interior do forno e o controlo dos processos de aquecimento e arrefecimento. Na tabela 3.2 [16] estão representadas as principais fases que ocorrem durante a cozedura de uma peça.

Tabela 3.2 – Principais fases da ação do calor sobre um corpo cerâmico.

Cor no interior do forno	Temperatura (°C)	Reações decorrentes da cozadura de uma pasta cerâmica
	100	Perda de humidade
	200	Secagem – inicia-se a cozadura com a secagem dos corpos cerâmicos. A água que é absorvida pela superfície da argila, desaparece a cerca de 200 °C.
	220	Perda de água da constituição – nesta fase os cristais decompõem-se numa estrutura desordenada. Os corpos cerâmicos diminuem ligeiramente de volume e aumentam de porosidade.
Vermelho nascente	450	Desintegração da estrutura da argila e aumento da porosidade.
	500	Oxidação – todas as argilas apesar de serem limpas durante a preparação de uma pasta cerâmica, contêm matéria orgânica. Esta matéria orgânica constituída por pequenas partículas de lenhite tem a sua oxidação entre 200º e 700º. Esta fase será mais rápida numa atmosfera húmida (liberta-se o CO ₂ e o vapor de água).
	573	Inversão do quartzo – nesta fase todo o quartzo existente na pasta cerâmica passa à sua forma de alta temperatura. Existe uma variação rápida de volume (cerca de 2% de expansão). A rapidez do fenómeno provoca geralmente roturas nos corpos cerâmicos.
Vermelho sombrio	700	Oxidação
Cereja escuro	850	Contração e porosidade da pasta – o volume do corpo cerâmico vai variando conforme a temperatura. A contração acontece nas últimas fases da cozadura. Note-se que a contração não se dá ao mesmo tempo que a perda de peso.
	900	
Cereja claro	950	Formação da espinela de argila – inicia-se o processo de vitrificação.
	980	Cristalização na massa de argila – esta fase consiste na reorganização (cristalização) da estrutura amorfa da argila. Quanto maior for esta cristalização melhor será a resistência mecânica do corpo cerâmico.
Alaranjado escuro	1100	Vitrificação – a vitrificação da pasta é auxiliada com a utilização de fundentes na sua composição (O feldspato de sódio e o potássio fundem a 1100º). A vitrificação aumenta de volume à medida que a temperatura aumenta.
Alaranjado claro	1200	Fusão de feldspato e dissolução da argila. Aceleração da contração, diminuição da porosidade.

3.5.3. Vidragem

Entre o processo de chacote e a cozadura de vidrado tem lugar o processo de vidragem, que consiste na aplicação de um banho integral das peças cerâmicas, com a solução de vidrado. Este banho tanto pode ser efetuado por imersão da peça ou por projeção da solução sobre a totalidade da superfície da mesma, variando a técnica aplicada, em função do tipo e forma da peça produzida.

Na aplicação do vidrado é relevante o controlo da porosidade das peças, resultante no processo anterior. Desta forma é imperativo garantir que estas tenham uma porosidade tal, que a sua percentagem de absorção de água esteja compreendida entre 19% e 22%.

3.5.4. Cozedura de vidrado

Após a aplicação do vidrado as peças são submetidas a nova cozadura, desta vez, no forno de vidrado. Em comparação com a cozadura de chacote a cozadura de vidrado atinge uma temperatura superior, podendo chegar muito próximo de 1400 °C.

Por forma a evitar a ocorrência de defeitos nas peças e para que este processo seja realizado com sucesso, deverão ser garantidos alguns aspetos fundamentais.

- Garantir um aquecimento e arrefecimento uniforme.
- Libertar todos os gases provenientes da cozadura, de forma a evitar o aparecimento de defeitos. Por exemplo, é fundamental garantir que não fica CO₂ aprisionado sob o vidrado, pois este facto provoca uma série de defeitos na peça.

Este é um processo de longa duração, mas mais rápido que o de chacote, e realizado num forno contínuo com 64 m de comprimento, com capacidade de 49 vagonas no seu interior e um impulso de entrada de 7 minutos. Assim o ciclo de cozadura perfaz aproximadamente 6 h. É neste processo que as características das peças atingem a sua maturidade estrutural. O mesmo será dizer que no final

deste processo se obtêm peças com elevada resistência, impermeáveis, brancas e translúcidas. Estas características são essenciais, pois são elas que permitem a resistência mecânica das peças, a todas as solicitações externas que lhes serão aplicadas na sua utilização diária.

