U.PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO
M 2023

Monitorização da Secagem de Carapaças Cerâmicas no Processo de Fundição por Cera Perdida

CATARINA MONTEIRO LADEIRO
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Orientador FEUP: Prof. Luís Filipe Malheiros
Coorientador FEUP: Prof. Manuel Oliveira

Julho de 2023

U.PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

CANDIDATO	Catarina Monteiro Ladeiro	*Código*	201806112
TÍTULO	Monitorização da Secagem de Carapaças Cerâmicas no Processo de Fundição por Cera Perdida		
DATA	___de *julho* de *2023*		
LOCAL	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Sala_F106-___:_h		

JÚRI	*Presidente*	Professor Manuel Fernando Gonçalves Vieira	DEMM/FEUP
	Arguente	Professor Rui Jorge de Lemos Neto	DEM/FEUP
	Orientador	Professor Luís Filipe Malheiros de Freitas Ferreira	DEMM/FEUP

Resumo

A fundição por modelo de cera perdida vazado em carapaça cerâmica (*Investment Casting*) tem sido aplicada na produção de componentes para uma panóplia de aplicações, sendo considerada um dos mais transversais e versáteis processos de fundição. O processo compreende um conjunto de etapas, entre as quais a produção de carapaças cerâmicas que desempenham um papel preponderante na medida em que a qualidade dos fundidos, em particular da sua pele, é fortemente dependente da qualidade superficial e resistência mecânica das carapaças. Nesta etapa, reveste-se de capital importância a secagem intercalar entre a deposição de camadas cerâmicas que compõem as carapaças uma vez que o seu teor de humidade condiciona a ligação entre si, com impacto a nível da integridade e qualidade das carapaças cerâmicas.

Este trabalho incide sobre o estudo e monitorização do processo de secagem das carapaças cerâmicas na tentativa de selecionar a técnica mais expedita a utilizar no seu controlo e de estabelecer uma correlação entre o tempo de secagem durante a sua produção, a resistência à flexão e a ocorrência de defeitos nos fundidos. Para tal, após uma pesquisa de metodologias e equipamentos adequados para o objetivo em vista, foi realizada a monitorização da variação da resistência elétrica e da temperatura (por análise termográfica) de um conjunto de carapaças cerâmicas produzidas a partir de modelos de provetes utilizados nos ensaios de flexão e de molhabilidade, bem como de modelos de peças de geometria simples e, finalmente, de geometria um pouco mais complexa. O estudo desenvolvido demonstrou que a termografia será o método mais expedito e fiável para o controlo da secagem de carapaças cerâmicas.

A análise da potencial ocorrência de defeitos, à sua superfície, ao longo da etapa de produção das carapaças cerâmicas permitiu concluir que a formação de defeitos de um determinado tipo (*bulge* e/ou *buckle*) estará relacionada com um conjunto de fatores, nomeadamente: o tempo de secagem, a carga do forno de descerificação e a concentração de tensões nas paredes das carapaças.

Um controlo mais apertado da secagem das carapaças cerâmicas permitirá encurtar esta etapa do processo e, consequentemente, aumentar a produtividade da unidade fabril. Para além disso, a correta monitorização da produção, associada ao adequado projeto do número e localização de respiros das carapaças cerâmicas, permitirá, deste modo, minimizar o aparecimento de defeitos nos fundidos.

Palavras-Chave

Fundição por modelo de cera perdido; Carapaça cerâmica; Secagem de carapaças cerâmicas; Resistência elétrica; Termografia; Infravermelhos.

Abstract

Investment casting has been used to produce components for various applications and is considered one of the most versatile and transversal casting processes. The process comprises a series of stages, among which is the production of ceramic shells, which play an essential role insofar as the quality of the castings, particularly their skin, is strongly dependent on the surface quality and mechanical resistance of the shells. At this stage, the inter-coat drying of the ceramic layers that compose the shells is of utmost importance since their moisture content impairs the bonding between them, impacting the integrity and quality of the ceramic shells.

This work focuses on the study and monitoring of the drying process of ceramic shells to select the most suitable technique to be used in its control and to establish a correlation between the drying duration during their manufacturing, the flexural strength and the occurrence of defects in the castings. To this end, after a search for suitable methodologies and equipment for the mentioned purpose, the monitoring of the electrical resistance and temperature (by thermography) of a set of ceramic shells produced from specimen models used in the bending and wettability tests, as well as from casting's models with simple geometry and, finally, with slightly more complex geometry, was carried out. The study showed that thermography is the most suitable and trustable technique to be used to control the drying of ceramic shells.

The analysis of the potential occurrence of defects, on the surface, throughout the production stage of the ceramic shells let us conclude that the formation of defects of a particular type (bulge and/or buckle) will be related to a set of factors, namely: the drying time, the load of the dewaxing kiln and the concentration of tensions on the walls of the shells.

A tighter control of the drying of the ceramic shells will make it possible to shorten this stage of the process and consequently increase the plant's productivity. Furthermore, the accurate monitoring of production, associated with the good design of the number and location of ventings in the ceramic shells, will allow this way to minimize the number of defects in the castings.

Keywords

Investment Casting; Ceramic Shell; Drying of ceramic shells; Electrical resistance; Thermography; Infrared light.

Agradecimentos

Inicialmente, agradeço à minha família pelo apoio incondicional, pela disponibilidade e compreensão que me prestaram ao longo da minha jornada académica.

Aos meus amigos por me terem proporcionado tantos bons momentos e que caminharam também comigo nos maus.

Um agradecimento especial a toda a comunidade docente do DEMM com quem tive o prazer de cruzar caminho e que me acompanhou e instruiu durante os últimos 5 anos. Quero endereçar uma palavra de apreço especial ao Prof. Luís Filipe Malheiros, orientador desta dissertação, por todo o apoio, dedicação, disponibilidade e prontidão no decorrer dos seis meses, e também pelo ensinamento científico e pessoal que imprimiu em mim durante o meu percurso académico. Estendo o meu agradecimento ao Prof. Manuel Oliveira pelo apoio e auxílio prestados durante a presente dissertação.

Gostaria de expressar a minha sincera gratidão e reconhecimento a toda a equipa da FERESPE, pela forma excecional como me acolheram e integraram. Agradeço ao Dr. Jorge Casais por ter proporcionado a realização desta dissertação em ambiente empresarial, um obrigada muito especial ao Eng. Pedro Lacerda, coorientador da presente dissertação, Eng. Bártolo Paiva, Eng. Joaquim Santos, Engª Sandra Coimbra, Eduardo, Carlos e Hugo. A todos, o meu muito obrigada.

Por fim, um forte agradecimento ao Prof. Joaquim Gabriel que, desde o início, demonstrou disponibilidade e interesse na partilha de conhecimento científico útil para a presente dissertação, disponibilizando alguns dos equipamentos que foram utilizados durante os trabalhos práticos.

Índice

1 Introdução 1
1.1 Contextualização 1
1.2 Motivação e Objetivos 1
1.3 Estrutura da Dissertação 1
2 A FERESPE 2
2.1 Processo Produtivo 2
3 Revisão Bibliográfica 3
3.1 Introdução ao *Investment Casting* 3
3.2 Modelo em Cera 6
3.3 Carapaças Cerâmicas 6
3.3.1 Refratários 8
3.3.2 Ligantes 8
3.3.3 Outros aditivos 8
3.3.4 Preparação da barbotina 9
3.3.5 Fabrico da Carapaça Cerâmica e Secagem 9
3.4 Secagem de Cerâmicos 10
3.4.1 Processo de secagem em meio poroso 11
3.5 Métodos de Controlo de Secagem 14
3.5.1 Perda de Massa 14
3.5.2 Temperatura 15
3.5.2.1 Avaliação da temperatura por imagem térmica 15
3.5.3 Condutividade/Resistência Elétrica 16
3.5.4 Capacitância 17
3.5.5 Indicadores de Secagem 17
3.6 Descerificação e Sinterização 18
3.7 Defeitos em *Investment Casting* 18
3.8 Avaliação da resistência mecânica e inspeção visual 20
3.8.1 Resistência Mecânica 20
3.8.2 Inspeção Final 20
4 Trabalho Experimental 21
4.1 Materiais Utilizados 21
4.1.1 Ceras 21
4.1.2 Carapaças cerâmicas 21
4.2 Metodologia Experimental 22
4.2.1 Produção das carapaças cerâmicas 22
4.2.2 Ensaios preliminares 23
4.2.2.1 Ensaio 1 23

4.2.2.2 Ensaio 2 25
4.2.2.3 Ensaio 3 27
4.2.2.4 Ensaio 4 31
4.2.2.5 Ensaio 5 32
4.2.2.6 Ensaio 6 34
4.2.3 Aplicação da metodologia selecionada sobre provetes 38
4.2.4 Aplicação da metodologia selecionada para carapaças de peças de geometria simples 39
4.2.5 Implementação da metodologia no sistema produtivo 40
5 Apresentação e Discussão de Resultados 40
5.1 Implementação da metodologia sobre provetes 40
5.1.1 Inspeção Visual 46
5.1.2 Resistência à flexão 47
5.2 Implementação da metodologia sobre carapaças relativas a peças de geometria simples 47
5.2.1 Inspeção visual 51
5.3 Implementação da metodologia no sistema produtivo 54
5.3.1 Inspeção Visual 56
6 Conclusão 57
7 Trabalhos futuros 57

Índice de Figuras

Figura 1: Esquema representativo das etapas do processo de *Investment Casting*. Adaptado de [10]. 4
Figura 2: Secção transversal de uma carapaça cerâmica [8]. 7
Figura 3: Representação esquemática dos sensores para determinação da temperatura do bolbo seco e do bolbo húmido. Adaptado de [18]. 11
Figura 4: A - Correlação entre a temperatura, humidade relativa e humidade absoluta para o processo de secagem de materiais porosos [18]; B – Representação esquemática dos fluxos de massa e calor num corpo poroso [17]. 11
Figura 5: A - Perda de massa em função do tempo de secagem; B - Variação da taxa de secagem em função do teor de humidade para os diferentes estádios. Adaptado de [17]. 12
Figura 6: Representação esquemática dos estádios do processo de secagem em meio poroso. Adaptado de [17]. 13
Figura 7: Representação esquemática do sistema partículas-água durante a contração. Adaptado de [17]. 13
Figura 8: Modelo do processo de secagem em meios porosos [20]. 14
Figura 9: Curva da variação da temperatura da carapaça cerâmica ao longo da sua secagem [22]. 15
Figura 10: Representação esquemática da variação da temperatura e da condutividade elétrica em função do tempo de secagem de um cerâmico [22]. 17
Figura 11: Representação esquemática de: A - Ensaio de Flexão em 3 pontos (EF3); B - Ensaio de Flexão em 4 pontos (EF4) [33]. 20
Figura 12: Sequência de deposição das camadas de barbotina e respetivo material refratário. 23
Figura 13: Carapaça cerâmica em que se procedeu à determinação do teor de humidade com o equipamento utilizado em construção civil. 23
Figura 14: Evolução do peso da carapaça cerâmica ao longo do processo de seu fabrico. 23
Figura 15: Evolução do peso da carapaça cerâmica, em função do tempo de secagem, após deposição da camada selante. 24
Figura 16: Evolução do teor de humidade da carapaça cerâmica em função do tempo de secagem. 25
Figura 17: Carapaça cerâmica utilizada no Ensaio 2. 25
Figura 18: Variação da resistência elétrica de cada camada cerâmica em função do tempo de secagem. 26
Figura 19: Variação da capacitância de cada camada cerâmica em função do tempo de secagem. 26
Figura 20: Variação da temperatura durante a secagem da 1ª camada da carapaça nos dois planos

analisados. 27
Figura 21: A - Modelos em cera com insertos metálicos; B - Imagem da montagem do sistema para medição da resistência elétrica da camada de refratário. 28
Figura 22: Evolução da resistência elétrica de cada uma das camadas refratárias, em função do tempo. 28
Figura 23: Evolução da capacitância de um conjunto de carapaças relativas a cinco modelos, em função do tempo. 30
Figura 24: Evolução das temperaturas ambiente e da carapaça cerâmica, ao longo da secagem das três primeiras camadas. 30
Figura 25: Variação da temperatura da carapaça cerâmica após o banho selante. 31
Figura 26: Variação do peso da carapaça cerâmica em função do tempo de secagem para: A- 1ª camada; B- 2ª camada; C- 3ª camada. 32
Figura 27: Esquema representativo da metodologia utilizada para medição da resistência elétrica da carapaça cerâmica com o equipamento *SEW 6211A IN*. 33
Figura 28: A- Modelo de cera do provete para ensaio de flexão (PF); B- Modelo de cera do provete para ensaio de molhabilidade utilizado na inspeção visual (PM). 33
Figura 29: Evolução da resistência elétrica da carapaça relativa ao modelo PF em função do tempo de secagem. 34
Figura 30: Evolução da resistência elétrica da carapaça relativa ao modelo PM em função do tempo de secagem. 34
Figura 31: Montagem dos equipamentos para registo da evolução da tonalidade das carapaças cerâmicas, ao longo da sua secagem, tendo sido utilizadas barbotinas contendo indicador ReDip™. 34
Figura 32: Evolução da resistência elétrica das três primeiras camadas da carapaça, relativa ao modelo PF, em função do tempo de secagem. 35
Figura 33: Evolução da resistência elétrica das três primeiras camadas da carapaça, relativa ao modelo PM, em função do tempo de secagem. 35
Figura 34: Variação da tonalidade e temperatura das três primeiras camadas da carapaça cerâmica, relativa ao modelo PF, durante a sua secagem. 36
Figura 35: Variação da tonalidade e temperatura das três primeiras camadas da carapaça cerâmica, relativa ao modelo PM, durante a sua secagem. 36
Figura 36: Alteração da tonalidade dos provetes de carapaça cerâmica: A - após o banho selante; B - Momento imediatamente anterior à descerificação; C - após descerificação. 37
Figura 37: Evolução da temperatura das três primeiras camadas da carapaça cerâmica, para cada uma das condições, durante a sua secagem. 37
Figura 38: Resistência à flexão de provetes de carapaças cerâmicas produzidas com barbotinas a

que foi adicionado (ou não) pigmento ReDip™. 38
Figura 39: A – Carapaça cerâmica antes da descerificação; B – Superfícies internas da carapaça após descerificação. 38
Figura 40: Geometria das peças adotadas para a metodologia selecionada. 39
Figura 41: Condições implementadas na secagem das carapaças cerâmicas, para cada uma das diferentes geometrias. 39
Figura 42: a) - Modelos de cera usados para este ensaio; b) - Cacho com um menor número de respiros; c) - Cacho com maior número de respiros; d) – Zonas da carapaça submetidas a controlo. 40
Figura 43: Variação da resistência elétrica e da temperatura das três primeiras camadas das carapaças cerâmicas, relativas à condição A, ao longo da sua secagem.....42
Figura 44: Variação da resistência elétrica e da temperatura das três primeiras camadas das carapaças cerâmicas, relativas à condição B, ao longo da sua secagem.....42
Figura 45: Variação da resistência elétrica e da temperatura das três primeiras camadas das carapaças cerâmicas, relativas à condição C, ao longo da sua secagem.....43
Figura 46: Variação da resistência elétrica e da temperatura das três primeiras camadas das carapaças cerâmicas, relativas à condição D, ao longo da sua secagem.....43
Figura 47: Termogramas relativos às três primeiras camadas das carapaças cerâmicas do modelo PM, para cada uma das condições. 44
Figura 48: Variação da resistência elétrica, da amplitude térmica e do peso ao longo da secagem das carapaças cerâmicas, relativas a modelos PF e PM, após deposição do banho selante. 46
Figura 49: a) - Imperfeições no modelo em cera; b) - Defeitos na superfície interna da carapaça cerâmica.....46
Figura 50: Resistência à flexão para as quatro condições ensaiadas em provetes de carapaças cerâmicas. 47
Figura 51: Termogramas relativos às carapaças das palhetas com geometria B, para diferentes tempos de secagem.....49
Figura 52: Variação da resistência elétrica de carapaça cerâmica após a deposição do banho selante, em função do tempo. 51
Figura 53: Termogramas relativos às carapaças das palhetas com geometria B, após a deposição do banho selante, para diferentes tempos de secagem. 51
Figura 54: Exemplos de deformações nas carapaças mas sem repercussão, em termos de defeitos, nos fundidos.....52
Figura 55: Imagens da superfície interna de carapaças, obtidas por radioscopia, e de defeitos nos fundidos com potencial origem em irregularidades dessa superfície.....52
Figura 56: Variação da taxa de refugo de fundidos, em função das condições de fabrico das

carapaças cerâmicas para cada uma das geometrias. 53
Figura 57: Termogramas relativos às três primeiras camadas, para o conjunto de carapaças relativas à geometria B e para cada uma das posições analisadas (Figura 42 c)).....55
Figura 58: Variação da resistência elétrica da carapaça cerâmica, em função do tempo de secagem após a deposição do banho selante para a condição B. 55
Figura 59: Termogramas relativos às carapaças cerâmicas após a sua imersão no banho selante e até à descerificação, para a condição B. 55
Figura 60: a) - Fração de peças não conformes de acordo com o conjunto de cachos; b) - Controlo visual e localização dos defeitos identificados nos fundidos. 56

Índice de Tabelas

Tabela 1: Composição típica da barbotina [11] 9
Tabela 2: Defeitos associados ao processo *IC* [7], [36] 19
Tabela 3: Componentes das barbotinas e respetivas frações mássicas (%) 21
Tabela 4: Composição química (%) das farinhas refratárias das barbotinas 22
Tabela 5: Composição química (%) das areias de reforço 22
Tabela 6: Equipamentos utilizados no Ensaio 2 25
Tabela 7: Tempo de leitura (min) da ponte LCR, para cada camada, para as condições estudadas 28
Tabela 8: Teor de água real de cada uma das barbotinas para as respetivas viscosidades 32
Tabela 9: Valores médios dos registos de temperatura e humidade relativa do ar durante a monitorização da secagem das carapaças de teste, para cada uma das condições 41
Tabela 10: Resistência elétrica e amplitude térmica de cada camada da carapaça, para tempos de secagem distintos 45
Tabela 11: Resistência elétrica e amplitude térmica de cada camada da carapaça cerâmica, relativa à geometria A, para tempos de secagem distintos 48
Tabela 12: Resistência elétrica e amplitude térmica de cada camada da carapaça cerâmica, relativa à geometria B, para tempos de secagem distintos 48
Tabela 13: Resistência elétrica e temperatura de recuperação médias ao fim dos tempos de secagem considerados para a geometria C 49
Tabela 14: Resistência elétrica e amplitude térmica para cada uma das geometrias, e para cada uma das condições após a deposição do banho selante 50
Tabela 15: Temperatura, humidade relativa e humidade absoluta do meio ambiente aquando da construção das carapaças para os cachos dos conjuntos A e B, e respetivos tempos de secagem para cada uma das camadas 54

Lista de Abreviaturas

AH – Humidade absoluta

1º FRP – First Falling Rate Period

2º FRP – Second Falling Rate Period

CRP – Constant Rate Period

EF3 – Ensaio de Flexão em 3 pontos

EF4 – Ensaio de Flexão em 4 pontos

IC – Investment Casting

MOR – Módulo de Rotura

PF – Provetes para ensaios de Flexão

PM – Provetes para ensaios de Molhabilidade

R – Resistência elétrica

RH – Humidade relativa

RT – Recovery Temperature

T – Temperatura

1 Introdução

1.1 Contextualização

A presente dissertação foi desenvolvida em parceria com a FERESPE – Fundição de Ferro e Aço, Lda., na unidade de fundição por modelo de cera perdida vazado em carapaça cerâmica, com o propósito de implementar um método de controlo de secagem das carapaças cerâmicas que permita minimizar a fração de defeitos decorrentes do processo. Esta necessidade, identificada pela empresa, resulta do erro associado à tomada de decisão em relação à deposição das camadas subsequentes na produção das carapaças cerâmicas com base na perda de massa (procedimento utilizado frequentemente como método indireto de monitorização do grau de secagem), com impacto em termos de produtividade.

Com este trabalho pretende-se assim que a empresa adquira confiança no método utilizado para monitorização da secagem durante a produção das carapaças cerâmicas e, através da sua implementação, encurte os tempos de fabrico, bem como melhore a qualidade dos fundidos, minimizando operações de acabamento por imperfeições associadas à secagem inadequada das carapaças cerâmicas.

Neste estudo foram abordadas diferentes metodologias de monitorização da secagem, e analisadas condições distintas de modo a perceber a sua influência na integridade da carapaça cerâmica após descerificação e na qualidade dos fundidos. Foram também realizados ensaios de flexão para várias condições de fabrico de forma a avaliar o seu impacto na resistência das carapaças cerâmicas.

1.2 Motivação e Objetivos

A realização desta dissertação envolveu a execução de estudos preliminares para avaliar a aplicabilidade dos métodos de monitorização da secagem das carapaças cerâmicas identificados na bibliografia e disponibilizados, em tempo útil, pelos parceiros envolvidos neste trabalho. Posteriormente, foi feita a monitorização da secagem durante a produção de carapaças cerâmicas de várias geometrias e condições de produção com o objetivo de definir o método mais expedito em termos da sua implementação e que conferisse maior confiança, de forma transversal, na execução de qualquer encomenda. Houve também o interesse de proceder à caracterização da resistência à flexão das carapaças cerâmicas para estabelecer uma potencial correlação com as condições de fabrico, nomeadamente ao nível da secagem.

Para a realização deste trabalho foi essencial ter contacto e aprofundar o conhecimento das várias etapas do processo para aferir a aplicabilidade dos vários métodos e valorizar o impacto que a secagem das carapaças cerâmicas tem na qualidade do produto final.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em sete capítulos. Os dois primeiros abordam

o tema proposto, os principais objetivos e motivação do trabalho, sendo também feita uma breve apresentação da empresa.

O terceiro capítulo enfoca os principais conceitos concernentes à fundição por modelo de cera perdida vazado em carapaça cerâmica, nomeadamente o processo produtivo, os materiais utilizados no fabrico dos modelos em cera, bem como das carapaças cerâmicas. Tendo em consideração que o presente trabalho enfoca a secagem das carapaças cerâmicas, é apresentado o processo de secagem de materiais porosos e as fases que lhe são inerentes. De seguida, evidenciam-se alguns dos métodos de controlo de secagem de materiais cerâmicos, e os conceitos associados à utilização dessas metodologias. É feita uma abordagem relativa à descerificação e são apresentados os principais defeitos decorrentes do processo, identificados pela empresa. No final deste capítulo, são ainda discutidos, de forma breve, métodos de controlo de algumas propriedades das carapaças cerâmicas.

O quarto capítulo versa os materiais que foram utilizados neste trabalho, bem como a metodologia e ensaios preliminares, e os respetivos resultados que permitiram selecionar o método mais adequado para a monitorização, em primeiro lugar, do processo de secagem em provetes, de seguida em peças de geometria simples, e, por fim, a sua implementação no sistema produtivo.

No quinto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos, bem como uma análise baseada nos principais objetivos deste trabalho.

A fechar, são apresentadas as principais conclusões advindas do projeto, e apresentados alguns estudos de interesse científico que possam ser desenvolvidos futuramente.

2 A FERESPE

A FERESPE, fundada em 1981 pelo Eng. Jorge Macedo Casais, é uma empresa portuguesa do setor da fundição que se dedica à produção de peças de alta exigência pelos processos de fundição em moldações autossecativas (areia furânica) e fundição por modelo de cera perdida vazado em carapaça cerâmica. De entre as várias ligas produzidas no fabrico dos fundidos, destacam-se os aços inoxidáveis super duplex, duplex, super austeníticos, aços de baixa e média liga e ferro fundido de alta liga [1].

A FERESPE proporciona soluções de fundição altamente competitivas, garantindo o seu posicionamento num nicho de mercado de pequenas e médias séries de produção de peças em ligas ferrosas [1].

A sua produção compreende o fabrico de componentes para uma vasta gama de setores industriais, nomeadamente o ferroviário, o da energia, o da indústria da pasta de papel, mineira e extrativa e naval, indústria química, entre outros [1].

2.1 Processo Produtivo

A unidade de *Investment Casting (IC)* surge na FERESPE apenas em 2018, tendo como principal

foco a produção de pequenas e médias séries de componentes de menores dimensões, e com elevada qualidade superficial e excelente precisão dimensional [1], [2].

O processo produtivo inicia-se com o projeto e conceção do molde, a partir do modelo CAD do componente, para posterior injeção de cera e consequente produção dos modelos da peça final. O molde pode ser produzido internamente por fabrico aditivo (prototipagem rápida SLA), ou por maquinagem de blocos metálicos de alumínio (trabalho subcontratado pela FERESPE). Os modelos em cera obtidos após a injeção são acoplados num cacho com o sistema de gitagem, os quais atingem, no máximo, dimensões de 400×400×250 mm devido às limitações dos equipamentos [2].

Aquando do término da montagem do cacho, inicia-se a produção da carapaça cerâmica através da sua imersão em barbotinas e materiais refratários distintos, que lhe conferirão resistência e integridade suficiente para resistir às elevadas pressões desenvolvidas no vazamento. Entre a deposição de cada camada é empregue, no mínimo, um tempo de secagem de 2 h. Para além disso, as carapaças também apresentam limitações em termos dimensionais: máximo de 500 mm em diâmetro e os 600 mm em altura. Ulteriormente, as carapaças são preparadas para a descerificação, após a estabilização do seu peso (método indireto de monitorização do grau de secagem). Geralmente, são realizados cortes e furação em zonas específicas da carapaça para permitir um escoamento rápido da cera aquando da descerificação, e permitir o rápido equilíbrio de pressões (internas e externas) na carapaça. O processo de remoção da cera e sinterização do refratário é realizado no interior de um forno elétrico de resistências, a 1000ºC durante 1,5 h. Após a descerificação, é realizado um controlo visual das carapaças cerâmicas para identificar potenciais fissuras, arrancamento de material ou outros defeitos [2].

No que concerne ao vazamento, a unidade de fundição por modelo de cera perdida vazado em carapaça cerâmica da FERESPE dispões de três fornos de indução de cadinho: dois com capacidade de 50 kg e um com 150 kg. De forma a atenuar os choques térmicos durante o vazamento, as carapaças são previamente aquecidas até um máximo de 1100ºC, atenuando assim os gradientes térmicos [2].

Numa fase final, os fundidos são submetidos a pós-processamento e acabamento que podem incluir etapas de desbaste tais como corte e lixagem, granalhagem, maquinagem, tratamento térmico e inspeção final. A FERESPE tem autonomia para realizar o processo de desbaste, granalhagem e tratamento térmico; porém, os tratamentos superficiais e acabamentos são, geralmente, subcontratados a parceiros da empresa [2].

3 Revisão Bibliográfica

3.1 Introdução ao *Investment Casting*

A fundição por modelo de cera perdida moldado em carapaça cerâmica, também conhecida como *Investment Casting (IC)* ou fundição de precisão, é um processo utilizado há milhares de anos. Inicialmente, esta técnica era mormente utilizada na produção de joalharia e peças de arte;

contudo, durante e após a II Guerra Mundial, devido à necessidade de fabrico de componentes com geometria complexa, o *IC* começa a apresentar uma elevada relevância em aplicações de engenharia e na indústria aeroespacial. Desde então, este processo de fundição tem sido introduzido numa ampla variedade de aplicações, nomeadamente na indústria aeronáutica, médica, em sistemas hidráulicos e pneumáticos, entre outros [3]–[6].

O *IC* consiste na fusão e vazamento de uma liga na cavidade de uma carapaça cerâmica, permitindo a obtenção de componentes de geometrias complexas, com secções de dimensões reduzidas (na ordem dos 0,5-1 mm), furos e secções roscadas, com elevada precisão dimensional e qualidade superficial. O elevado nível da qualidade de acabamento superficial dos fundidos possibilita a redução ou mesmo eliminação de algumas etapas finais de maquinagem e acabamento [5], [7]–[9]. Este processo pode ser empregue em situações cujo material utilizado é demasiadamente duro para ser posteriormente maquinado ou produzido de outra forma, quando é o único processo possível para a produção do componente, ou quando é mais económico do que qualquer outro processo para obtenção da peça com a qualidade exigida [9]. Além disso, não apresenta limitações a nível metalúrgico já que é aplicável a uma vasta gama de ligas ferrosas e não-ferrosas, e possibilita o processamento de ligas com elevado ponto de fusão [5], [8], [9].

Todavia, existem desvantagens concernentes a este processo de fundição, das quais se destacam o facto de ser um processo oneroso e laborioso uma vez que implica um elevado trabalho manual na preparação dos modelos em cera e da carapaça cerâmica, agravando os custos de processamento e fabrico, bem como o facto dos materiais utilizados para produzir a carapaça serem relativamente dispendiosos. Apresenta também limitações em termos das dimensões e peso dos fundidos e do custo associado aos equipamentos utilizados [5], [7], [8].

O *IC* compreende um conjunto de etapas (Figura 1) que devem ser controladas rigorosamente de forma a garantir a qualidade dos componentes produzidos [10].

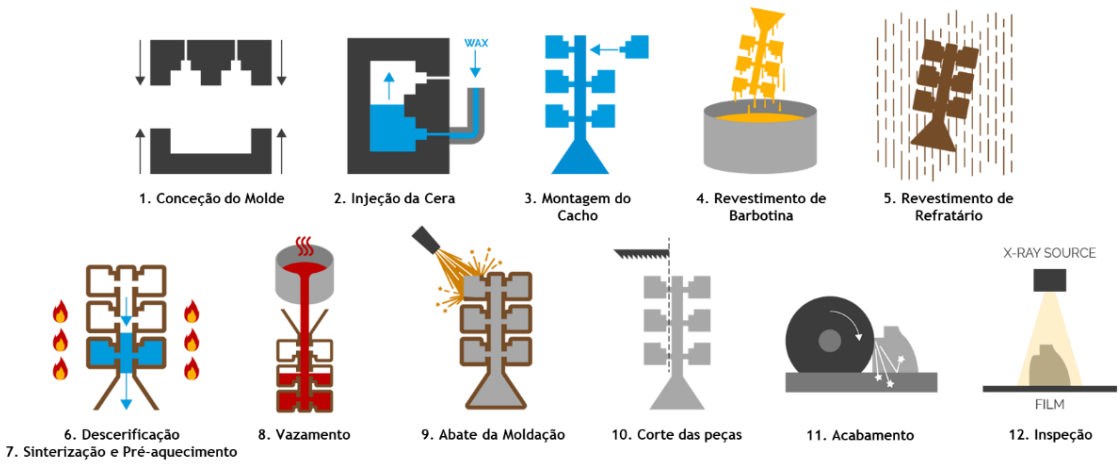


Figura 1: Esquema representativo das etapas do processo de *Investment Casting*. Adaptado de [10].

O processo inicia-se com a etapa de conceção de um molde metálico (1) com a forma do componente a produzir, considerando as tolerâncias dimensionais adequadas, e no qual será injetado o material, geralmente cera, que irá replicar essa mesma geometria (2). Posteriormente,

estes modelos em cera são acoplados a um sistema de gitagem (3), por processos de fusão e colagem localizados da cera, dando por sua vez origem a uma "árvore". O número de modelos e a sua dimensão é projetada, e as condições de vazamento são simuladas previamente ao início do processo, com o intuito de prevenir possíveis disparidades nos componentes finais [4]. Ainda antes da imersão do cacho nos banhos de barbotina, estes são previamente limpos, de forma a remover resíduos de cera, e submetidos a um ataque químico de desengorduramento e ativação da sua superfície que visa a melhoria da aderência do revestimento cerâmico ao modelo [7].

A "árvore" é, de seguida, imersa numa barbotina cerâmica (4), que consiste num fluido pastoso composto por partículas cerâmicas em suspensão e um ligante, e subsequentemente, pulverizada com areia de reforço (material refratário em leito fluidizado e/ou chuveiro) (5). A granulometria do material refratário varia desde partículas muito finas, nas camadas em contacto com o modelo, que promovem a réplica dos seus detalhes, até granulometrias mais grosseiras, nas camadas superiores que conferem resistência necessária para acomodar as tensões resultantes de gradientes térmicos durante o vazamento do metal líquido. De notar que, entre cada ciclo, as camadas da carapaça cerâmica são sujeitas a um período de secagem com o intuito de remover a água do seu interior, sendo assim necessário realizar este processo sob condições de temperatura e humidade controladas [4], [7], [8]. A descerificação (6) é a etapa seguinte, durante a qual se dá a remoção da cera do interior da cavidade moldante, assistindo-se à volatilização de alguns dos seus componentes por ação de calor. Este procedimento pode ser realizado por diferentes métodos a saber: choque térmico (*flash-fire*) e em autoclave; a descerificação em autoclave é a mais comumente utilizada [6]. O coeficiente de dilatação térmica das ceras é cerca de dez vezes superior ao da carapaça cerâmica. Deste modo, é necessário um controlo apertado desta etapa com o intuito de prevenir a ocorrência de fissuração da carapaça, ou mesmo a sua rotura. Para contornar este problema, são geralmente criadas condutas de drenagem que facilitam o escoamento do material do cacho [11]. A cera resultante é recolhida e reaproveitada. Na continuidade do processo de descerificação, promove-se a sinterização da carapaça cerâmica (7), a um patamar isotérmico e a uma temperatura ligeiramente superior, que possibilita a remoção de resíduos de cera, do excesso de água, bem como o aumento da sua resistência mecânica [4], [5].

Numa fase final, a carapaça é pré-aquecida a uma temperatura selecionada em função da liga a vazar, atenuando assim os choques térmicos, e posteriormente, o metal é vazado (8). Após solidificação e arrefecimento do metal, dá-se o abate das carapaças cerâmicas (9). Recorrendo a métodos de corte, obtêm-se as peças (10), que poderão vir a ser submetidas a processos de acabamento, caso necessário (11). Por fim, são efetuadas operações de inspeção e controlo dimensional (12) com o intuito de verificar se os componentes produzidos cumprem os requisitos exigidos [5], [8], [12].

3.2 Modelo em Cera

A conceção do modelo em cera dever ser realizada tendo por base, como supracitado, a geometria da peça final e as tolerâncias dimensionais associadas à sua própria contração volumétrica bem como à do metal durante a sua solidificação. De entre plasticizantes, ceras e materiais poliméricos, os modelos são preferencialmente produzidos em cera, dada a facilidade de alteração das suas propriedades pela incorporação de aditivos, nomeadamente plásticos, resinas, plasticizantes, antioxidantes e corantes [3], [5], [11].

Craig, *et al*. [13] estabeleceram como principais características dos modelos em cera o seu baixo coeficiente de dilatação térmica, resistência à fratura suficiente que evite danos durante o seu manuseamento, elevada qualidade superficial, baixa viscosidade, abrasividade e baixo ponto de fusão, facilitando a injeção, colagem e o processo de remoção da cera do interior das carapaças cerâmicas durante a etapa de descerificação. Os custos, a toxicidade e a facilidade de reciclagem das ceras são também fatores cruciais que devem ser tidos em consideração aquando da escolha da cera mais adequada para o fabrico do modelo [5].

Após a obtenção dos modelos em cera segue-se a sua montagem no gito, com auxílio de um ferro aquecido que promove a fusão das superfícies de contacto. A aplicação de ligeira pressão durante esta etapa, até à solidificação da cera, garante a devida montagem e colagem dos modelos. De notar que o sistema de gitagem, alimentação e ataques é geralmente produzido individualmente, e posteriormente emparelhado, dando origem ao cacho. Ulteriormente, realiza-se uma etapa de parafinagem, a qual consiste na imersão do cacho em parafina. Uma vez que este hidrocarboneto apresenta um ponto de fusão inferior ao da cera, a sua degradação precoce promove a criação de um espaço livre para que os componentes massivos possam expandir-se sem causar qualquer dano na carapaça cerâmica [3].

Os cuidados decorrentes deste processo focalizam-se no manuseamento dos modelos e na remoção de salpicos nas suas superfícies, na garantia de zonas de ligação resistentes, sem fissuras e com uma perfeita selagem [3], [14].

3.3 Carapaças Cerâmicas

As carapaças cerâmicas inerentes ao *IC* desempenham um papel preponderante na qualidade final dos fundidos. O seu fabrico consiste na aplicação sucessiva de um revestimento cerâmico constituído por uma camada de barbotina intercalada com uma camada de partículas de material refratário cerâmico. A granulometria destas mesmas partículas é crescente à medida que as camadas cerâmicas são aplicadas. Assim, e após o prévio desengorduramento e ativação da superfície da cera, é aplicada a primeira camada de barbotina, a qual é composta por ligantes e material cerâmico, podendo conter outros componentes, como antiespumantes, material de reforço e agentes molhantes. Todos estes aditivos visam a melhoria das propriedades inerentes à carapaça cerâmica. Durante cada imersão na barbotina, o cacho é rodado de modo a promover a

remoção de excedente e, deste modo, a obtenção de camadas uniformes [3], [7], [8].

A carapaça cerâmica utilizada em *IC* pode subdividir-se em quatro grupos distintos de camadas (Figura 2): primária, intermédia, de reforço, e finalmente, a selante. A camada primária, também denominada de *face-coat,* é responsável pela reprodução de todos os detalhes intrínsecos ao componente. Após a imersão da "árvore" na barbotina, esta é submersa num leito fluidizado ou pulverizada com finas partículas de material refratário. As camadas subsequentes (camadas de engrossamento - *backups*) incluem as camadas intermédias e as de reforço. As primeiras visam a colmatação de quaisquer falhas decorrentes das camadas precedentes, sendo elas constituídas por barbotina com composição semelhante à da primeira camada, enquanto, nas camadas de reforço, utilizam-se materiais diferentes com granulometria superior. Desta forma, é garantida a resistência e integridade necessária à carapaça cerâmica para as etapas seguintes. Entre cada uma das camadas, deverá ser promovida a sua secagem em ambiente controlado, *i.e.*, com humidade relativa e temperatura especificadas. Condições ambientais inadequadas podem conduzir à alteração das propriedades e características das carapaças cerâmicas e, consequentemente, comprometer a qualidade final dos fundidos, como será abordado mais adiante. A espessura final da carapaça cerâmica é variável (6-12 mm) de acordo com a peça que se pretende produzir e o respetivo material a vazar, o tipo de barbotina e respetivo pó cerâmico e a granulometria dos cerâmicos utilizados no seu fabrico. São preferíveis menores espessuras uma vez que favorecem uma maior permeabilidade da carapaça; no entanto, dever-se-á sempre garantir a sua integridade estrutural. A conclusão da produção da carapaça cerâmica dá-se com a aplicação de um banho selante, que consiste numa barbotina de reforço e que tem como objetivo a selagem da camada precedente. Aquando do término da produção da carapaça, esta é submetida a um ciclo de secagem, em atmosfera controlada [7], [8], [11].

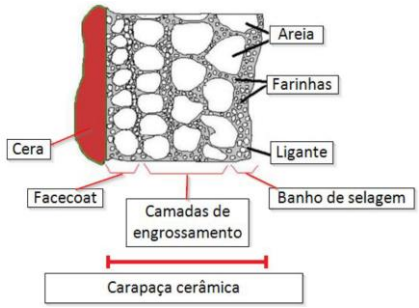


Figura 2: Secção transversal de uma carapaça cerâmica [8].

A falha da carapaça é perfeitamente inaceitável dada a perda de material que lhe está associada. Assim, a carapaça cerâmica em *IC* deverá satisfazer alguns requisitos, a saber: elevada resistência em verde, garantindo o manuseamento e descerificação sem falhas, e, após sinterização, suportar a pressão metalostática; elevada resistência a choques térmicos, salvaguardando a integridade da carapaça durante o vazamento; estabilidade química para evitar reações entre o banho metálico e o material refratário; permeabilidade suficiente para facilitar o escape de gases no vazamento, já que estes podem promover falhas de enchimento e defeitos

superficiais nas peças produzidas; condutividade térmica suficiente para assegurar uma transferência de calor adequada através das suas paredes e, assim, permitir o arrefecimento do metal; baixo coeficiente de dilatação térmica, prevenindo distorções geométricas; e facilidade de abate, proporcionando uma desmoldação e remoção dos fundidos mais eficaz [5].