3.5.4.1. Atmosfera redutora

A cor branca é uma das características elementares da porcelana e, portanto, o seu controlo durante a cozedura de vidro é essencial. Para tal é fundamental a obtenção de uma atmosfera redutora na designada zona de redução, onde a temperatura varia entre 1050 °C e 1260 °C e antecede a zona de oxidação, que é a zona de temperatura máxima entre 1260 °C e 1380 °C.

A criação de uma atmosfera redutora no interior do forno é possível quando se utilizam combustíveis minerais, pois permitem a libertação de carbono.

O carbono livre presente numa atmosfera, sem oxigénio e a altas temperaturas, vai capturar o oxigénio existente nos óxidos metálicos, na pasta e no vidro. Geralmente são os óxidos de ferro e de cobre os mais afetados pela atmosfera redutora.

O controlo e manutenção da atmosfera redutora é feito através da monitorização da concentração dos níveis de monóxido de carbono (CO) existentes na zona de redução, que devem estar compreendidos entre 2% e 4%. No entanto, um ceramista experiente também consegue identificar a existência de uma atmosfera redutora no interior do forno por observação da chama à saída das vigias do forno que, neste caso é intensa e de cor que pode ir desde o azul até ao amarelo alaranjado dependendo para isso da pressão, temperatura e concentração de monóxido de carbono.

Desta forma estão reunidas as condições necessárias para que se realize o processo de redução das peças de porcelana, sem o qual não é possível a obtenção de peças de cor branca.

3.6. Forno de microondas

No Departamento de Física da Universidade de Aveiro foi desenvolvido um forno protótipo de microondas, com capacidade para a realização de cozadura de vidro de porcelana. Dos estudos prévios, com o software de simulação COMSOL, concluiu-se que a melhor solução, seria a instalação de 6 magnetrões no forno, com potência nominal de 1 kW cada. Desta forma, foram instalados um par de magnetrões em cada uma das paredes laterais do forno, com as guias de onda dispostas perpendicularmente entre si. Os dois magnetrões restantes foram instalados na superfície superior do forno, e neste caso, as guias de onda estão paralelas entre si. Foram também realizados estudos por forma a identificar qual o melhor material refratário a usar no isolamento da camara interna de cozadura do forno. Neste caso não só é importante considerar a condutividade térmica, mas também o seu comportamento quando exposto à radiação de microondas, pois é essencial que este, seja transparente à radiação de microondas para permitir a sua propagação até ao interior do forno. Após o estudo de vários materiais foi feita a escolha pelo refratário Kapyrok GR 1600.

Para a monitorização da temperatura foi instalado um termopar na parede posterior do forno, e para evitar a formação de arco elétrico foi revestido com folha de platina ligada à massa.



Figura 3.19 – Imagem do exterior do forno.



Figura 3.20 – Imagem dos magnetrões instalados.



Figura 3.21 – Imagem do interior do forno, com refratário para isolamento térmico e termopar.



Figura 3.22 – Forno com carga de cerâmica sobre uma placa de carboneto de silício.



Figura 3.23 – Sistema de controlo.



Figura 3.24 – Sistema de aquisição de dados (HP34970A).

4. Análise e Resultados

4.1. Regulação dos queimadores para obtenção de atmosfera redutora

A obtenção de peças com a cor branca, idênticas às peças de produção comercializadas pela empresa Costa Verde, é um dos objetivos pretendidos com a utilização do forno híbrido gás-microondas. Para tal é fundamental fazer a calibração dos servo motores de alimentação dos queimadores de gás, de modo a obter-se uma atmosfera redutora

Após a realização de vários ajustes dos parâmetros de controlo, este objetivo, foi alcançado com sucesso. Na figura 4.1 estão representadas algumas das peças cozidas no forno híbrido protótipo, utilizando apenas como fonte de energia o gás natural.

As peças finais destes ensaios apresentam a brancura idêntica à das peças de referência, cozidas no forno industrial da Costa Verde.



Figura 4.1 – Peças cozidas no forno protótipo, por processo convencional, gás natural.

4.2. Análise e caracterização da porcelana cozida no forno protótipo de microondas

Antes de se avançar para o processo de cozedura híbrida gás-microondas, é imperativo fazer um estudo prévio, de modo a verificar a possibilidade da cozedura de porcelana, usando apenas como fonte de energia a radiação de microondas. Para tal foram realizadas cozeduras de vidro de peças chacoalhadas cedidas pela empresa Costa Verde, no forno protótipo de 6 magnetrons descrito no capítulo anterior.

Todos os resultados obtidos, resultantes das cozeduras no forno de microondas, foram comparados com resultados de amostras de referência provenientes de peças cozidas no forno de vidro, convencional, da Costa Verde.

4.2.1. Comparação de propriedades físicas após cozedura de vidro por microondas e por gás natural

Utilizando como amostra de referência, uma peça de porcelana cozida no forno industrial da Costa Verde, cuja fonte de energia é o gás natural e uma outra amostra resultante de uma peça cozida no forno protótipo de microondas, foram comparadas uma série de características de controlo de qualidade.

Com recurso a uma balança hidrostática determinaram-se os valores do volume bruto, densidade bruta e densidade aparente, assim como as percentagens da porosidade aparente e absorção de água das duas amostras.

Tabela 4.1 – Comparação de propriedades entre a amostra de controlo e amostra protótipo.

Amostra	Volume "bruto" (cm ³)	Densidade "bruta" (g/cm ³)	Densidade aparente (g/cm ³)	Porosidade aparente ou "aberta" (%)	Absorção de água (%)
Cozedura microondas	1,125	2,258	2,372	4,82	2,13
Cozedura gás natural	0,395	2,363	2,412	2,03	0,86

Da análise e comparação dos resultados obtidos podemos concluir que os valores da densidade aparente e bruta são muito próximos. Já no que respeita à porosidade e absorção de água podemos constatar que a divergência é maior, sendo a porosidade da amostra do forno de microondas superior ao dobro da amostra de referência. A mesma razão de grandeza verifica-se entre os valores de absorção de água das amostras analisadas.

4.2.2. Análise por SEM

Da análise por microscopia eletrónica de varrimento (SEM), fez-se a identificação dos diferentes constituintes da pasta cerâmica, (quartzo, feldspato, argila e caulino), assim como a sua interligação resultante da cozadura. Neste caso comparam-se as imagens, resultantes da cozadura de vidro de duas peças cerâmicas, utilizando, como fonte de energia, num caso gás natural e no outro radiação de microondas.

Fazendo a análise das imagens, podemos observar as transformações resultantes nas diferentes ampliações apresentadas.

Nas imagens com ampliação mais baixa, 1.0 e 2.5 kX podemos observar a sinterização amorfa, característica do caulino e da argila. Já nas imagens com ampliação superior, 10.0 e 40.0 kX são bem visíveis a presença dos grãos de quartzo e as fibras características da sinterização do feldspato. Simultaneamente comparamos as imagens das duas amostras analisadas. Embora sejam visíveis algumas diferenças entre as duas amostras, podemos concluir, que para além de estas serem espectáveis, não são significativas.

Cozedura por gás natural

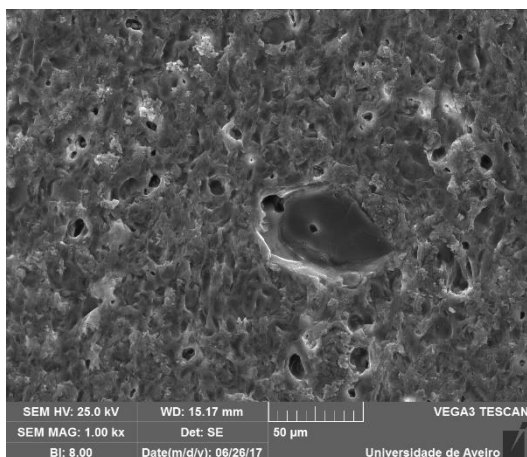


Figura 4.2 – Imagem SEM 1.0 kX.