3.3.1 Refratários

Os materiais mais utilizados na produção das carapaças cerâmicas são o zircão ($ZrSiO_4$), alumina (Al_2O_3), sílica (SiO_2) e aluminossilicatos. Além destes, no caso de ligas reativas, podem ainda ser usados materiais como a ítria (Y_2O_3), zircónia (ZrO_2) e grafite. De entre os materiais disponíveis, a escolha é feita com base no seu custo e desempenho. No que concerne à sua granulometria, esta varia entre 74 e 37 μm (200 - 400 *mesh*), na *face-coat*, e 125 e 44 μm (120-325 *mesh*) nas camadas subsequentes [3], [11], [15].

O zircão, juntamente com outros materiais como silicatos de alumínio e sílica, é o material tipicamente utilizado na camada primária, dada a sua refratariedade, estabilidade térmica e dimensional, inércia química relativamente à maior parte dos metais, e a forma esférica das partículas, que assegura uma boa réplica da superfície do modelo [3], [7], [16].

Relativamente à alumina, esta é geralmente usada no vazamento de superligas e caracteriza-se por ser mais refratária que a sílica e menos reativa às ligas vazadas [11], [16].

3.3.2 Ligantes

Os ligantes comummente utilizados no processo *IC* são, geralmente, siliciosos (sílica coloidal), silicato de etilo hidrolisado e silicato de sódio. São também usados ligantes híbridos, assim como ligantes à base de alumina e de zircónia [11].

A sílica coloidal consiste numa suspensão aquosa de partículas esféricas de sílica. É um excelente ligante para propósitos gerais, já que não liberta gases tóxicos e se afigura como bom ligante para a maioria das barbotinas; porém, apresenta como maior desvantagem o facto de lhe estar associado um elevado tempo de secagem [3], [11].

Numa outra perspetiva, o silicato de etilo hidrolisado, por ser um ligante à base de álcool, tem como maior vantagem o seu curto tempo de secagem relativamente à sílica coloidal. Não obstante, a utilização deste ligante tem vindo a decair dado os problemas ambientais a si associados [3].

O silicato de sódio (solução de carbonato e silicato de sódio em água) é também frequentemente utilizado devido à sua rápida secagem decorrente da desidratação causada pelo silicato e o carbonato de sódio. Apesar de ser dos ligantes mais baratos, a sua refratariedade é inferior, assim como a sua resistência durante a descerificação [3], [7], [11] .

3.3.3 Outros aditivos

Além dos constituintes supracitados, existem ainda outros que podem ser adicionados à barbotina visando a melhoria das suas propriedades, nomeadamente os agentes molhantes, que visam a melhoria da molhabilidade da barbotina aos modelos em cera, através da diminuição da

tensão superficial; os antiespumantes, que evitam a formação de espuma durante a agitação da barbotina, sendo utilizados em combinação com agentes molhantes (a fração mínima a ser adicionada ronda os 0,1% do peso da barbotina); e outros constituintes, como agentes de nucleação, ou refinadores de grão como aluminatos, silicatos e óxidos (em quantidades compreendidas entre 0,5 e 10% do peso da barbotina) para vazamento de superligas [3], [11].

3.3.4 Preparação da barbotina

A composição da barbotina varia de acordo com o tipo e fração de material refratário, a fração de ligante e a viscosidade pretendida. A barbotina apresenta geralmente a gama de composições patente na Tabela 1 [11].

Tabela 1: Composição típica da barbotina [11]

Material	**Fração (%)**
Parte sólida do ligante	5-10
Líquido (do ligante ou adicionado)	15-30
Pó refratário	60-80

Os métodos de controlo inerentes à produção da barbotina dependem do processo de fundição em si, refletindo, em parte, as suas especificações de acordo com a linha de produção. Ainda assim, prevalecem: o controlo da viscosidade, já que se afigura crucial na formação da camada primária e de reforço, e a determinação da fração de componentes da barbotina. A primeira é geralmente avaliada com auxílio de um copo de viscosidade Zahn, ou com um viscosímetro do tipo *Brookfield* [3], [11]. Além das propriedades mencionadas, podem ser avaliadas a temperatura, pH e densidade da barbotina. A análise da sua composição, nomeadamente em termos das frações de água, ligante e material refratário é mais morosa, sendo efetuada com menor frequência, e apenas com o intuito de determinar o fator determinante para a ocorrência de um determinado problema; porém, não é utilizado como método de controlo [11].

3.3.5 Fabrico da Carapaça Cerâmica e Secagem

Antes de iniciar o processo de produção da carapaça cerâmica, a "árvore" é mergulhada numa solução desengordurante que permite a eliminação de compostos decorrentes das etapas anteriores, como sujidade, gorduras, resíduos de resina e desmoldantes do processo de injeção. Após o seu desengorduramento, o cacho pode ainda ser submetido a uma etapa de limpeza para eliminar esta mesma solução. O fabrico das carapaças cerâmicas pode ser realizado manual ou mecanicamente, ou com apoio de equipamentos robotizados. Além disso, pode também ser realizado em vácuo, apesar de mais raramente, sendo que, neste caso, o processo é mais controlado, já que impede a formação de bolhas gasosas [7], [11].

Como previamente referido, após o desengorduramento, o cacho em cera é submerso na primeira barbotina, que apresenta maior viscosidade, e posteriormente mergulhado no seio de um

leito fluidizado de partículas cerâmicas. A barbotina das camadas intermédias tem menor viscosidade, e as partículas de material refratário granulometria mais elevada. Por sua vez, a barbotina associada às camadas de reforço é a que apresenta menor viscosidade, mas com material refratário de maiores dimensões. Entre cada uma das camadas depositadas, a "árvore" é submetida a um processo de secagem, que deve ser controlado de forma a reduzir o teor de água aos valores mínimos necessários para que não ocorram defeitos nas peças produzidas [3], [11].

O processo de secagem pode ser bastante complexo devido à diferença entre os coeficientes de dilatação térmica da cera e dos materiais cerâmicos. Se for demasiado rápido, o efeito de arrefecimento provoca a contração do modelo enquanto o revestimento está húmido, conduzindo à falha de aderência entre ambos. Por outro lado, se houver expansão da cera, em simultâneo com o decréscimo da taxa de secagem da carapaça e a recuperação da sua temperatura à medida que ganha resistência, pode ocorrer a sua fissuração. Deste modo, foi convencionado que a humidade relativa ideal deveria rondar os 50% [3].

3.4 Secagem de Cerâmicos

Com exceção de algumas metodologias, o fabrico de produtos cerâmicos, tradicionais ou técnicos, requer a moldagem da forma básica do corpo com uma pasta ou suspensão sólida/líquida, pelo que é necessária a remoção do excesso de água do interior do corpo para obter produtos suficientemente rígidos para a posterior "queima" a temperatura elevada. Apesar de poderem ser usadas várias técnicas para a remoção de água do interior do corpo cerâmico, o presente subcapítulo enfoca a sua remoção por convecção [17].

Considerando um corpo constituído unicamente por água, e exposto ao ar, a taxa de evaporação estará dependente da humidade relativa (RH) e da temperatura do ar (T). A humidade relativa pode ser determinada a partir da equação:

$$RH\ (\%) = 100 \times \frac{p_v}{p_s} \tag{1}$$

onde p_v corresponde à pressão de vapor da água, para uma dada temperatura, e p_s à pressão parcial de saturação do vapor de água para a mesma temperatura. Esta pressão de saturação está relacionada com a temperatura do meio através da expressão:

$$p_s(T) = 1333{,}322e^{\left(46.784 - \frac{6435}{T} - 3{,}868\ln(T)\right)} \tag{2}$$

Se a humidade relativa for de 100%, o ar está saturado em vapor de água, *i.e.*, o ar está em equilíbrio com a fase líquida e, portanto, não ocorre evaporação. Para humidades relativas inferiores a 100%, verifica-se a vaporização da água para a atmosfera envolvente [17].

Uma forma para determinar indiretamente a humidade relativa do meio ambiente assenta na medição da temperatura do ar (T_{ar}) e do bolbo húmido (T_w). O primeiro sensor mede a temperatura ambiente e o segundo, envolvido por um tecido saturado em água destilada, a temperatura do bolbo húmido (Figura 3). A passagem de ar forçado neste último promove a evaporação e a

diminuição da temperatura de acordo com a pressão de vapor do meio. Através da diferença entre temperaturas, determina-se a humidade relativa a partir da Equação 3 [17]. Para além disso, é assim possível correlacionar RH com a temperatura e determinar a humidade absoluta (AH) do meio [18]. A Figura 4 (A) ilustra a correlação entre a temperatura, e a humidade relativa e absoluta.

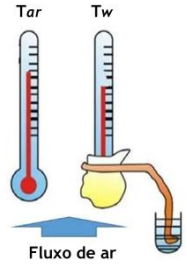


Figura 3: Representação esquemática dos sensores para determinação da temperatura do bolbo seco e do bolbo húmido. Adaptado de [18].

$$RH = 10^{-\left(23{,}5518+\left[\frac{-2937{,}4}{T_{ar}}\right]\right)}(T_{ar})^{4{,}9283}\left[10^{\left(23{,}5518+\left[\frac{-2937{,}4}{T_{ar}}\right]\right)}(T_w)^{-4{,}9283} - (6{,}6\times10^{-4} + 7{,}57\times10^{-7}T_w)p(T_{ar}-T_w)\right] \quad (3)$$

Num material poroso, em que as porosidades se encontram preenchidas por água, ocorrem dois mecanismos de transferência durante o processo de secagem: a de calor do meio circundante para o interior do material húmido, e a de massa do material para a sua superfície, e ulteriormente, para o meio envolvente, como esquematizado na Figura 4 (B) [17].

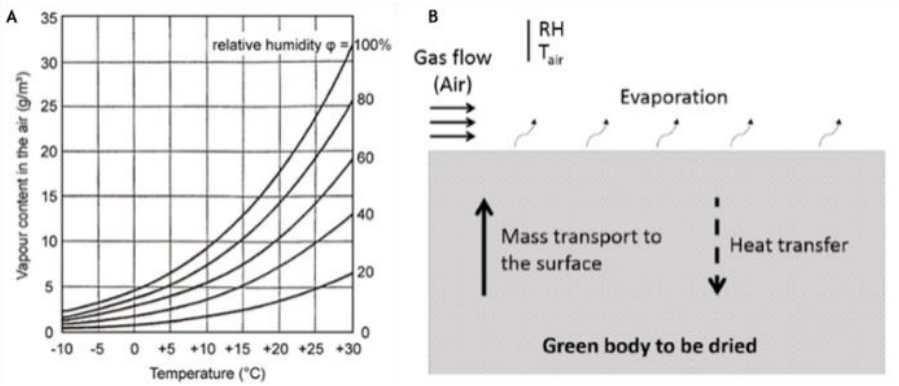


Figura 4: A - Correlação entre a temperatura, humidade relativa e humidade absoluta para o processo de secagem de materiais porosos [18]; B – Representação esquemática dos fluxos de massa e calor num corpo poroso [17].

De seguida são abordados de forma mais pormenorizada os mecanismos e etapas concernentes ao processo de secagem em meio poroso.

3.4.1 Processo de secagem em meio poroso

Os materiais submetidos a processos de secagem podem ser classificados em materiais higroscópicos e não-higroscópicos. Para materiais porosos não-higroscópicos, no interior dos poros existe água livre ou água não ligada, que se vaporiza com relativa facilidade; contudo, para as capilaridades de menores dimensão, a vaporização é dificultada. A quantidade de água remanescente é denominada por teor máximo de água adsorvida ou teor de água irredutível. Os materiais porosos higroscópicos, nos quais se incluem as carapaças cerâmicas, são constituídos por

células, sendo os espaços intercelulares interconectados e preenchidos por ar e uma determinada quantidade de água livre. O interior das células pode conter água ligada, que corresponde a moléculas de água adsorvidas à superfície das paredes dos poros, as quais se comportam como uma membrana semipermeável que atua como um caminho capilar para a migração da água ligada [19], [20].

Na secagem de um material cerâmico poroso, a remoção de humidade, e consequente perda de massa associada à extração de água em função do tempo (Figura 5 (A)), pode induzir contração, fissuração e empeno do material, e, consequentemente, a rotura da estrutura. Geralmente, as tensões geradas tendem a ser superiores junto à superfície (uma vez que a superfície exterior contrai mais rapidamente do que a interior), conduzindo à retração diferencial do sólido e, consequentemente, à fissuração da estrutura [17], [20].

Deste modo, é crucial compreender as diferentes etapas do processo de secagem de um corpo cerâmico em verde e o comportamento inerente a estes estádios, para condições de temperatura, humidade relativa e circulação de ar constantes.

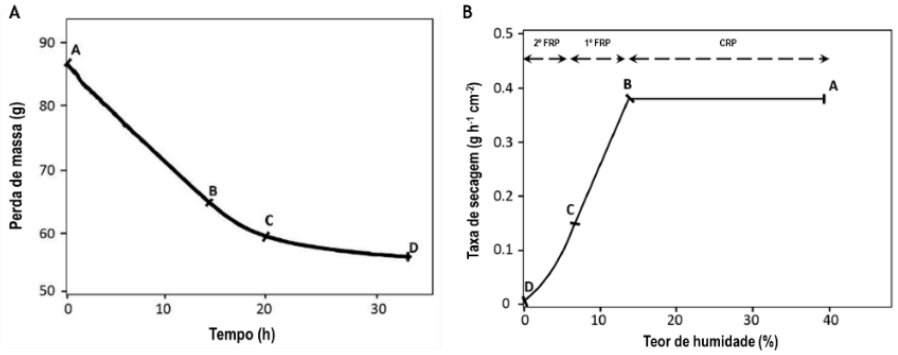


Figura 5: A - Perda de massa em função do tempo de secagem; B - Variação da taxa de secagem em função do teor de humidade para os diferentes estádios. Adaptado de [17].

As etapas do processo de secagem são facilmente identificáveis na Figura 5 (B), a qual representa a taxa de secagem, relativa à curva apresentada na Figura 5 (A), em função do teor de humidade. O primeiro período denomina-se de período de taxa constante (*Constant Rate Period - CPR*) uma vez que o declive da curva de perda de massa é constante (entre os pontos A e B da Figura 5 (A)), e, por sua vez, o teor de humidade diminui linearmente no início do processo de secagem. Posteriormente, para um determinado nível de humidade, a taxa de secagem decresce, entrando o corpo no período de abaixamento da taxa (*Falling Rate Period - FRP*). Na maioria dos casos, dependendo do material e das condições de secagem, o período de decréscimo da taxa pode subdividir-se em dois estádios. O primeiro período (*1º FRP*) evidencia a proporcionalidade entre a taxa de secagem e o teor de humidade (curva compreendida entre os pontos B e C da Figura 5 (B)). O segundo período (*2º FRP*) corresponde à remoção dos últimos vestígios de humidade do corpo. Neste ponto, a taxa de secagem não é linearmente dependente do teor de humidade (curva compreendida entre os pontos C e D da Figura 5 (B)) [17], [20], [21].

A Figura 6 esquematiza a distribuição de água num corpo poroso ao longo dos diferentes

estádios. De seguida, é feita uma abordagem mais detalhada do que acontece em cada uma das etapas anteriormente mencionadas [17].

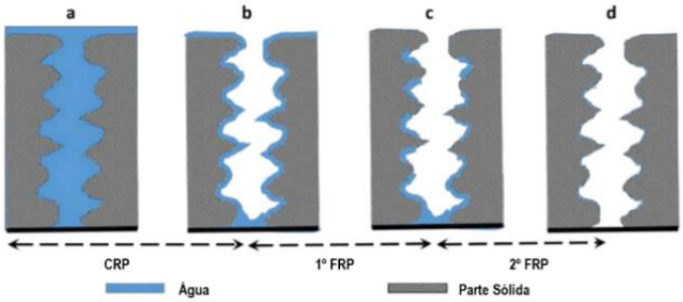


Figura 6: Representação esquemática dos estádios do processo de secagem em meio poroso. Adaptado de [17].

Durante o período de secagem a taxa constante, a superfície do material está revestida por um filme de água cuja evaporação ocorre à superfície do corpo (Figura 6 (a)). Assim, a taxa de secagem deverá ser independente do tipo de material e do teor inicial de água. No caso da secagem por convecção, a temperatura da superfície do corpo deve ser estritamente a do bolbo húmido do ar, que é inferior à da atmosfera envolvente. Esta diferença de temperatura está relacionada com a taxa de evaporação. À medida que ocorre a evaporação à superfície, as forças capilares asseguram um fluxo de água do interior para a superfície, estabelecendo-se assim um equilíbrio entre este e a evaporação contínua e regular da água livre à superfície. Desta forma, o filme líquido que reveste as partículas diminui em espessura e as partículas aproximam-se. Assim, a evaporação da água é acompanhada por uma diminuição significativa do volume do corpo. A Figura 7 ilustra um sistema simplificado da interação de um corpo em verde e a água durante o primeiro período de secagem. É mais provável que a fissuração da barbotina e rotura da sua rede porosa ocorram no final deste período, ou seja, no ponto crítico em que termina a contração (limite máximo de contração do sistema) [17], [19]–[21].

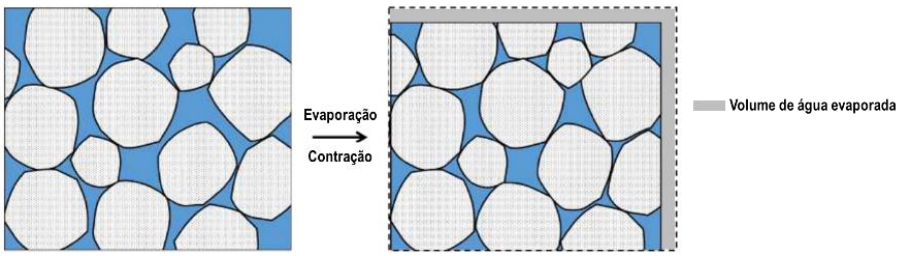


Figura 7: Representação esquemática do sistema partículas-água durante a contração. Adaptado de [17].

Aquando da diminuição do coeficiente de transferência de massa, com a diminuição do teor de água livre à superfície, inicia-se o primeiro período de decréscimo da taxa de secagem (*1º FRP*). Nesta primeira etapa, é atingido um novo equilíbrio de forças à superfície, acompanhado de uma subida lenta da temperatura. Este período é caracterizado por uma proporcionalidade entre a taxa de evaporação e o tempo de secagem (curva compreendida entre os pontos B e C da Figura 5 (B)). Neste ponto, terá terminado a contração do material; porém, ainda há uma parte da evaporação que ocorre à superfície, apesar de não se comportar mais como uma superfície de água livre. A partir daqui, e até ao fim da secagem, os locais inicialmente preenchidos por água passam a ser

ocupados por ar (Figura 6 (b)). Consequentemente, além da que ocorre à superfície, a água evapora-se no interior de poros insaturados e o vapor é transportado por difusão. Em alguns casos, desenvolve-se uma interface líquido/vapor, com um forte gradiente do teor de humidade, que separa as zonas húmidas das zonas secas, e que vai avançando para o interior do material à medida que a secagem progride (Figura 8) [17], [19], [20].

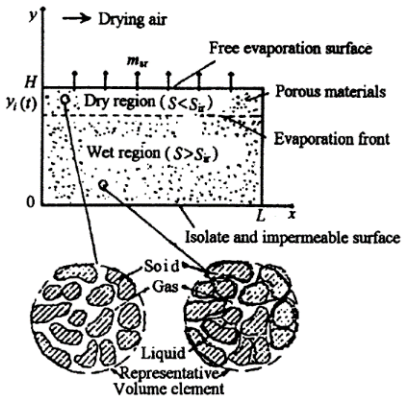


Figura 8: Modelo do processo de secagem em meios porosos [20].

O segundo período de decréscimo da taxa de secagem é caracterizado pela inexistência de uma correlação linear entre essa taxa e o teor de humidade (Figura 6 (B)), e pelo aumento rápido da temperatura superficial do corpo. A fase líquida passa a ser descontínua, e, assim, a água residual evapora-se a partir de locais de maior profundidade no corpo poroso, de modo que é transportada para a superfície apenas por difusão. Como a quantidade de água que se evapora à superfície diminui rapidamente, a temperatura aumenta muito mais celeremente do que no primeiro período de queda da taxa de secagem [17], [19].