Cozedura por microondas

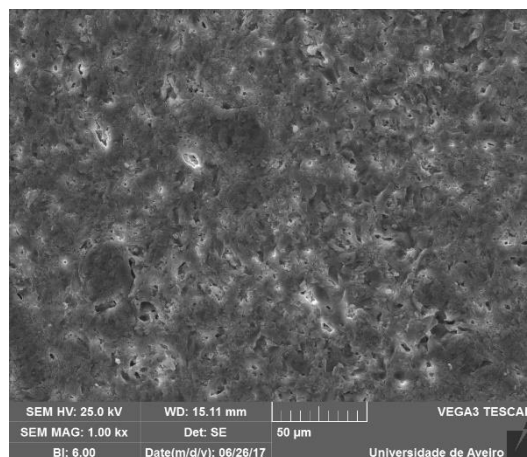


Figura 4.3 – Imagem SEM 1.0 kX.

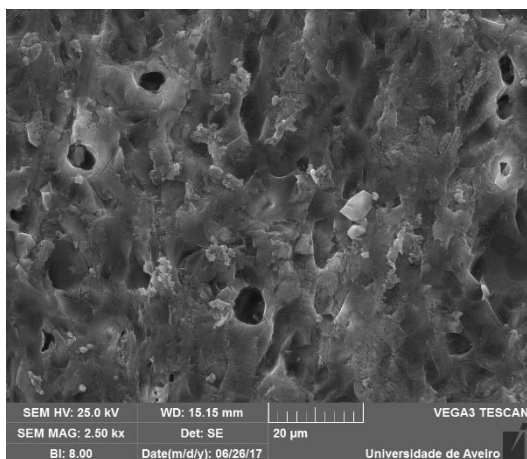


Figura 4.4 – Imagem SEM 2.5 kX.

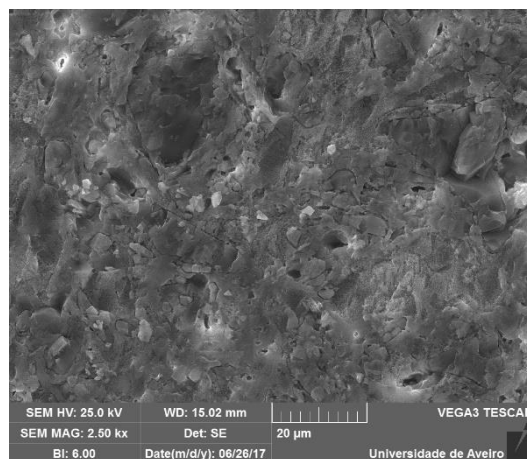


Figura 4.5 – Imagem SEM 2.5 kX.

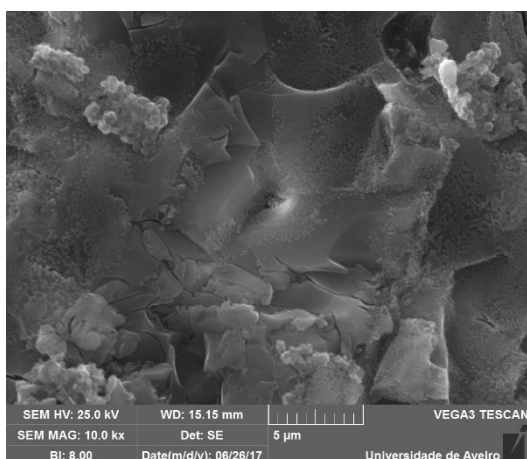


Figura 4.6 – Imagem SEM 10.0 kX.

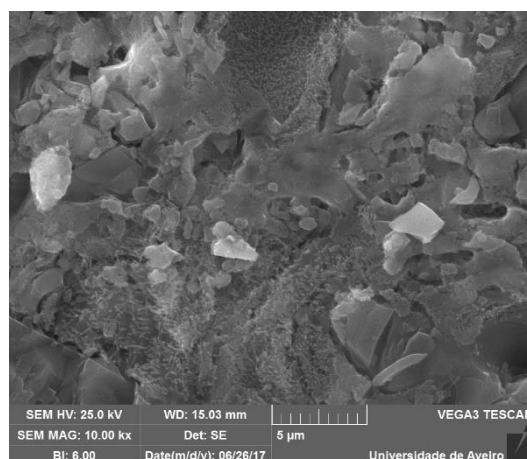


Figura 4.7 – Imagem SEM 10.0 kX.

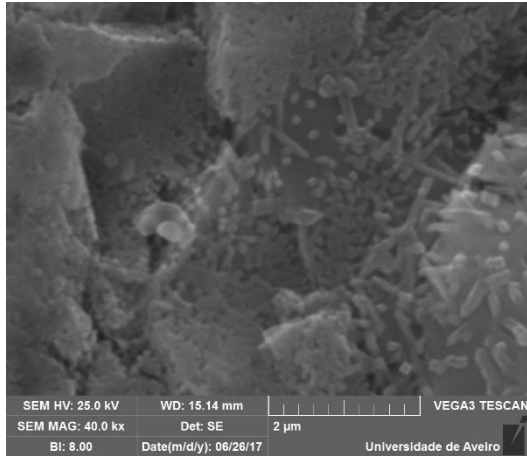


Figura 4.8 – Imagem SEM 40.0 kX.

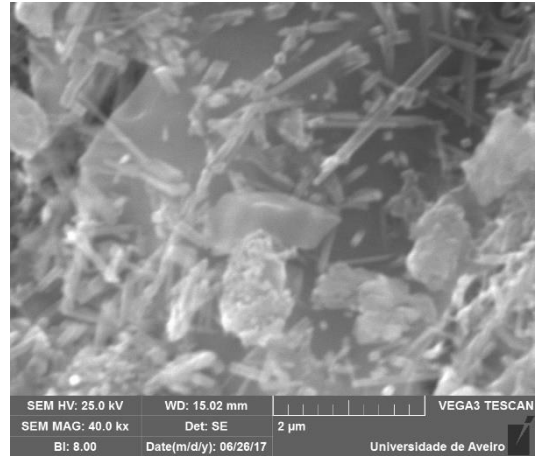


Figura 4.9 – Imagem SEM 40.0 kX.

4.2.3. Análise SEM-EDX

A análise SEM-EDX permite a identificação e quantificação dos elementos químicos existentes na amostra. Podemos constatar pelos valores obtidos a presença de quartzo em ambas as amostras analisadas.

Embora os valores não sejam idênticos nas duas amostras, podemos concluir que são muito próximos, sendo a diferença pouco significativa.

Amostra cozida por gás natural

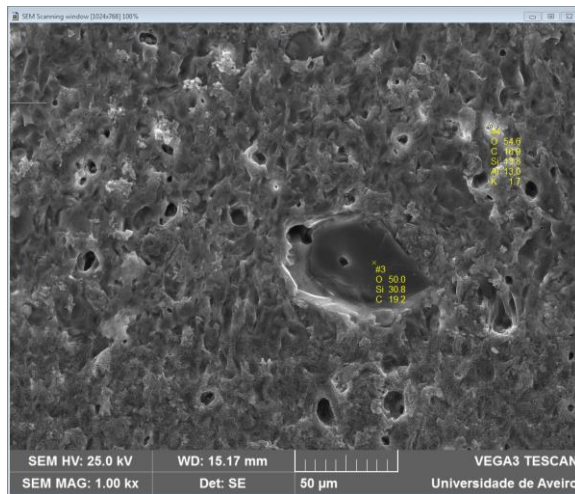


Figura 4.10 – Análise química, O 50.0%, Si 30.8%.

Amostra cozida por microondas

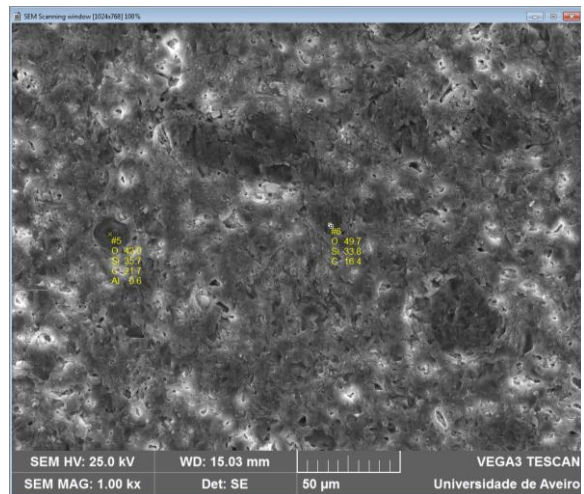


Figura 4.11 – Análise química, O 42.0%, Si 35.7%.