3.5 Métodos de Controlo de Secagem

Na indústria cerâmica têm sido desenvolvidas várias técnicas que visam a determinação do teor de humidade de uma amostra e que se baseiam nas alterações de massa, volume, condutividade térmica e elétrica, densidade, índice de refração, pressão de vapor, entre outras. Em *IC*, o método ideal para a determinação da humidade da carapaça cerâmica será o que permite aceder às zonas mais inacessíveis da carapaça cerâmica, fornecer o nível de secagem da carapaça e que poderá ser diretamente ou indiretamente correlacionado com as propriedades da carapaça [22], [23].

3.5.1 Perda de Massa

A determinação da perda de massa de água em função do tempo é um dos métodos de monitorização do progresso da secagem, como discutido no subcapítulo 3.4.1. A partir da curva representativa da perda de massa em função do tempo é possível determinar a taxa de secagem. Esta técnica pode ser eficaz quando as carapaças secam uniformemente; porém, tal não se verifica na maioria dos casos. Através desta metodologia, uma vez conhecido o teor de água da barbotina, será possível avaliar o teor de água da carapaça ao longo do processo de secagem [22].

3.5.2 *Temperatura*

A análise da variação da temperatura das carapaças cerâmicas é outro método utilizado para a avaliar a progressão da sua secagem. Esta técnica baseia-se no arrefecimento da carapaça promovido pela evaporação da água. Como anteriormente referido, durante as fases primárias da secagem, existe água à superfície, e a sua evaporação promove o abaixamento da temperatura da carapaça para valores próximos da do bolbo húmido. À medida que a secagem progride e o volume de água diminui, a velocidade de transferência de água para a superfície condiciona a evaporação neste local pelo que a temperatura sobe ligeiramente. Quando a temperatura da carapaça é próxima à do ar, significa que a quantidade de água na carapaça é residual [22].

O grau de secagem é determinado pela temperatura de recuperação (*Recovery Temperature - RT*), ou seja, pela diferença entre a temperatura da carapaça cerâmica e a temperatura do meio envolvente (Figura 9). Uma carapaça com uma *RT* de 1ºC apresentará menos água do que uma carapaça com uma *RT* de 6ºC. De notar que a temperatura de recuperação é dependente das condições de secagem (temperatura e RH) [22]. M. Koralnik [24] estabelece que uma temperatura de recuperação de 0,5ºC seria indicativa de que a carapaça cerâmica estaria seca.

A monitorização da temperatura das carapaças cerâmicas pode ser efetuada por diferentes metodologias, nomeadamente, pela utilização de um termopar acoplado à carapaça, um pirómetro de infravermelhos, ou por termografia [22]. Por ter sido o método implementado para este trabalho, apenas o último será abordado na revisão bibliográfica.

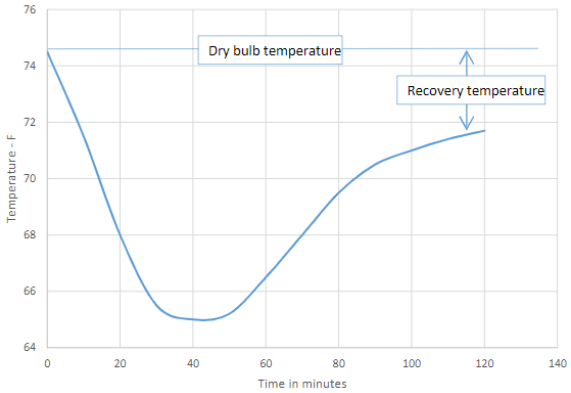


Figura 9: Curva da variação da temperatura da carapaça cerâmica ao longo da sua secagem [22].

3.5.2.1 *Avaliação da temperatura por imagem térmica*

A termografia é uma técnica avançada que se baseia no processo físico de deteção de um comprimento de onda, permitindo a determinação, sem contacto, da temperatura de um dado sistema. Esta técnica utiliza a radiação infravermelha, um tipo de onda eletromagnética com comprimento de onda superior ao da onda da luz visível. Uma vez que o olho humano não é capaz de detetar a radiação infravermelha, são geralmente utilizadas câmaras termográficas para esse efeito [25], [26]. Estes equipamentos detetam a radiação na gama dos infravermelhos do espetro eletromagnético (aproximadamente 9-14 μm) e geram imagens dessa mesma radiação, os termogramas [27]. Tendo em consideração que a radiação infravermelha é emitida por todos os

corpos com temperatura superior ao zero absoluto, a termografia permite avaliar a temperatura de um corpo, com ou sem iluminação. Quanto maior a temperatura superficial, maior será a energia da radiação emitida [27], [28].

A lei de Stefan-Boltzmann (Equação 4) correlaciona a temperatura superficial (*T*) e o fluxo de radiação emitido pelo objeto (*E*) com base numa constante σ (constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 6{,}67 \times 10^{-8}\, Wm^{-2}K^{-4}$), e no coeficiente de emissividade do material em causa. Esta lei é estabelecida para corpos negros perfeitos, *i.e.*, corpos capazes de absorver toda a radiação incidente, independentemente da sua direção e do comprimento de onda. Todavia, nos corpos reais, nem toda a radiação incidente é absorvida [26], [28].

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \, (W/m^2) \tag{4}$$

A emissividade é uma propriedade cujo valor é influenciado por diversos fatores, nomeadamente: orientação do corpo e a qualidade da superfície, temperatura, comprimento de onda da radiação e o material [26], [28]. Os materiais cerâmicos apresentam, geralmente, emissividades na gama 0,85-0,95, e o material refratário utilizado tipicamente na produção das carapaças cerâmicas, o zircão, tem uma emissividade que varia entre 0,80 e 0,92 [24], [26], [29].

Para além das variáveis que influenciam a emissividade de um corpo, os resultados obtidos por esta técnica dependem também de diversos fatores tais como: a emissividade da superfície; refletividade, resultante da reflexão da radiação dos objetos mais próximos; a atenuação promovida pelo meio ambiente, resultante da absorção de radiação pelos elementos difundidos para a atmosfera (gás e partículas); e o ângulo de observação [26], [28].

3.5.3 Condutividade/Resistência Elétrica

A medição da condutividade elétrica ou da resistência elétrica (R) constitui igualmente um método de controlo de secagem de materiais. O princípio desta técnica baseia-se na interdependência entre a resistência elétrica e o teor de água de um dado material.

Os equipamentos utilizados nesta técnica operam com base na condutância, medindo a condutância iónica entre dois elétrodos, sob uma dada tensão, usualmente contínua (DC). Um dos elétrodos desempenha o papel de gerador de corrente elétrica, enquanto o outro atua como recetor, sendo registada a variação da resistência elétrica promovida pelo fluxo de corrente. Assim, à medida que aumenta o teor de água do corpo, a sua resistência elétrica diminui, ou seja, aumenta a condutividade elétrica. De notar que não se regista uma correlação linear entre o teor de água e a resistência elétrica ao longo da secagem de um corpo [22], [30].

Os materiais cerâmicos secos são maus condutores de eletricidade enquanto, por outro lado, quando húmidos, verifica-se exatamente o oposto. Deste modo, através da análise contínua da condutividade elétrica ao longo do tempo, é possível identificar o momento a partir do qual a carapaça estará seca (Figura 10), ou seja, o instante a partir do qual a curva representativa da variação da condutividade elétrica em função do tempo se apresenta mais estável [22].

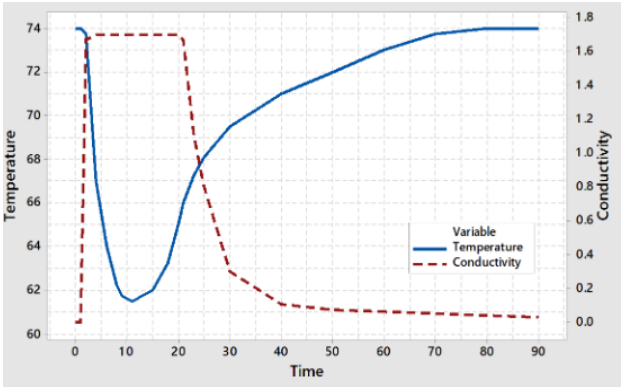


Figura 10: Representação esquemática da variação da temperatura e da condutividade elétrica em função do tempo de secagem de um cerâmico [22].

3.5.4 Capacitância

A medição da capacitância é um método expedito, e não destrutivo, utilizado na avaliação do teor de humidade de um dado material [31]. A sua medição é feita de forma indireta já que representa a constante dielétrica e o fator de potência dos materiais, quando lhes é aplicada uma tensão durante um determinado período. Uma mistura de água/material, quando submetida a um campo elétrico externo, terá uma força de resposta dielétrica, que traduz a permissividade dielétrica desse material. Esta constante estabelece a diferença entre as capacitâncias de um condensador cujo núcleo é preenchido ou pelo material em avaliação, ou apenas por ar [30]. Assim, a capacitância avalia a quantidade de energia armazenada por um condensador cujo núcleo é constituído pelo material cerâmico, pelo que, sendo proporcional à constante dielétrica do meio dielétrico, permite avaliar o teor de humidade do material em causa.

A capacitância (C, em F) depende da área (A, em m^2) do meio e da distância entre elétrodos (d, em m), bem como da permissividade dielétrica (ε - permissividade do meio; ε_v - permissividade em vácuo), sendo expressa pela equação [30], [32]:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_v A}{d} \tag{5}$$

3.5.5 Indicadores de Secagem

Os indicadores de secagem, também designados de aditivos sensíveis à humidade, têm sido utilizados em *IC* há já vários anos. Estes compostos apresentam como principal objetivo fornecer indicação visual do progresso da secagem da carapaça cerâmica, por mudança da sua cor, permitindo o acompanhamento, em tempo real, da evolução do teor de água do sistema [33].

Os indicadores de secagem adicionados à barbotina contêm, tipicamente, produtos químicos que mudam de cor na presença de água. Após a imersão da carapaça, o indicador apresenta uma coloração específica que se vai alterando gradualmente para uma cor diferente à medida que a carapaça seca. A cor final ou a intensidade da mudança de cor serve como indicador do nível de secagem. Assim, pela monitorização da mudança de tonalidade do indicador, é possível promover a melhoria do processo e minimizar a ocorrência de defeitos [33], [34].

Salienta-se que estes compostos, misturados na barbotina, deverão ser compatíveis com os

materiais nela presentes sem impactar negativamente as suas propriedades reológicas, características relevantes, ou a qualidade do produto final fundido [35].

3.6 Descerificação e Sinterização

A etapa de descerificação é a que submete a carapaça cerâmica a uma maior concentração de tensões visto que o coeficiente de dilatação das ceras é muito superior ao do material refratário das carapaças. Quando a carapaça é aquecida para promover a remoção da cera dos cachos, este diferencial de expansão origina elevadas tensões que induzem a fissuração, ou mesmo a rotura, da carapaça cerâmica. Na prática, este problema pode ser contornado pelo aquecimento da carapaça, de forma rápida, e do seu exterior para o interior, permitindo que ocorra uma fusão incipiente da cera à superfície dos modelos, que prossegue posteriormente para o interior. A camada de cera fundida ou flui para a superfície externa da carapaça ou embebe a superfície interior, proporcionando o espaço necessário para acomodar a expansão à medida que a restante cera se funde. Mesmo assim, a carapaça cerâmica está sujeita a elevadas tensões, pelo que esta deverá apresentar elevada resistência.

A descerificação pode processar-se por dois métodos distintos: em autoclave e por *flash-fire*, sendo o primeiro o mais utilizado. Nos casos em que os modelos de cera apresentam massividades muito elevadas, podem ser abertos respiros nos locais críticos da carapaça cerâmica de forma a que a remoção da cera seja o mais uniforme possível e não haja risco de fissuração ou fratura da carapaça cerâmica [3], [5], [11].

Após a descerificação, as carapaças são submetidas a um ciclo térmico de sinterização que visa a melhoria da coesão e aderência dos grãos de cerâmica, a remoção da humidade e de voláteis excedentes. Quando a descerificação é realizada pelo processo *flash-fire*, a sinterização ocorre em simultâneo já que as temperaturas são semelhantes (900-1100ºC). Por sua vez, na descerificação em autoclave, a descerificação e sinterização constituem etapas distintas [5], [11].

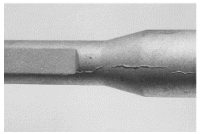
Para atenuar os gradientes térmicos associados ao vazamento do metal líquido na cavidade moldante, a carapaça é sujeita a um pré-aquecimento. A temperatura deste processo varia em função da liga a ser vazada [3].

3.7 Defeitos em *Investment Casting*

Na fundição por modelo de cera perdida vazado em carapaça cerâmica, há uma variedade de defeitos decorrentes do processo e que podem comprometer a geometria/dimensões e as características mecânicas dos fundidos, e, consequentemente, promover a sua rejeição. Assim, é de capital importância compreender as causas que lhes estão subjacentes e identificar estratégias para a sua prevenção [7], [36].

Em seguida, são abordados os principais defeitos identificados pela FERESPE no processo produtivo de *IC* e com origem nas etapas de secagem e produção da carapaça cerâmica.

Tabela 2: Defeitos associados ao processo *IC* [7], [36]

Defeito	Descrição	Causas	Possíveis correções
Buckle 	Protuberância, de forma piramidal, na superfície do fundido. A primeira camada escama em virtude da baixa força de ligação da 1ª camada ao modelo em cera, devido a uma série de causas, incluindo tensões nessa camada uma vez que esta contrai durante a secagem. Ocorre, geralmente, em superfícies planas.	➢ Falta de limpeza do modelo de cera. ➢ Elevadas amplitudes térmicas. ➢ Tempo de secagem demasiado longo/curto. ➢ Secagem excessivamente rápida. ➢ Baixa molhabilidade da primeira barbotina. ➢ Quantidade insuficiente de material refratário nas superfícies internas.	✓ Aumentar o nível de limpeza ou aumentar o tempo de ataque da superfície. ✓ Reduzir amplitudes térmicas na sala de produção das carapaças. ✓ Definir o tempo máximo de secagem entre camadas. ✓ Abrandar a taxa de secagem pela redução do fluxo de ar, ou aumentar o nível de humidade ambiente.
Bulge 	Deformação permanente da parede da carapaça, por empolamento, sem fissuração, da 1ª camada cerâmica. Espessamento gradual da parede do fundido. Poderá apresentar rebarba na zona do defeito. Pode não ser percetível a olho nu. Acontece comummente em superfícies largas e planas, sem relevos significativos, buracos profundos ou ranhuras.	➢ Carapaça cerâmica demasiado fina. ➢ Reduzida resistência a quente da carapaça cerâmica (a carapaça "cede" durante o arrefecimento do metal). ➢ Material refratário não penetra na zona. ➢ Remoção de parte da barbotina aquando da deposição da camada subsequente. ➢ Resistência da carapaça em verde insuficiente para conseguir suportar as tensões associadas à descerificação.	✓ Aplicar camadas adicionais de cerâmicos. ✓ Aumentar a refratariedade da carapaça; garantir uniformidade da espessura da carapaça. ✓ Assegurar o tempo e as condições de secagem adequadas entre camadas nas reentrâncias dos modelos. ✓ Alargar o tempo de secagem entre camadas; aumentar o tempo de secagem final; rearranjo dos modelos no cacho de forma a assegurar um fluxo de ar semelhante em todas as zonas do cacho; controlo do processo de descerificação.
Delaminação 	Superfície facetada de metal, por vezes acompanhada de uma crosta metálica. Ocorre devido à falta de ligação entre a 1ª e a 2ª camada da carapaça. A 1ª camada é empurrada para o interior da carapaça cerâmica durante a descerificação. Por vezes, a *face-coat* fissura e o metal preenche o espaço entre as camadas, originando uma crosta. Aparece em superfícies planas sem características particulares.	➢ Molhagem incompleta ou reduzida ligação entre a 1ª e a 2ª camada; ➢ Taxa de secagem da 2ª camada muito elevada. ➢ Retenção de humidade em excesso na 1ª camada.	✓ Garantir que o tempo de imersão na 2ª barbotina é adequado para molhar a 1ª camada. ✓ Aumentar a humidade ambiente. ✓ Assegurar uma secagem adequada antes da descerificação.
Rebarba 	O metal líquido preenche uma fissura decorrente da produção da carapaça, secagem ou descerificação. Ocorre tipicamente em superfícies planas sem detalhes, arestas ou peças cilíndricas.	➢ Baixa resistência da carapaça cerâmica. ➢ Secagem incompleta da carapaça cerâmica. ➢ Elevadas flutuações da temperatura do meio ambiente durante a secagem. ➢ A cera do cacho não escapa através da carapaça durante a descerificação.	✓ Aplicar uma camada adicional na carapaça; aumentar a fração de SiO_2 da barbotina. ✓ Aumentar o tempo de secagem. ✓ Manter amplitude térmica máxima de 3ºC. ✓ Alterar a cera utilizada no fabrico dos modelos ou aumentar a permeabilidade da carapaça cerâmica.

3.8 Avaliação da resistência mecânica e inspeção visual

O processo de secagem das carapaças cerâmicas no processo *IC* influencia a qualidade dos fundidos já que tempos de secagem desregulados induzem diferentes defeitos. Assim, é fulcral perceber o impacto que a secagem das carapaças cerâmicas tem na sua resistência, e por sua vez, na qualidade final dos fundidos.

3.8.1 Resistência Mecânica

A resistência à fratura das carapaças cerâmicas é geralmente avaliada a partir de ensaios de flexão que permitem a determinação do seu Módulo de Rotura (MOR). Dentre os ensaios de flexão, podem distinguir-se os Ensaios de Flexão em 3 pontos (EF3) (Figura 11 (A)), e em 4 pontos (EF4) (Figura 11 (B)), nos quais são utilizados provetes cerâmicos com dimensões pré-definidas [37], [38].

Em EF3, o provete é posicionado entre dois apoios equidistantes do seu centro, onde é aplicada a carga. A zona do provete que é submetida a uma maior tensão, e onde será mais provável a ocorrência da rotura, é a diametralmente oposta à da aplicação da carga. No caso do EF4, o provete é também suportado por dois apoios equidistantes; todavia, a carga é aplicada em dois pontos, ao invés de um só, distanciados igualmente do centro do corpo de prova. O EF4 acaba por ser mais representativo do que ocorre na realidade pelo facto da aplicação de carga no provete abranger uma maior área [38], [39].

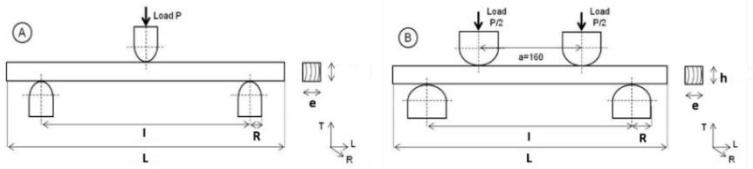


Figura 11: Representação esquemática de: A - Ensaio de Flexão em 3 pontos (EF3); B - Ensaio de Flexão em 4 pontos (EF4) [33].

No que concerne ao Módulo de Rotura, este pode ser calculado a partir da Equação 6, para EF3, e, por sua vez, pela Equação 7, para EF4 [38]:

$$MOR_3 = \frac{3 \times F \times L}{2 \times e \times h^2} \tag{6}$$

$$MOR_4 = \frac{3 \times F \times (L - a)}{2 \times e \times h^2} \tag{7}$$

em que F representa a carga máxima aplicada (em N), L e a as distâncias entre apoios e entre os pontos de aplicação da carga (em m), respetivamente, e a largura do provete (em m) e h a sua espessura, igualmente em m. Pelo facto de os resultados obtidos serem consideravelmente diferentes, estes não são comparáveis.

3.8.2 Inspeção Final

Após as operações de abate, corte do gito e granalhagem, todas as peças devem ser controladas visualmente a 100%, assegurando, deste modo, a sua conformidade às especificações do cliente.

Em *IC*, a inspeção final é mais apertada uma vez que as peças produzidas por este processo apresentam maior precisão dimensional e geométrica. Em complemento à inspeção final dos fundidos, segue-se a realização de ensaios não destrutivos de análise superficial (ensaios de líquidos penetrantes e partículas magnéticas) e de análise volumétrica (raios-X), permitindo avaliar a presença de porosidades, fissuras e descontinuidades de material [7].

4 Trabalho Experimental

4.1 Materiais Utilizados

A produção de peças por *IC* implica a utilização de uma panóplia de materiais, desde os diversos tipos de ceras para a produção dos modelos, até à ampla gama de materiais refratários usados na produção das carapaças cerâmicas.

4.1.1 Ceras

A montagem dos cachos implica a aplicação de diferentes tipos de cera, de acordo com as especificações de cada peça. A FERESPE utiliza dois tipos de cera virgem para o fabrico dos modelos: a vermelha e a verde. A primeira apresenta-se como uma cera de elevada qualidade e com baixo coeficiente de contração térmica, tipicamente empregue para peças de maior dimensão, com maior heterogeneidade em termos de massividade e com tolerâncias mais apertadas, contrariamente à cera verde (coeficiente de contração térmica mais elevado). Para os sistemas de gitagem é utilizada cera castanha ou cera reciclada, que tem elevado coeficiente de contração térmica. Por sua vez, a cera cola destina-se à colagem dos modelos de cera ao gito, enquanto a cera parafina, com baixo ponto de fusão, serve de revestimento ao sistema de gitagem e alimentadores. Para a reprodução de ocos nos modelos em cera, são colocados, previamente nos moldes, machos produzidos em cera solúvel.

4.1.2 Carapaças cerâmicas

A FERESPE recorre a três barbotinas e três areias refratárias para o fabrico das carapaças cerâmicas. As barbotinas são preparadas a partir de uma mistura constituída por farinha refratária, água, ligante (solução aquosa de sílica coloidal com cerca de 10% de látex e 57,7% de água), um agente molhante e, ainda, um antiespumante. A Tabela 3 apresenta as frações dos diferentes componentes das barbotinas.

Tabela 3: Componentes das barbotinas e respetivas frações mássicas (%)

	Ligante	Água	Molhante	Antiespumante	Farinha	Total de Água [1]
B1	20,50	1,9	0,05	0,05	77,50	13,70
B2	20,80	11,4	0,00	0,00	67,80	23,40
B3	22,50	9,5	0,00	0,10	67,90	22,50

[1] Somatório do teor de água de cada um dos componentes de cada barbotina

A farinha que compõe a barbotina 1 (B1) e a barbotina 2 (B2) é uma farinha de zircão com granulometria de cerca de 200 *mesh* (F1). Por sua vez, a barbotina 3 (B3) é composta por uma

farinha de sílica fundida de igual granulometria às precedentes (F2). A composição química de cada uma das farinhas refratárias é apresentada na Tabela 4. De notar que a barbotina B1, preparada para uma viscosidade (determinada com um copo de Zahn de tamanho 4) compreendida entre 14 e 16 s, é aplicada apenas na 1ª camada. A barbotina B2 é utilizada na 2ª e 3ª camadas e apresenta uma viscosidade entre 7 e 10 s. Finalmente, a B3 é empregue nas camadas de reforço, com uma viscosidade que pode variar entre 11 e 14 s.

No que concerne às areias de reforço, são utilizadas três areias com granulometrias distintas, sendo uma delas areia de zircão e as restantes de aluminossilicatos. A Tabela 5 apresenta a composição química de cada uma delas. Salienta-se que a areia A1 constitui a *face-coat*, sendo aplicada unicamente na 1ª camada; a areia de reforço A2 é usada na 2ª e 3ª camadas e, por fim, a areia de reforço A3 nas camadas de reforço.

Tabela 4: Composição química (%) das farinhas refratárias das barbotinas

	ZrO_2	Al_2O_3	SiO_2	TiO_2	Fe_2O_3	K_2O	CaO	MgO	P_2O_5	H_20
F1 (Zircão)	66,2	0,12	32,7	0,18	0,1	-	0,08	-	0,12	0,5
F2 (Sílica fundida)	-	0,255	99,7	-	0,03	0,005	0,005	0,005	-	-

Tabela 5: Composição química (%) das areias de reforço

	ZrO_2	Al_2O_3	SiO_2	TiO_2	F_2O_3	K_2O	Na_2O	CaO	MgO	P_2O_5	H_20
A1 *(75-125 μm)*	66,2	0,12	32,7	0,15	0,1	-	-	0,1	-	0,13	0,5
A2 *(0,2-0,5 mm)*	-	43,0	53,0	1,6	1,3	0,5	0,1	0,2	0,2	-	0,1
A3 *(0,5-1 mm)*	-	43,0	53,0	1,6	1,3	0,5	0,1	0,2	0,2	-	0,1

Finalmente, de referir que foi realizado um ensaio com o indicador de secagem ReDip™. Este pigmento, uma solução aquosa com 1-10% (em massa) de fluoresceína de potássio, foi adicionado às diferentes barbotinas visando acompanhar a alteração da sua coloração ao longo do período de secagem das várias camadas de cerâmicos depositadas.

4.2 Metodologia Experimental

4.2.1 Produção das carapaças cerâmicas

Para o fabrico das carapaças cerâmicas, a FERESPE aplica, geralmente, oito camadas de barbotina e areia, e finaliza com uma camada de barbotina selante (B3). Destas camadas, as três primeiras são determinantes para a obtenção de peças com elevada qualidade superficial dado que qualquer defeito nestas primeiras camadas será replicado no fundido. As restantes cinco camadas são de reforço. A combinação de barbotina e material refratário aplicado, bem como a sequência de deposição estão sintetizadas na Figura 12.

Entre a deposição de camadas de material refratário, utiliza-se, no mínimo, um período de secagem de 2 h, e, no final, as carapaças ficam a secar até estabilização do seu peso. Por último, procede-se à descerificação.

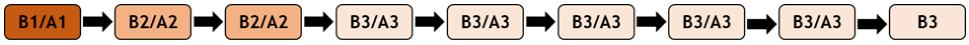


Figura 12: Sequência de deposição das camadas de barbotina e respetivo material refratário.

4.2.2 *Ensaios preliminares*

Considerando que o principal objetivo deste trabalho visava a monitorização da secagem das carapaças cerâmicas utilizadas em *IC*, é fulcral avaliar o método mais adequado. Assim, foi feita uma pesquisa bibliográfica exaustiva de metodologias e equipamentos que pudessem ser implementados para fazer o correto acompanhamento da secagem das carapaças. De seguida são apresentados os ensaios preliminares desenvolvidos.

4.2.2.1 *Ensaio 1*

Neste primeiro ensaio foi avaliada a aplicabilidade de um equipamento, então disponível na FERESPE, tipicamente empregue na construção civil para determinação do teor de humidade da madeira e outros materiais de construção (*VOLTCRAFT® FM-200*).

As medições foram efetuadas em intervalos intercalados, de aproximadamente 20 min, sobre duas superfícies de uma carapaça com a geometria ilustrada na Figura 13: uma superfície mais exposta à fonte de ventilação e uma outra diametralmente oposta.

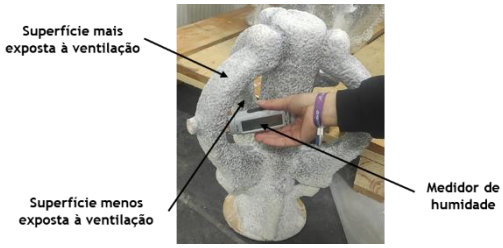


Figura 13: Carapaça cerâmica em que se procedeu à determinação do teor de humidade com o equipamento utilizado em construção civil.

Simultaneamente à avaliação do teor de humidade, foram efetuadas pesagens, a intervalos de 30 min, de forma a avaliar a perda de peso das carapaças, ao longo do seu período de secagem. A Figura 14 representa a evolução do peso ao longo da produção da carapaça cerâmica. Destaca-se o facto da secagem da 5ª camada ter ocorrido durante a noite e, portanto, haver apenas o registo de dois instantes: após imersão e imediatamente antes da deposição da 6ª camada.

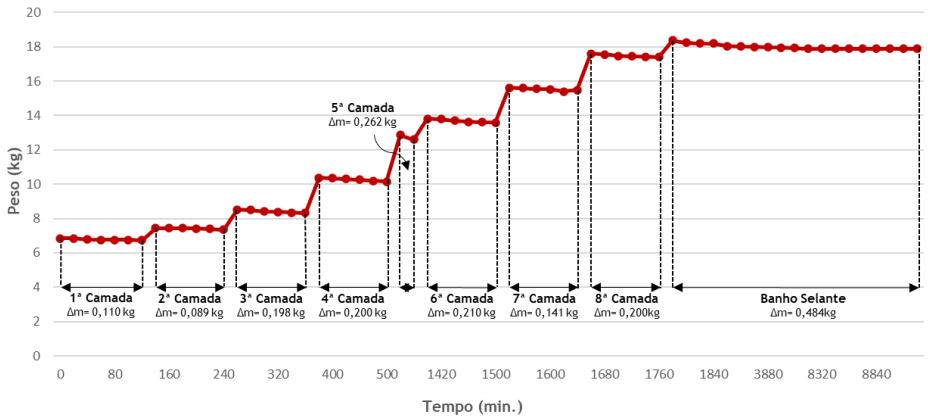


Figura 14: Evolução do peso da carapaça cerâmica ao longo do processo de seu fabrico.

É possível observar as variações decorrentes da adição das camadas de barbotina e cerâmicos,

bem como a perda de peso nas 2 h de secagem intercalar. Verifica-se que este período não é suficiente para promover a sua estabilização, podendo indiciar não corresponder à duração apropriada para a total remoção de água entre as camadas cerâmicas. Todavia, é fundamental ter em consideração que foi utilizada uma balança digital, com uma precisão de ±2 g, e que, para além disso, ocorre sempre destacamento de material refratário aquando da movimentação da carapaça. Deste modo, mesmo que a remoção de humidade tenha ocorrido na sua totalidade, não será percetível pela avaliação da variação do peso.

Ulteriormente ao término do fabrico da carapaça cerâmica, a estabilização do peso ocorre apenas a cerca de 4,5 dias (6420 min) após a deposição do banho selante. A Figura 15 apresenta a evolução do peso da carapaça cerâmica após imersão no banho selante, sendo possível distinguir as três fases características do processo de secagem de materiais porosos. Os pontos A e B delimitam o *CRP*; por sua vez, o período compreendido entre os pontos B e C corresponde ao *1º FRP*, e, finalmente, a partir do ponto C e até ao fim da secagem, decorre o *2º FRP*.

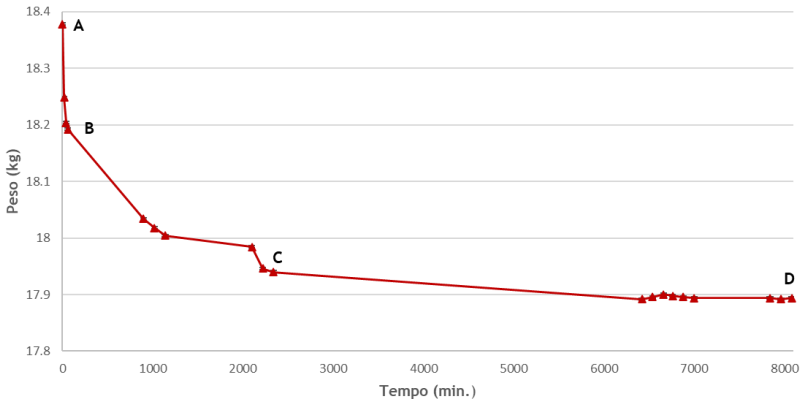


Figura 15: Evolução do peso da carapaça cerâmica, em função do tempo de secagem, após deposição da camada selante.

No que concerne às medições efetuadas com o medidor de humidade (Figura 16), pode aferir-se que a *face-coat* e as camadas intermédias apresentam teores de humidade a rondar os 2-3%, imediatamente a seguir à sua deposição, baixando para valores inferiores a 1% após um período de secagem de 20 min. Nas camadas de reforço, os teores de humidade variam na gama 4-5%, após a imersão do cacho, até valores inferiores a 1%, transcorridos 40 min.

Destaca-se ainda uma ligeira discrepância entre o teor de humidade da superfície mais diretamente exposta à fonte de ventilação comparativamente à diametralmente oposta, sendo bem notório o efeito do fluxo de ar na taxa de secagem.

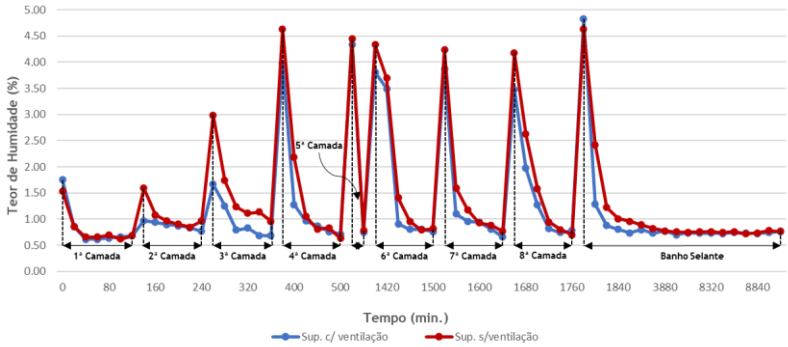


Figura 16: Evolução do teor de humidade da carapaça cerâmica em função do tempo de secagem.

A utilização deste equipamento foi descartada pelo facto de se verificar uma estabilização dos valores de humidade relativamente cedo (40 min), condicionando deste modo o seu devido acompanhamento durante o período de secagem de cada uma das camadas.

4.2.2.2 Ensaio 2

Considerando os métodos expostos no Capítulo 3.5 e os equipamentos disponíveis (Tabela 6), deu-se seguimento aos ensaios preambulares de monitorização da secagem de carapaças cerâmicas com a configuração patente na Figura 17. As condições de temperatura (T) e Humidade Relativa (RH) do meio ambiente foram registadas com recurso a um termohigrómetro *Testo 175 H1* (precisão de ± 0,4ºC).

Tabela 6: Equipamentos utilizados no Ensaio 2

Método	Equipamento	Gama de leituras	Precisão
Termografia	Câmara termográfica, *FLIR i7*	0-250ºC	± 2ºC
Resistência elétrica	Ponte LCR, *ESCORT ELC 131D*	10 Ω-10 M Ω	± 2%
Capacitância		1000 pF-10 mF	± 1 %

À semelhança da metodologia adotada por M. Koralnik [24], os termogramas relativos à evolução da temperatura das camadas cerâmicas, ao longo da sua secagem, foram obtidos com recurso a uma câmara termográfica *FLIR i7*, colocada a uma distância de cerca de 65 cm do objeto. Tal como discutido no Capítulo 3.5.2.1, os materiais cerâmicos apresentam emissividades compreendidas entre 0,85 e 0,95. Numa primeira abordagem, foi adotada uma emissividade intermédia de 0,90, tendo-se validado a temperatura resultante com recurso a uma sonda de contacto. A medição da resistência elétrica e da capacitância foi efetuada segundo os três eixos da peça (Figura 17); por sua vez, as leituras termográficas incidiram sobre duas superfícies distintas (planos YZ e XZ) com o objetivo de avaliar eventuais discrepâncias.

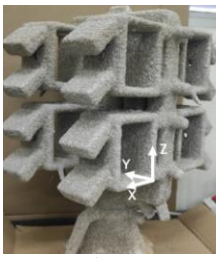


Figura 17: Carapaça cerâmica utilizada no Ensaio 2.

As Figura 18 e Figura 19 apresentam, respetivamente, os gráficos concernentes à variação da resistência elétrica e da capacitância de cada camada da carapaça cerâmica ao longo da secagem.

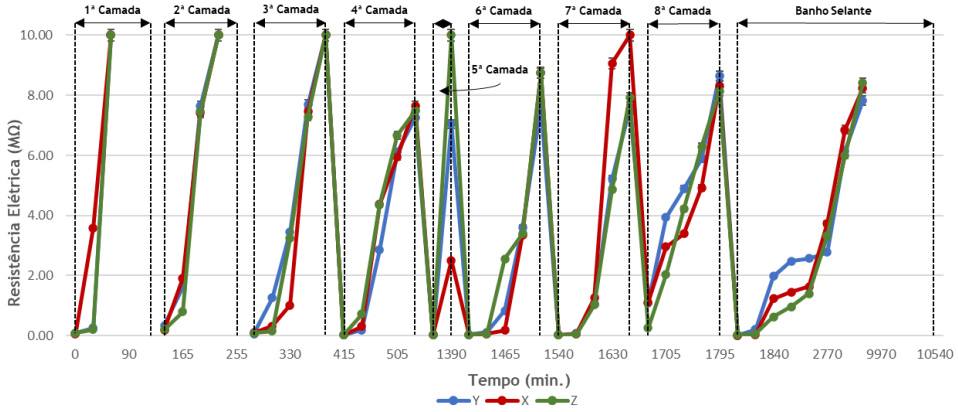


Figura 18: Variação da resistência elétrica de cada camada cerâmica em função do tempo de secagem.

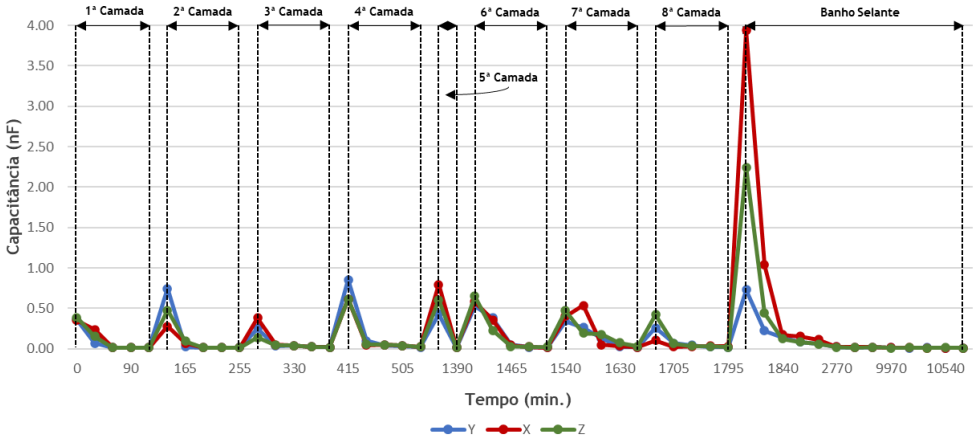


Figura 19: Variação da capacitância de cada camada cerâmica em função do tempo de secagem.

A análise destes gráficos permite aferir que a secagem, segundo as três direções analisadas, é bastante similar. Logo após a deposição de cada camada cerâmica, a resistência elétrica atinge valores muito baixos (≈ 0,1 MΩ), aumentando progressivamente até ao limite de leitura do equipamento. Como patente na Figura 18, para a 1ª e 2ª camadas, não foi possível medir a resistência da carapaça cerâmica a partir dos 90 e 120 min, respetivamente. Este facto acaba por ser limitativo já que não permite a total monitorização do processo de secagem das primeiras camadas e, desta forma, condiciona o estabelecimento do período de secagem a partir do qual se deve prosseguir com a deposição das camadas posteriores. No caso da camada selante, a medição deixou de ser possível a partir dos 5 dias e 16 horas, aproximadamente (8160 min).

No que concerne à capacitância, verifica-se que, após a deposição de cada camada, se atingem valores na gama 0,4-1,0 nF, diminuindo gradualmente até aos 0,01 nF durante a secagem. A gama de leitura da capacitância com o equipamento utilizado permitiu a monitorização de todo o processo de fabrico da carapaça cerâmica; porém, transcorridos 90 min após a aplicação da camada selante, o seu valor estabiliza nos 0,02-0,01 nF. Destaca-se que esta camada apresenta um comportamento diferente no início da sua secagem visto que, após a sua deposição, a sua

capacitância é muito superior comparativamente à das camadas precedentes. Esta variação poderá dever-se ao facto de não se promover a deposição de refratário (material isolante) após a aplicação da camada selante.