5. Conclusões, Contributos, Limitações e Investigação Futura

A obtenção de peças de porcelana cozidas no forno híbrido gás-microondas, com características estruturais e de aparência idênticas às peças produzidas pela empresa Costa Verde (peças de referência), no forno convencional a gás natural, era o objetivo final proposto neste trabalho.

Demonstramos ser possível a criação de uma atmosfera redutora no interior do forno, de tal forma que foram obtidas peças de porcelana com características muito semelhantes às peças de referência e controlo. Foi também realizada uma profunda reabilitação da totalidade das vagonas permitindo assim a realização dos ensaios de cozedura com segurança e fiabilidade. A instalação de uma calha de areia no interior do forno contribuiu de uma forma bastante relevante no isolamento do calor no interior da câmara de cozedura do forno.

Foram também realizados trabalhos de simulação que permitem observar o comportamento e resposta da radiação de microondas no interior de um forno. De tal forma que nos permite compreender melhor a relação entre a distribuição dos campos elétricos e a temperatura resultante nas peças, no interior do forno.

No que respeita à utilização da radiação de microondas como fonte de energia para a cozedura de porcelana foram apresentados resultados promissores que permitem com bastante margem de segurança confiar e apostar na utilização desta tecnologia para a obtenção de peças de porcelana com características estruturais muito próximas das peças de referência e, desta forma, no futuro serem atingidos os objetivos inicialmente propostos que passam também pela redução dos custos de produção e das emissões de gases com efeito de estufa.

Referências

- [1] R. R. Menezes, P. M. Souto, R. H. G. A. Kiminami - Sinterização de cerâmicas em microondas - Parte I Aspectos Fundamentais, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de S. Carlos, 2007
- [2] Relatório técnico-científico final, Projeto nº 003410: “GREENWAVE - Sinterização assistida por micro-ondas de porcelana”, Promotor líder: Induzir – Indústria e Comércio de Equipamentos, Lda.; Promotores: Porcelanas Costa Verde, S.A., LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Universidade de Aveiro, CTCV – Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro, 2011.
- [3] R. W. Bruce, Materials Research Society Symp. Proc.: Microwave processing of materials I, Eds.: W. Sutton, M. H. Brooks, I. J. Chabinsky, Materials Research Society, Pittsburgh, 124 (1988) p. 3.
- [4] W. R. Tinga, Materials Research Society Symp. Proc.: Microwave processing of materials I, Eds.: W. Sutton, M. H. Brooks, I. J. Chabinsky, Materials Research Society, Pittsburgh, 124 (1988) 33.
- [5] D. E. Clark, W. H. Sutton, Ann. Rev. Mater. Sci. 26 (1996) 299
- [6] M. Abraham, R. Becker, The classical theory of electricity and magnetism, 2nd Ed., Blackie & Son, London (1952) 288.
- [7] D. E. Clark, W. H. Sutton, Ann. Rev. Mater. Sci. 26 (1996) 299.
- [8] Henry F, Développement de la métrologie hyperfréquences et application a l'étude de l'hydratation et la diffusion de l'eau dans les matériaux macromoléculaires, PhD Thesis, Paris (1982).
- [9] Montgomery C. G. et. al., 1965.
- [10] Costa L. C., Devesa S, André P., Mat. Research Innov. (2004), submetido.
- [11] https://pt.wikipedia.org/wiki/Quartzo#Minerais_do_grupo_do_quartzo; acedido em 26 de junho de 2017.
- [12] <https://pt.wikipedia.org/wiki/Feldspato>; acedido em 26 de junho de 2017.
- [13] <https://pt.wikipedia.org/wiki/Argila>; acedido em 26 de junho de 2017.
- [14] <https://pt.wikipedia.org/wiki/Caulim>; acedido em 26 de junho de 2017.
- [15] Sousa J P, Propagação em Cavidades Ressonantes : Aplicação em Métodos de Medida em Fornos Microondas, Universidade de Aveiro (2002).
- [16] M. H. P. César Canotilho, Processos de cozedura em cerâmica, Instituto Politécnico de Bragança, 2003.
- [17] Properties Handbook, Table 1 – Typical Properties of Teflon PTFE Fluoropolymer Resins, DuPont, 2.