Relativamente à análise termográfica, a Figura 20 apresenta, a título exemplificativo, as curvas representativas da variação da temperatura da 1ª camada, bem como os respetivos termogramas obtidos sobre ambos os planos. Após a imersão na barbotina e a deposição de uma camada de refratário, ocorre um decréscimo progressivo da temperatura do cacho visto que existe água livre à superfície, que sofre evaporação. A maior amplitude térmica ocorre para 60 min, no plano YZ. A partir desse instante, a transferência de massa à superfície vai diminuindo e, por conseguinte, regista-se um aumento gradual da temperatura da carapaça. De notar que seriam necessárias mais medições para conseguir diferenciar as três fases da secagem referidas no Capítulo 3.4.1 e, assim, estabelecer a extensão da secagem a partir da qual se poderá efetuar nova deposição.

Os termogramas viabilizam assim a identificação das zonas mais críticas e que necessitarão de mais tempo para completar a secagem. Ao fim de 120 min, nota-se que a região com menor temperatura é o gito de descida; por sua vez, a temperatura dos modelos do cacho já se situa próxima da temperatura ambiente.

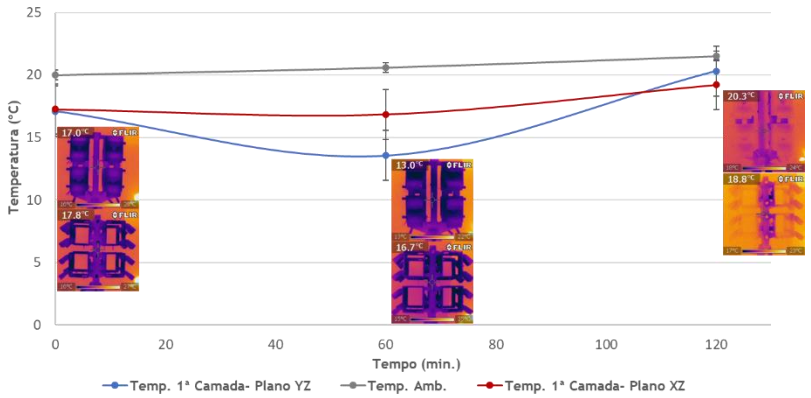


Figura 20: Variação da temperatura durante a secagem da 1ª camada da carapaça nos dois planos analisados.

4.2.2.3 Ensaio 3

Com o objetivo de, por um lado, estender o tempo para o qual é possível obter valores de resistência elétrica durante a secagem e, por outro, manter constante a distância entre os elétrodos, utilizando a ponte LCR, avaliou-se a viabilidade de utilização de insertos metálicos colocados nos modelos em cera (Figura 21). Visava-se assim aumentar a área de contacto com os elétrodos bem como promover uma avaliação da secagem da carapaça em profundidade. Assim, foram testadas quatro condições:

- Elétrodos distanciados 100 mm, sem pinos metálicos no modelo em cera;
- Elétrodos distanciados 150 mm, sem pinos metálicos no modelo em cera;
- Elétrodos distanciados 100 mm, com pinos metálicos no modelo em cera;
- Elétrodos distanciados 150 mm, com pinos metálicos no modelo em cera.

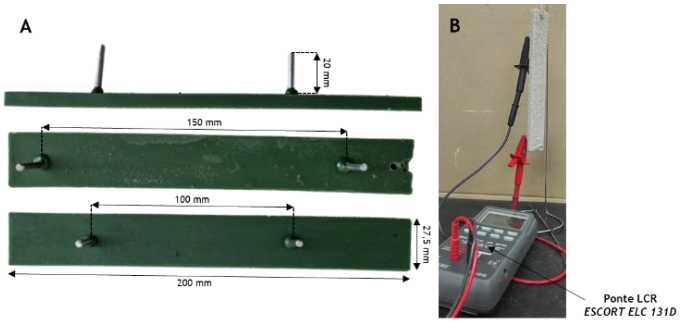


Figura 21: A - Modelos em cera com insertos metálicos; B - Imagem da montagem do sistema para medição da resistência elétrica da camada de refratário.

Em paralelo à análise da resistência elétrica e da capacitância, foi também efetuado o registo termográfico de um conjunto de provetes com o intuito de perceber a evolução da temperatura das respetivas carapaças cerâmicas. O gráfico da Figura 22 representa a evolução da resistência elétrica média, em função do tempo de secagem, de um conjunto de cinco modelos em cera para cada uma das condições supracitadas.

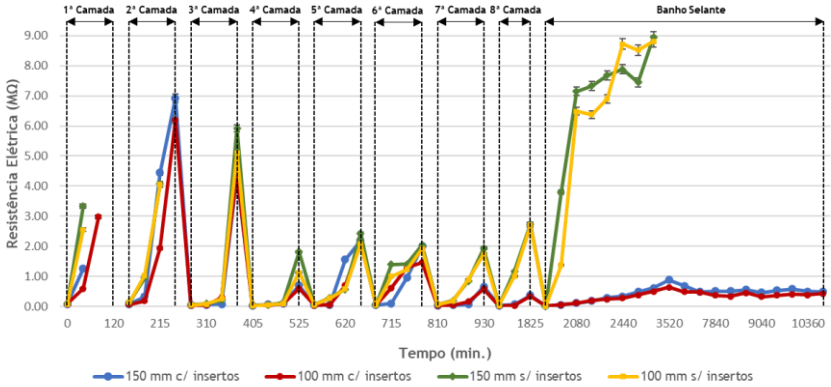


Figura 22: Evolução da resistência elétrica de cada uma das camadas refratárias, em função do tempo.

De forma a avaliar o tipo de montagem mais adequado, é apresentado, na Tabela 7, o tempo máximo de leitura para cada uma das condições estudadas.

Tabela 7: Tempo de leitura (min) da ponte LCR, para cada camada, para as condições estudadas

	Com insertos		**Sem insertos**	
	100 mm	*150 mm*	*100 mm*	*150 mm*
1ª camada	80	40	40	40
2ª camada	120	120	80	80
Camadas 3 a 8	120	120	120	120
Banho selante	8640	8640	5640	5640

Constata-se que a solução correspondente à utilização de insertos metálicos distanciados entre si de 100 mm foi a que permitiu a leitura da resistência elétrica por períodos mais longos, para todas as camadas. Contudo, para a 1ª camada, o tempo máximo de leitura continua a ser insuficiente para monitorizar a secagem ao longo das 2 h (tempo utilizado pela FERESPE).

Analisando a variação do valor da resistência elétrica ao longo das várias camadas nas quais foi possível o seu controlo, constatou-se que nas:

- Camadas 2 e 3: ao fim de 2 h, obtêm-se valores ≈ 5,5 ± 1,5 MΩ;

- Camadas 4 a 6: ao fim de 2 h, obtêm-se valores ≈ 1,7 ± 0,8 MΩ;
- Camadas 7 e 8: ao fim de 2 h, obtêm-se valores entre 0,5 ± 0,2 MΩ, para as medições envolvendo a montagem com insertos metálicos, e 2,3 ± 0,7 MΩ na situação oposta;
- Banho selante: para o período de leitura associado a cada condição, destaca-se a diferença significativa entre os valores registados nas medições com insertos metálicos (0,01 - 1 MΩ) e sem insertos metálicos (≈ 9 MΩ). Esta diferença pode ser justificada pelo facto da utilização de insertos promover a medição da resistência elétrica da carapaça cerâmica em profundidade, a qual é condicionada pelo teor de água das camadas precedentes pelo que, consequentemente, a resistência elétrica assumirá valores inferiores no final do processo de produção da carapaça cerâmica. No outro caso, a medição restringe-se à superfície, pelo que os valores serão consideravelmente maiores.

Verificou-se ainda que, ao longo da deposição das várias camadas, ocorre uma diminuição do valor máximo de leitura da resistência elétrica. Este decréscimo poderá dever-se à alteração da composição das barbotinas. Para além disso, 2 h podem não ser suficientes para completar a secagem de cada uma das camadas, pelo que o incremento sucessivo do teor de água presente na carapaça conduz ao progressivo decréscimo da resistência elétrica máxima.

No que concerne à capacitância, é percetível pelo gráfico da Figura 23 que as condições estudadas apresentam a mesma tendência para todas as camadas. Aquando da imersão, a capacitância assume valores compreendidos entre 0,04 e 0,2 nF, diminuindo progressivamente até valores ≈ 0,01 nF, ao fim das 2 h de secagem. Contrariamente ao que acontece com a resistência elétrica, o tempo de secagem não constitui uma limitação à leitura do equipamento. No caso da camada selante, verifica-se que, para as condições que não contemplam insertos metálicos, registam-se valores de capacitância consideravelmente superiores imediatamente após imersão, de 1,07 e 0,64 nF, para uma distância entre insertos de 100 e 150 mm, respetivamente. Sendo a capacitância inversamente proporcional à distância entre elétrodos (Equação 5), justifica-se assim o menor valor obtido para uma distância entre insertos de 150 mm. Quando se aplicam insertos, a análise não se restringe à superfície, pelo que a capacitância é condicionada pela espessura da carapaça, e, por isso, os valores são bastante inferiores.

Adicionalmente, constata-se que, 2 h após o fim do fabrico da carapaça cerâmica, a capacitância atinge valores ≈ 0,01-0,04 nF, que se mantêm até ao momento imediatamente anterior à descerificação. Assim, uma vez que não se verifica uma alteração da capacitância após a imersão no banho selante e que, mesmo utilizando insertos metálicos, a gama de leitura do equipamento para a medição da resistência elétrica continua a ser uma condicionante, este método será descartado nos ensaios subsequentes.

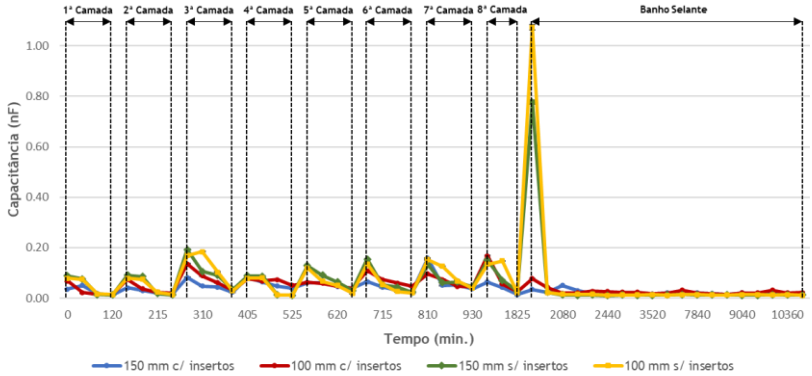


Figura 23: Evolução da capacitância de um conjunto de carapaças relativas a cinco modelos, em função do tempo.

Relativamente aos estudos por termografia, serão apenas apresentados os resultados relativos à secagem das carapaças sem insertos metálicos uma vez que é semelhante o comportamento para todas as condições.

A Figura 24 mostra a evolução das temperaturas ambiente e do provete, bem como os termogramas obtidos. De notar que foi feito o acompanhamento das três primeiras camadas por serem as que poderão ter maior impacto na ocorrência de defeitos nos fundidos, tal como foi identificado no Capítulo 3.7. Através da sua análise, é possível identificar as três fases características do processo de secagem de materiais porosos, na 1ª e 2ª camadas. No que concerne à 3ª camada, o *1º FRP* não terá terminado visto que não se regista uma diminuição da amplitude térmica ou mesmo a sua estabilização. A maior amplitude térmica foi registada para 40 min após a deposição de cada camada, verificando-se ainda que, à medida que a produção da carapaça cerâmica progride, a menor temperatura que a carapaça atinge é progressivamente inferior (13,0, 12,2 e 11,2ºC para a 1ª, 2ª e 3ª camadas, respetivamente). Este comportamento deve-se ao facto de haver acumulação de humidade na carapaça à medida que se depositam novas camadas, propiciando a que haja mais água livre à sua superfície que evapora e, consequentemente, uma maior diminuição de temperatura em relação à temperatura ambiente.

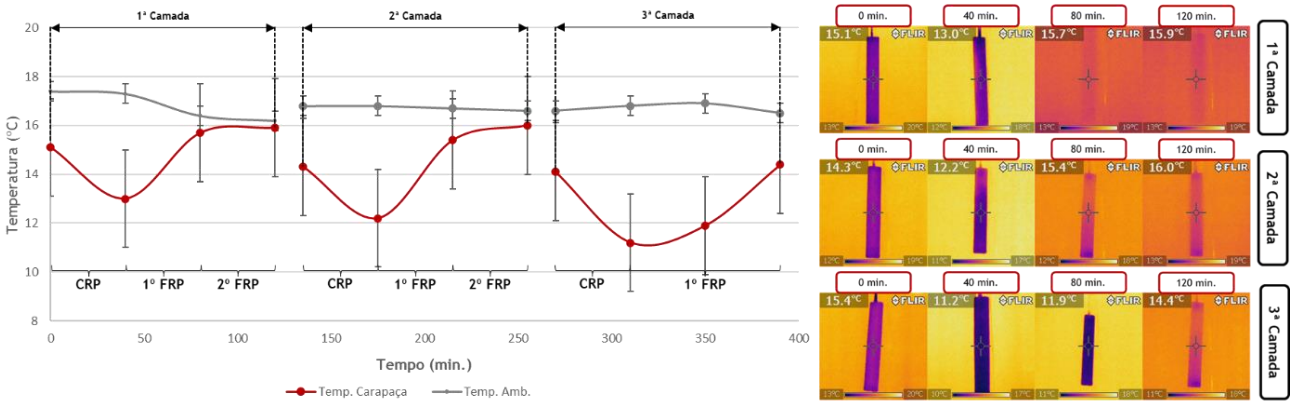


Figura 24: Evolução das temperaturas ambiente e da carapaça cerâmica, ao longo da secagem das três primeiras camadas.

Os termogramas obtidos comprovam o anteriormente exposto visto que, quanto maior o número de camadas depositadas, maior é o tempo necessário para se obter termogramas com tonalidade mais homogénea, ou seja, maior o tempo para que a transferência de água seja mais reduzida e

menor a amplitude térmica (ΔT). Como se pode observar, ao fim de 120 min, regista-se uma ΔT = 2,1ºC na 3ª camada, enquanto que, para as 1ª e 2ª camadas, o seu valor é de apenas 0,2 e 0,6ºC, respetivamente.

No que concerne à camada selante, observa-se (Figura 25) que, 120 min após a sua deposição, ter-se-á atingido o fim do *CRP*, correspondente ao máximo de amplitude térmica. Logo de seguida, a temperatura sofre um rápido incremento, até aos 240 min (intervalo de tempo correspondente ao *1º FRP*), e, posteriormente, regista-se uma estabilização da sua temperatura até aos 1680 min (28 h), correspondentes ao *2º FRP*. De notar que não se efetuou o controlo da secagem da camada selante até ao momento imediatamente anterior à descerificação uma vez que, tendo sido já atingido o *2º FRP*, a transferência de massa do interior da carapaça cerâmica para o seu exterior é mais reduzida pelo que não é de prever uma variação significativa da sua temperatura. Os termogramas evidenciam esta mesma evolução: a partir dos 360 min, a sua tonalidade é mais uniforme, o que significa que a temperatura da carapaça se encontra próxima da temperatura ambiente.

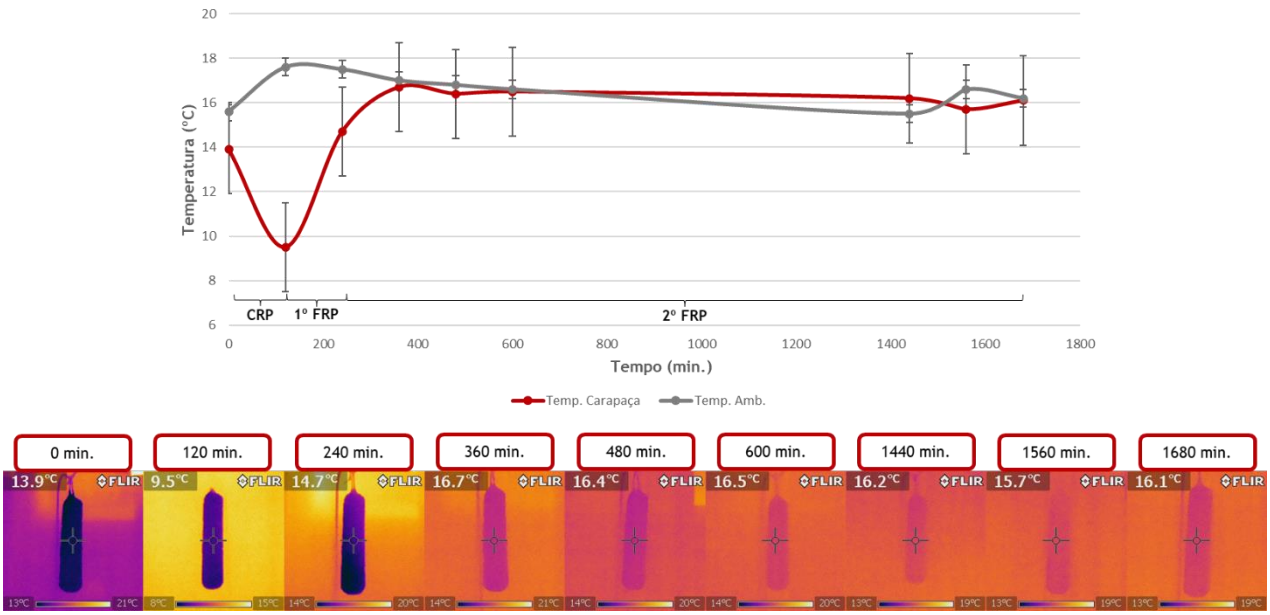


Figura 25: Variação da temperatura da carapaça cerâmica após o banho selante.

4.2.2.4 Ensaio 4

Considerando que a perda de peso é a única forma de avaliar o teor de água presente na carapaça cerâmica, ao fim de um dado período, foi efetuado um ensaio visando o traçado da curva relativa à evolução do peso da mesma em função do tempo de secagem; para tal, foram utilizados os mesmos modelos do Ensaio 3.

Antes dos ensaios propriamente ditos, foi determinado o teor de água de cada barbotina e comparado o seu valor com o de base (Tabela 3). Para o efeito, foi recolhida uma amostra de 50 ml de cada uma das barbotinas, que foi colocada numa estufa a 120ºC durante 2 h. A Tabela 8 apresenta o peso da amostra no início (m_i) e no fim do ensaio (m_f), e, por conseguinte, o teor de

água presente em cada amostra para as viscosidades indicadas. Destaca-se o facto de as viscosidades das barbotinas terem sido mantidas durante todos os ensaios efetuados ao longo da presente dissertação.

Tabela 8: Teor de água real de cada uma das barbotinas para as respetivas viscosidades

	Viscosidade (s)	m_i (g)	m_f (g)	Δm, $\%H_2O$
B1	14,5	140,8 ± 0,1	118,2 ± 0,1	16,0 ± 0,1
B2	7,5	125,2 ± 0,1	99,8 ± 0,1	20,3 ± 0,1
B3	12	100,0 ± 0,1	75,6 ± 0,1	24,5 ± 0,1

A Figura 26 apresenta a variação do peso em função do tempo de secagem para as três primeiras camadas. Verifica-se que o comportamento de cada curva não vai de encontro ao que seria expectável da análise termográfica (Ensaio 3): a identificação das diferentes fases de secagem não é concordante com a anteriormente efetuada. No Ensaio 3, foi possível distinguir as três etapas para a 1ª e 2ª camadas; contudo, neste caso é apenas possível identificar o *CRP* e *1º FRP*. Relativamente à 3ª camada, a carapaça ainda não terá ultrapassado o *CRP* ao fim de 120 min, contrariamente ao que se poderá inferir da análise dos termogramas (Figura 24). Assim, da análise dos gráficos, em nenhuma das camadas terá ocorrido a total remoção da humidade.

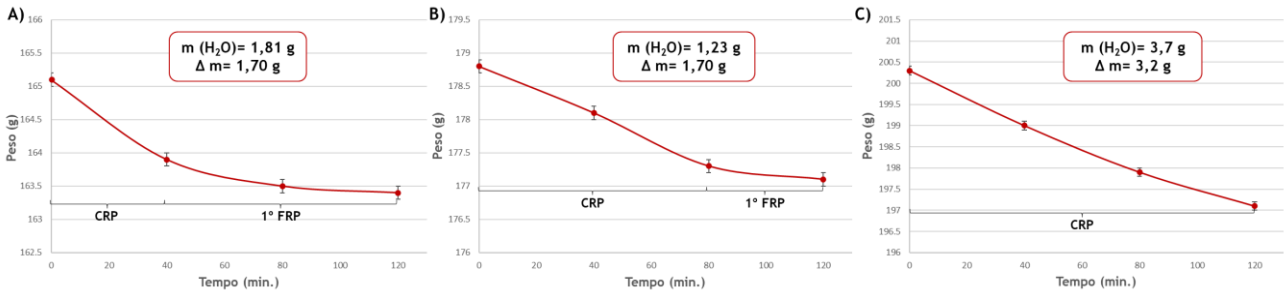


Figura 26: Variação do peso da carapaça cerâmica em função do tempo de secagem para: A- 1ª camada; B- 2ª camada; C- 3ª camada.

Além das dissimilitudes entre as conclusões que se podem deduzir com base na aplicação das duas técnicas, constatou-se que, em cada uma das camadas, a perda de peso registada não era compatível com o teor de água de cada barbotina. Esta diferença resulta da remoção de alguns grãos de areia refratária induzida pelo manuseamento da carapaça ao longo do seu processo de fabrico e/ou pela corrente de ar do sistema de ventilação. Assim, uma vez que não é possível definir com confiança o estádio de secagem em que a carapaça efetivamente se encontra, este método não foi considerado nos próximos ensaios.

4.2.2.5 Ensaio 5

A fim de tentar colmatar a limitação da gama de leitura do equipamento de medição da resistência elétrica, foi feito o controlo deste parâmetro com um medidor de isolamento *SEW 6211A IN*, que permite aplicar uma maior diferença de potencial, tornando assim possível a medição da resistência elétrica numa carapaça após descerificação (*i.e.*, totalmente seca). De forma a aumentar a área de contacto com a superfície da carapaça cerâmica e, deste modo, ter

maior representatividade do comportamento elétrico do material cerâmico, foram colocadas duas chapas em cobre eletrolítico nas extremidades das ponteiras, distanciadas entre si de 20 mm (Figura 27).

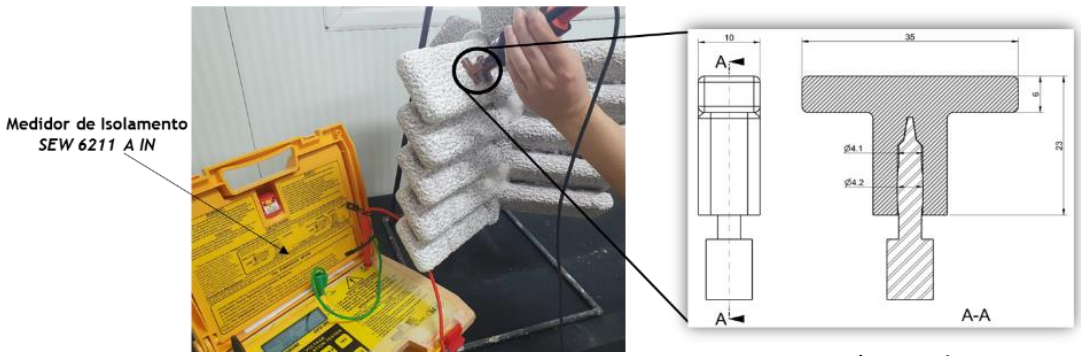


Figura 27: Esquema representativo da metodologia utilizada para medição da resistência elétrica da carapaça cerâmica com o equipamento *SEW 6211A IN*.

A medição da resistência elétrica foi efetuada para uma voltagem de 1 kV. Para aferir a variação desta grandeza ao longo da superfície dos provetes, foram efetuadas medições em três zonas das duas geometrias selecionadas: provetes para realização de ensaios de flexão (PF), com 7,0 mm de espessura (Figura 28 (A)), e provetes utilizados nos ensaios de molhabilidade (PM), com 3,3 mm de espessura (Figura 28 (B)). Uma vez que estes últimos apresentam uma maior área superficial, a probabilidade de formação de defeitos *bulge* e *buckle* será mais elevada e, portanto, serviram apenas para a inspeção visual da superfície interna das carapaças cerâmicas. Foram utilizados moldes em resina para injeção dos modelos de cera. Para cada uma das condições de fabrico das carapaças, foram analisados três provetes para cada uma das geometrias.

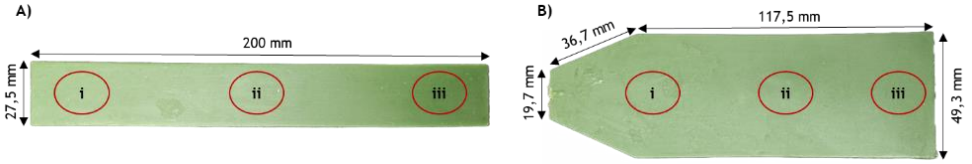


Figura 28: A- Modelo de cera do provete para ensaio de flexão (PF); B- Modelo de cera do provete para ensaio de molhabilidade utilizado na inspeção visual (PM).

As Figuras 29 e 30 mostram, respetivamente, para os modelos PF e PM, a evolução da resistência elétrica das respetivas carapaças cerâmicas em função do tempo de secagem. Para ambos os casos, as três zonas apresentam comportamentos similares, e, por este motivo, estabeleceu-se a zona intermédia (Figura 28- zona ii) como a de medição para os ensaios subsequentes.

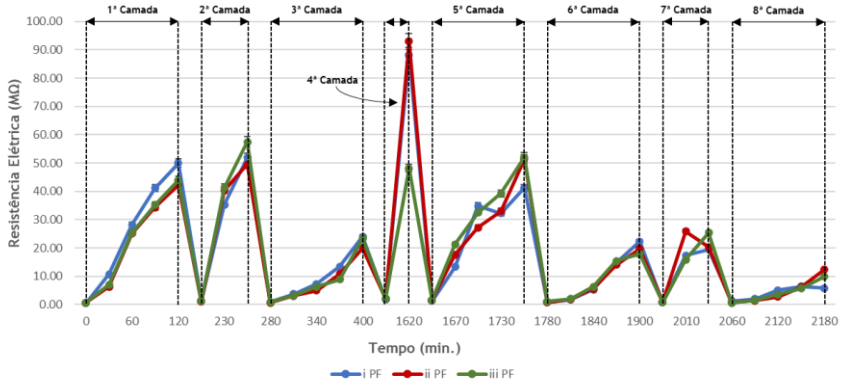


Figura 29: Evolução da resistência elétrica da carapaça relativa ao modelo PF em função do tempo de secagem.

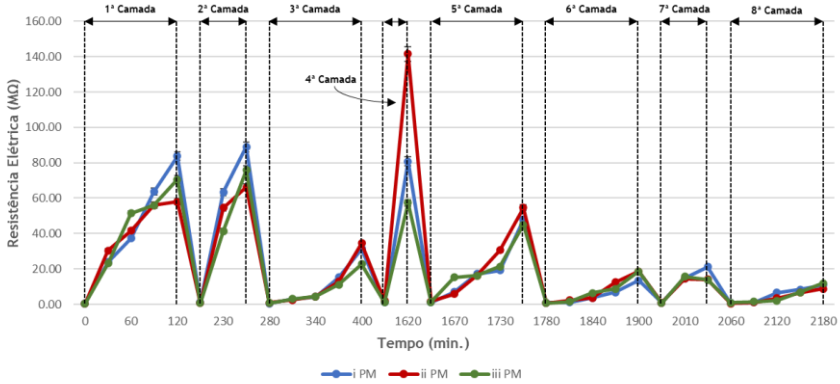


Figura 30: Evolução da resistência elétrica da carapaça relativa ao modelo PM em função do tempo de secagem.

4.2.2.6 Ensaio 6

Considerando que não é conhecida a ordem de grandeza da resistência elétrica que cada uma das camadas assume quando totalmente seca, faria sentido partir de um método teoricamente validado, concretamente, o recurso a pigmentos que indicassem quando é que a carapaça cerâmica atinge um teor de humidade adequado para prosseguir com o seu fabrico. Deste modo, simultaneamente à medição da resistência elétrica, foi efetuado um ensaio que visava a análise da evolução da coloração da carapaça cerâmica com o decorrer da secagem.

Assim, foi adicionado às barbotinas o indicador ReDip™, numa proporção de 3:200 de ligante, tal como indicado pelo fornecedor. Como mencionado previamente, este indicador apresenta fluorescência pelo que foi feito o registo da evolução da secagem utilizando uma câmara fotográfica e uma fonte externa de luz ultravioleta (UV), dispostas como ilustrado na Figura 31.



Figura 31: Montagem dos equipamentos para registo da evolução da tonalidade das carapaças cerâmicas, ao longo da sua secagem, tendo sido utilizadas barbotinas contendo indicador ReDip™.

Relativamente aos resultados obtidos, as Figuras 32 e 33 apresentam a variação da resistência elétrica das primeiras três camadas, durante a sua secagem, para modelos PF e PM,

respetivamente. Da sua análise é possível observar que o comportamento é semelhante para ambas as condições uma vez que não se regista variação significativa no valor da resistência elétrica da carapaça cerâmica decorrente da incorporação de indicador nas barbotinas.

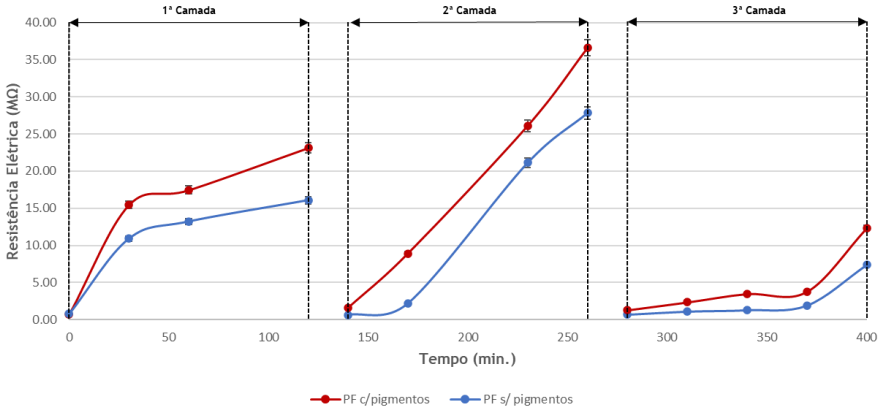


Figura 32: Evolução da resistência elétrica das três primeiras camadas da carapaça, relativa ao modelo PF, em função do tempo de secagem.

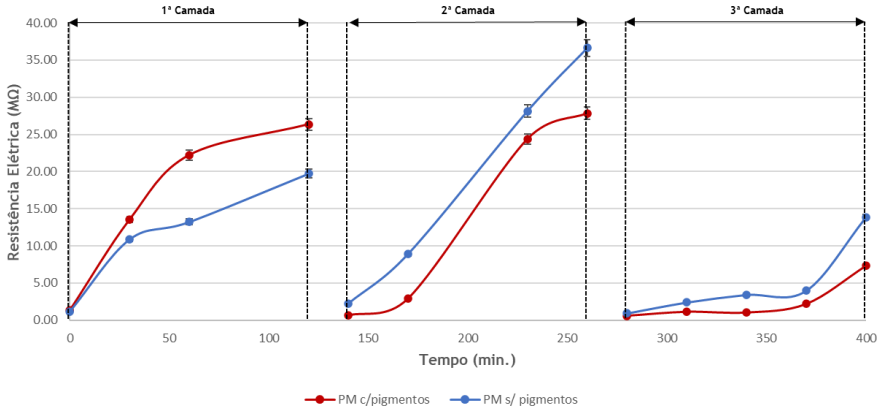


Figura 33: Evolução da resistência elétrica das três primeiras camadas da carapaça, relativa ao modelo PM, em função do tempo de secagem.

Pela análise visual da evolução da coloração das carapaças cerâmicas correspondentes a ambos os modelos (Figura 34 e 35), pôde constatar-se que, mesmo após 120 min de secagem entre camadas, não foi percetível a mudança de tonalidade (verde fluorescente para cor de laranja) sugerida pelo fabricante do pigmento, mesmo utilizando as condições de iluminação artificial recomendadas para as tarefas executadas naquele posto de trabalho. Para além disso, aquando da utilização de uma luz ultravioleta, é notória a fluorescência dos provetes logo após a sua imersão; porém, após um período de 30 min de secagem, esta fluorescência perde-se, não sofrendo quaisquer alterações até às 2 h de secagem.

Deste modo, é possível aferir que a utilização do indicador ReDip™ não se mostrou adequado pelo facto da alteração da tonalidade não ser evidente ao longo da secagem das três primeiras camadas. As variações expectáveis poderiam ser mais notórias caso fosse depositada alumina como areia de reforço ao invés de zircão (na 1ª camada), ou aluminossilicatos (na 2ª e 3ª camadas) uma vez que a primeira apresenta uma tonalidade mais esbranquiçada, facilitando assim a avaliação da alteração da cor da carapaça cerâmica.

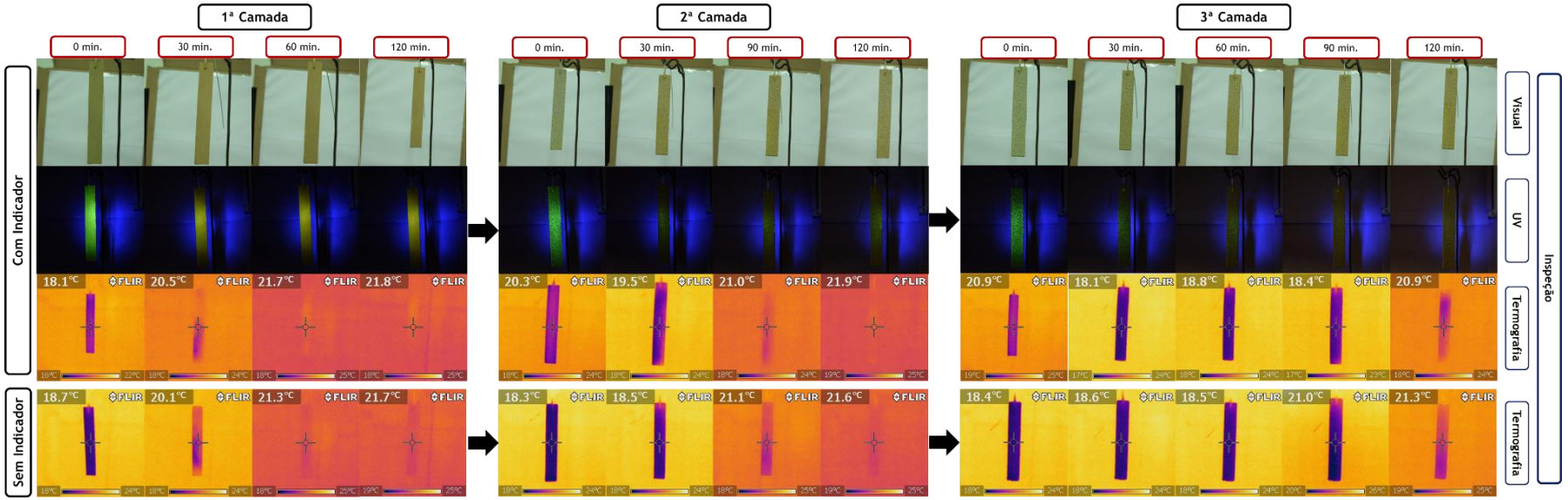


Figura 34: Variação da tonalidade e temperatura das três primeiras camadas da carapaça cerâmica, relativa ao modelo PF, durante a sua secagem.

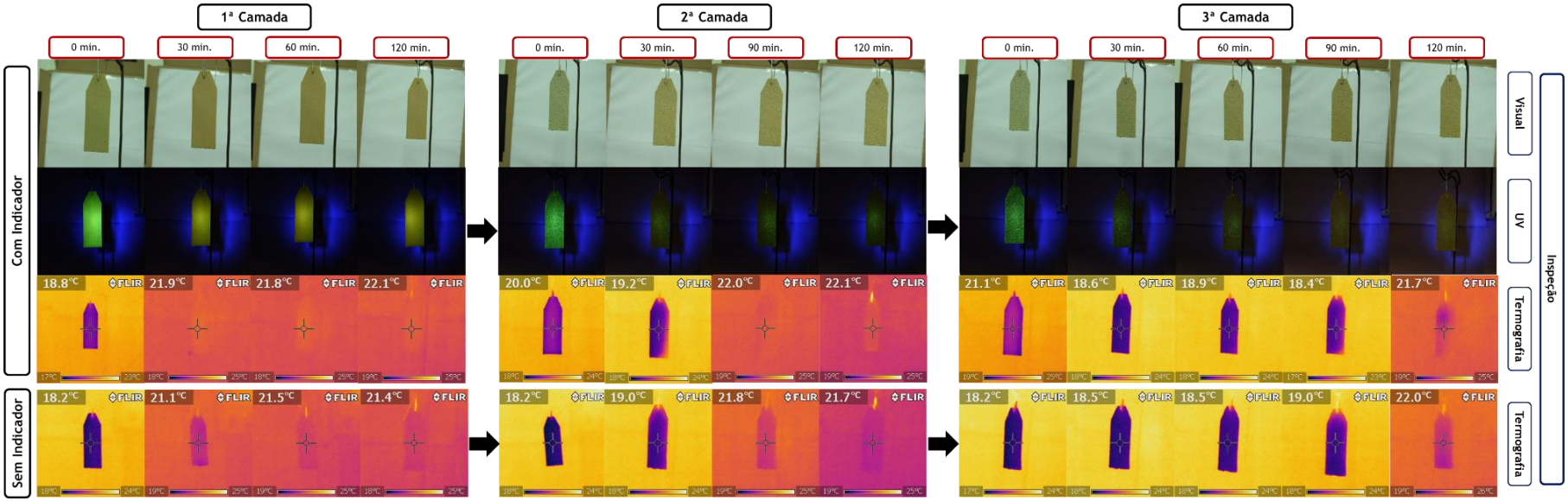


Figura 35: Variação da tonalidade e temperatura das três primeiras camadas da carapaça cerâmica, relativa ao modelo PM, durante a sua secagem.

Em conclusão, a incorporação deste composto nas barbotinas não permitiu estabelecer com confiança o momento a partir do qual se poderá prosseguir com a deposição da camada seguinte, nem, por conseguinte, obter o valor de referência da resistência elétrica no fabrico de carapaças. Destaca-se também que, como seria expectável, a descerificação promove a remoção do composto do interior da carapaça cerâmica, que adquire a sua cor inicial (Figura 36).

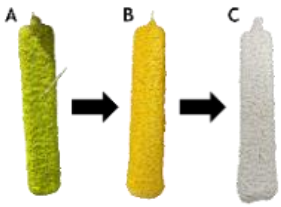


Figura 36: Alteração da tonalidade dos provetes de carapaça cerâmica: A - após o banho selante; B - Momento imediatamente anterior à descerificação; C - após descerificação.

Relativamente à análise térmica, verifica-se que o comportamento dos provetes das carapaças com e sem pigmentos, em cada uma das geometrias é similar (Figura 37).

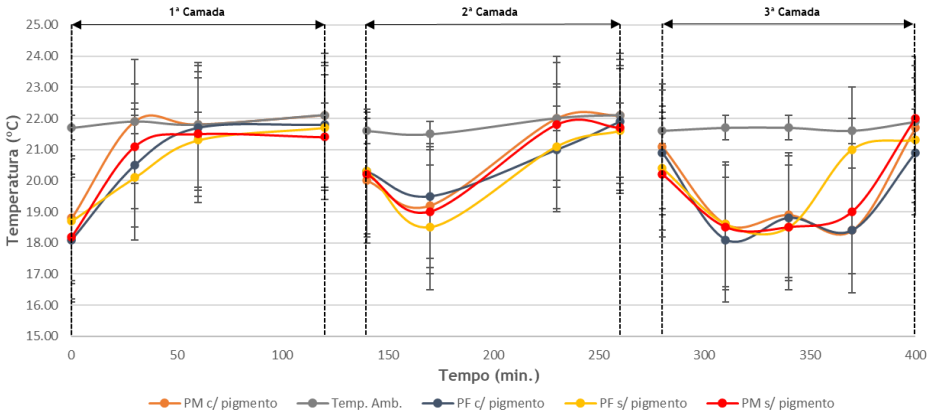


Figura 37: Evolução da temperatura das três primeiras camadas da carapaça cerâmica, para cada uma das condições, durante a sua secagem.

Com o intuito de verificar se a utilização de pigmentos induzia alterações na resistência à flexão das carapaças cerâmicas, foram realizados ensaios segundo a norma ASTM C1161-13, sobre provetes como os apresentados na Figura 28 (A); o valor da resistência à flexão foi obtido a partir da Equação 6 [39].

Estes ensaios foram conduzidos utilizando uma célula de carga, para uma carga máxima de 500 N, um punção de 2,5 mm de raio, e uma velocidade de ensaio de 1 mm/min; a distância entre os apoios do provete era de 150 mm. Obteve-se a assim a carga máxima a que ocorre a rotura, bem como o deslocamento relativo à deformação elástica dos provetes antes da sua rotura.

O gráfico da Figura 38 apresenta os valores da resistência à flexão, em três pontos, obtidos para esses provetes. Como expectável, dado tratar-se de um pigmento, a adição do ReDip™ às barbotinas não teve impacto sobre a resistência à flexão da carapaça, situando-se o seu valor a cerca de 3,7 MPa.

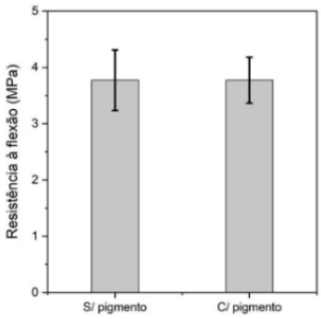


Figura 38: Resistência à flexão de provetes de carapaças cerâmicas produzidas com barbotinas a que foi adicionado (ou não) pigmento ReDip™.

Deste modo, pode constatar-se que o controlo da resistência elétrica, utilizando o medidor de isolamento *SEW 6211A IN*, com elétrodos distanciados de 20 mm, em paralelo com a monitorização da temperatura por termografia, demonstraram ser metodologias válidas para o controlo do processo de secagem das carapaças cerâmicas. É apresentada de seguida a sequência de metodologias a serem utilizadas para identificar as condições que conduzem à formação dos defeitos identificados pela FERESPE.

4.2.3 Aplicação da metodologia selecionada sobre provetes

Após ter sido delineado o procedimento adequado para cada um dos métodos de monitorização da secagem de cada uma das camadas cerâmicas (medição da resistência elétrica e temperatura), apresentam-se neste tópico os ensaios realizados para analisar a influência do tempo de secagem das três primeiras camadas na qualidade superficial da carapaça cerâmica.

Com este propósito, foram alterados os tempos de secagem entre as três primeiras camadas: 30 min (A), 60 min (B), 90 min (C) e 120 min (D), tendo-se mantido, a partir da 4ª camada, um período de secagem de 2 h, duração adotada pela FERESPE. Para cada uma das condições, foram produzidas três carapaças a partir de modelos de provetes para ensaios de flexão e de molhabilidade (Figura 28), tendo sido efetuada a medição da resistência elétrica, bem como da temperatura, a intervalos regulares de 15 min. Destaca-se o facto de a temperatura avaliada pela câmara termográfica ser sempre referente à mesma zona dos provetes.

Com o intuito de perceber de que forma as condições atmosféricas de produção das carapaças cerâmicas afetam a sua secagem, foi efetuada uma análise multivariável desses parâmetros com recurso ao *software SPSS*.

No fim do processo de fabrico das carapaças, prosseguiu a sua secagem até estabilização do seu peso (método de controlo atualmente adotado pela FERESPE), a que se seguiu a sua descerificação. Ulteriormente, procedeu-se a um controlo visual das superfícies internas das carapaças cerâmicas dos provetes utilizados nos ensaios de molhabilidade (Figura 39).

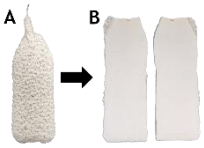


Figura 39: A – Carapaça cerâmica antes da descerificação; B – Superfícies internas da carapaça após descerificação.

Com o intuito de avaliar o impacto das alterações das condições de secagem na resistência à flexão das carapaças cerâmicas, os ensaios de flexão foram conduzidos segundo os parâmetros estabelecidos no Capítulo 4.2.2.6.

4.2.4 Aplicação da metodologia selecionada para carapaças de peças de geometria simples

Uma vez selecionada a metodologia a utilizar para a avaliação do grau de secagem de cada camada das carapaças cerâmicas ao longo da sua produção, impunha-se estudar a influência da variação do tempo de secagem entre camadas em condições reais de produção, *i.e.*, para carapaças produzidas a partir de cachos compreendendo modelos de peças de geometria um pouco mais complexa e sistema de alimentação e gitagem.

A seleção das peças, "palhetas" (Figura 40), teve em consideração a taxa de incidência de defeitos *bulge* e *buckle* reportada pela FERESPE em produções anteriores. Estas peças são produzidas em ferro fundido branco, utilizadas em equipamentos de granalhagem de peças. Destaca-se ainda o facto de cada cacho ser composto por 12 (geometria C) ou 30 peças (geometrias A e B).

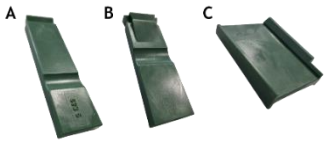


Figura 40: Geometria das peças adotadas para a metodologia selecionada.

De forma a analisar o comportamento elétrico e térmico das carapaças cerâmicas em condições normais de produção, e identificar as que induzem o aparecimento de defeitos *bulge* e *buckle*, foram introduzidas algumas alterações, nomeadamente em termos da sua configuração bem como da duração dos períodos de secagem entre as três primeiras camadas, e após a imersão no banho selante, de acordo com o esquematizado na Figura 41. Para cada um dos cachos, a resistência elétrica foi medida em três superfícies, e o registo térmico teve em consideração sempre a mesma zona das moldações, tendo-se efetuado medições a intervalos regulares de 30 min.



Figura 41: Condições implementadas na secagem das carapaças cerâmicas, para cada uma das diferentes geometrias.

A descerificação ocorreu segundo os parâmetros atualmente em vigor na FERESPE, tendo sido efetuada à medida que a produção de carapaças se concluía, ou seja, contemplando três carapaças por ciclo, garantindo desta forma a constância da carga do forno.

Ulteriormente à descerificação, as superfícies internas de todas as carapaças cerâmicas foram analisadas por radioscopia digital, com o intuito de identificar a potencial ocorrência de defeitos internos que pudessem vir a repercutir-se nos fundidos. Este método de inspeção não destrutivo é empregue na empresa para controlo da sanidade interna dos fundidos.

Após o vazamento do metal, abate das carapaças cerâmicas, granalhagem e corte, as peças

foram identificadas de acordo com a sua posição relativa em cada cacho, seguindo-se a sua inspeção visual e contabilização de defeitos para cada uma das condições.

4.2.5 Implementação da metodologia no sistema produtivo

Dada a confiança nos registos da câmara termográfica, comprovada durante a análise dos resultados dos ensaios prévios (Capítulo 5.2) relativamente ao instante em que é possível prosseguir com o processo, foi adotado o método baseado na determinação da amplitude térmica como critério para passar à deposição da camada subsequente (para as três primeiras camadas, tendo sido utilizado, para as camadas seguintes, um tempo de secagem de 2 h) na produção de carapaças de peças de geometria complexa sobre as quais já havia historial.

Tendo em consideração que, na implementação da metodologia para o caso de peças de geometria simples, não ocorreu, como seria expectável, o aparecimento de defeitos *bulge* e *buckle*, pôs-se em causa se a ocorrência destes defeitos dever-se-ia igualmente ao desenvolvimento de sobrepressões no momento da descerificação. Assim, foram testados dois conjuntos de quatro cachos compreendendo seis modelos em cera com a geometria patente na Figura 42 a), e alterado o número de respiros:

- Condição A: menor quantidade de respiros por cacho (Figura 42 b));
- Condição B: colocação de um maior número de respiros por cacho (Figura 42 c)), nos locais de maior massividade dos modelos em cera.

A análise termográfica foi efetuada em três zonas das carapaças (Figura 42 d)), e a decisão de mergulhar a carapaça na barbotina subsequente assentou na homogeneidade de temperatura de todo o cacho, previamente avaliada.

No final da produção das carapaças cerâmicas, foi efetuada a monitorização da resistência elétrica e da temperatura, tendo a tomada de decisão em relação ao momento da descerificação sido feita com base em ambos os parâmetros. Realça-se ainda o facto de a carga do forno de descerificação ter sido mantida constante.

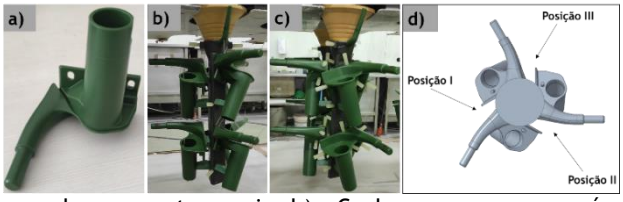


Figura 42: a) - Modelos de cera usados para este ensaio; b) - Cacho com um menor número de respiros; c) - Cacho com maior número de respiros; d) – Zonas da carapaça submetidas a controlo.

5 Apresentação e Discussão de Resultados

5.1 Implementação da metodologia sobre provetes

A análise estatística multivariável efetuada com o *SPSS* visou a avaliação da incidência da temperatura e a humidade relativa do ar, registadas para cada uma das condições, nos valores de resistência elétrica bem como da temperatura das carapaças cerâmicas. A Tabela 9 apresenta os

valores médios da temperatura e humidade relativa registados pelo termohigrómetro durante a monitorização da secagem das carapaças de teste, para cada uma das condições.

Tabela 9: Valores médios dos registos de temperatura e humidade relativa do ar durante a monitorização da secagem das carapaças de teste, para cada uma das condições

	A	B	C	D
Temperatura (ºC)	19,5 ± 0,5	23,8 ± 0,6	24 ± 1,0	21,0 ± 0,8
Humidade Relativa (%)	46,1 ± 3,4	51,5 ± 1,4	48,7 ± 3,0	50 ± 3,3

Esta análise permitiu verificar a inexistência de uma melhoria significativa do coeficiente de determinação ajustado quando se adiciona ao preditor "tempo" a humidade relativa e a temperatura do ar, ou seja, o modelo de regressão que correlaciona a resistência elétrica ou a temperatura das carapaças cerâmicas (variáveis dependentes) apenas com o tempo de secagem (variável independente) apresenta um melhor ajuste comparativamente ao que contempla igualmente as condições ambientais (temperatura e humidade relativa) vigentes durante toda a etapa. Para além disso, destaca-se o facto das condições de temperatura e humidade não terem sofrido alterações significativas no período de realização dos ensaios (Tabela 9). Assim, a temperatura e humidade relativa do ar não serão consideradas nos gráficos respeitantes à variação da temperatura e da resistência elétrica das carapaças cerâmicas para as condições estudadas. Numa perspetiva futura, poder-se-á repetir (em períodos de inverno e de verão) o procedimento a fim de estabelecer uma nova correlação e avaliar o impacto da alteração dessas condições nas linhas de tendência das leituras da resistência elétrica e de temperatura da carapaça cerâmica.

Como discutido no Capítulo 3.5.2, o nível de secagem pode ser avaliado a partir da amplitude térmica entre a carapaça e o meio ambiente (ΔT). As Figuras 43 a 46 apresentam as variações de resistência elétrica e de temperatura registadas sobre as carapaças cerâmicas, para cada uma das condições consideradas.

Primeiramente, analisando os dois métodos de monitorização aplicado às três primeiras camadas, pode constatar-se que as carapaças relativas aos provetes de flexão (PF) e provetes de molhabilidade (PM) apresentam o mesmo comportamento, para todas as condições. Assim, é apresentada a curva que melhor descreve cada tendência.

Observando o gráfico concernente à condição A, verifica-se que um tempo de secagem de 30 min entre as três primeiras camadas não é suficiente para se atingir a última etapa (*2º FRP*) da secagem (Figura 43). Porém, a 1ª camada estará mais próxima de atingir essa condição do que a 2ª e 3ª camadas uma vez que a amplitude térmica naquele caso é inferior ao fim dos 30 min. Verifica-se também que, para todas as camadas monitorizadas, o valor mais elevado é atingido ao fim de 15 min de secagem.

Relativamente à resistência elétrica, obtém-se um valor ≈ 10 MΩ para a 1ª camada, ao fim de 30 min de secagem; esse valor ronda os 4,0 e 1,5 MΩ para a 2ª e 3ª camadas, respetivamente. Deste modo, pode aferir-se que, ao longo da secagem das três primeiras camadas, o valor que a

amplitude térmica assume no instante imediatamente anterior ao do início do processo de deposição da camada seguinte aumenta gradualmente (assume valores crescentes de 1,40, 3,50 e 4,45ºC, na 1ª, 2ª e 3ª camadas, respetivamente), e, por sua vez, o da resistência decresce. Isto deve-se ao facto de não ter ocorrido a total remoção da humidade da carapaça e, consequentemente, haver um excesso de água que tem de ser removido nas camadas subsequentes.

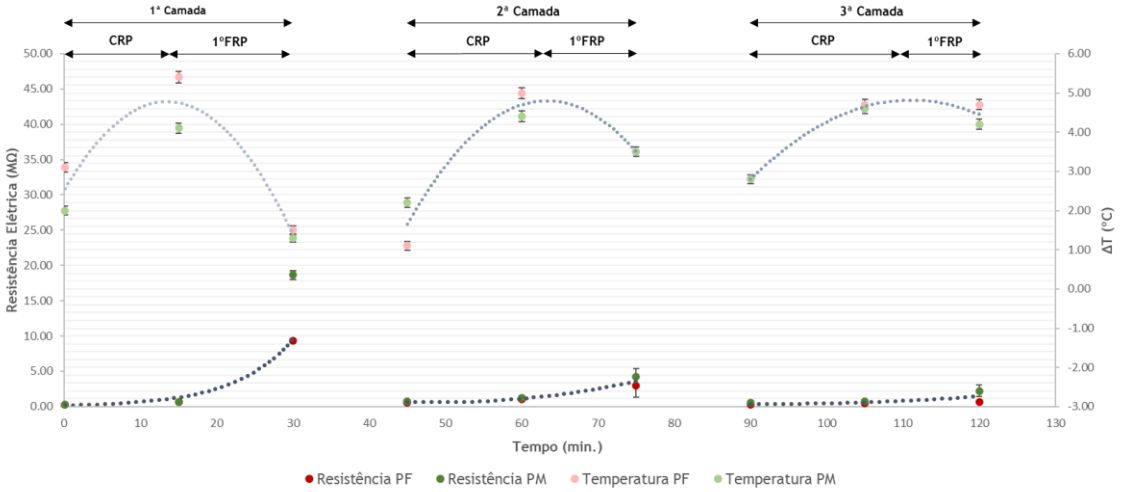


Figura 43: Variação da resistência elétrica e da temperatura das três primeiras camadas das carapaças cerâmicas, relativas à condição A, ao longo da sua secagem.

Para a condição B (Figura 44), a 1ª camada atinge a última fase de secagem a partir dos 35 min, registando-se uma estabilização da amplitude térmica (ΔT = 0,55ºC). Por sua vez, enquanto que a 2ª camada se encontra no fim do 1º *FRP* (ΔT = 0,30ºC), a amplitude térmica relativa à 3ª camada situa-se nos 4,20ºC, ao fim de 1 h, podendo-se daí concluir que, no início do processo de deposição da 4ª camada, os provetes ainda se encontram no 1º *FRP* da secagem.

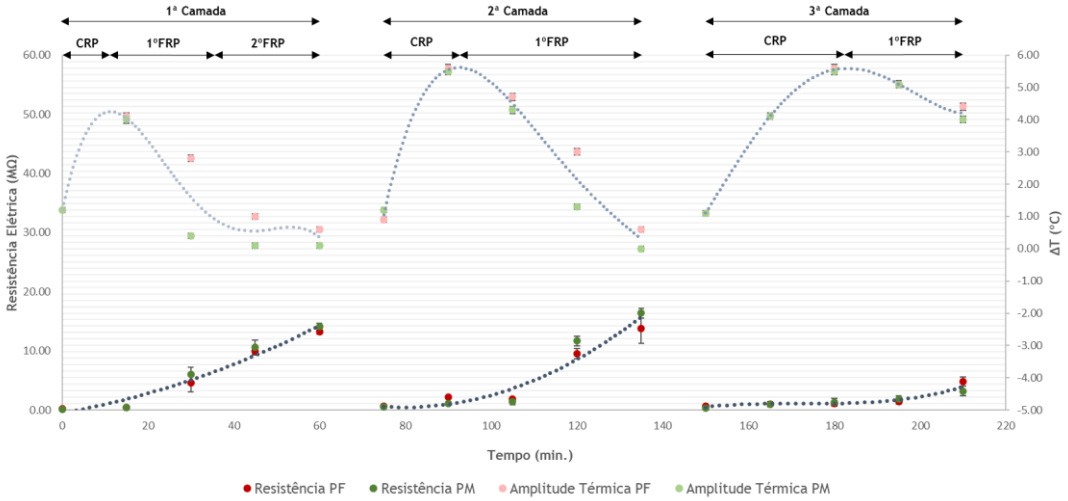


Figura 44: Variação da resistência elétrica e da temperatura das três primeiras camadas das carapaças cerâmicas, relativas à condição B, ao longo da sua secagem.

Nesta condição, a 1ª, 2ª e 3ª camadas apresentam, respetivamente uma resistência elétrica de 14, 15 e 4 MΩ, ou seja, valores consideravelmente superiores aos obtidos para as carapaças relativas à condição A. Este aumento seria expectável uma vez que a secagem, entre deposição

das três primeiras camadas, durante 1 h promove um aumento da fração de água removida e, por conseguinte, um aumento da resistência elétrica de cada uma delas ao fim deste período.

Para as condições C (Figura 45) e D (Figura 46), observa-se um comportamento bastante análogo para as 1ª e 2ª camadas. Em ambos os casos, a 1ª camada atinge a estabilização da amplitude térmica cerca de 35 min após a sua deposição. No período de secagem subsequente, e até aos 90 min (C) e 120 min (D), verifica-se um aumento mais ténue da resistência elétrica até 13 MΩ, com ΔT ≈ 0ºC.

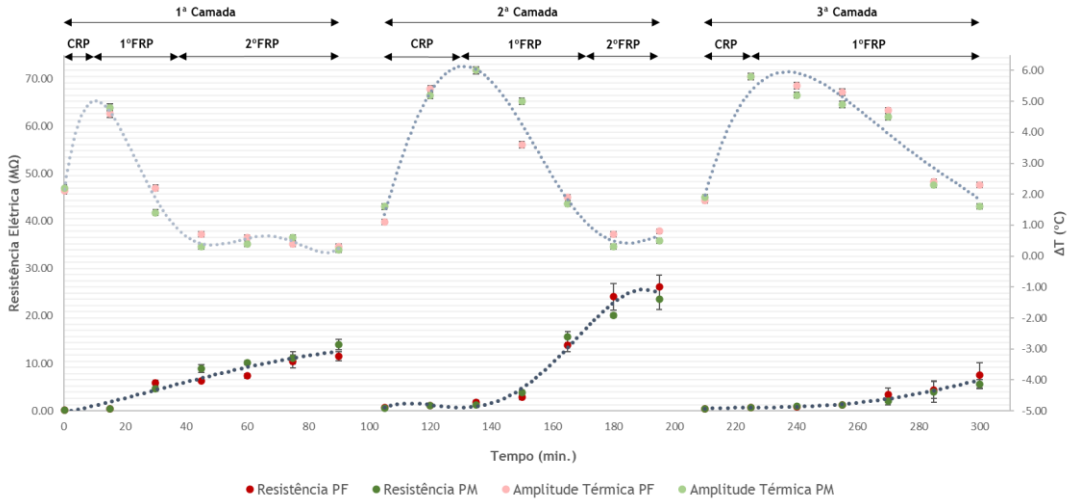


Figura 45: Variação da resistência elétrica e da temperatura das três primeiras camadas das carapaças cerâmicas, relativas à condição C, ao longo da sua secagem.

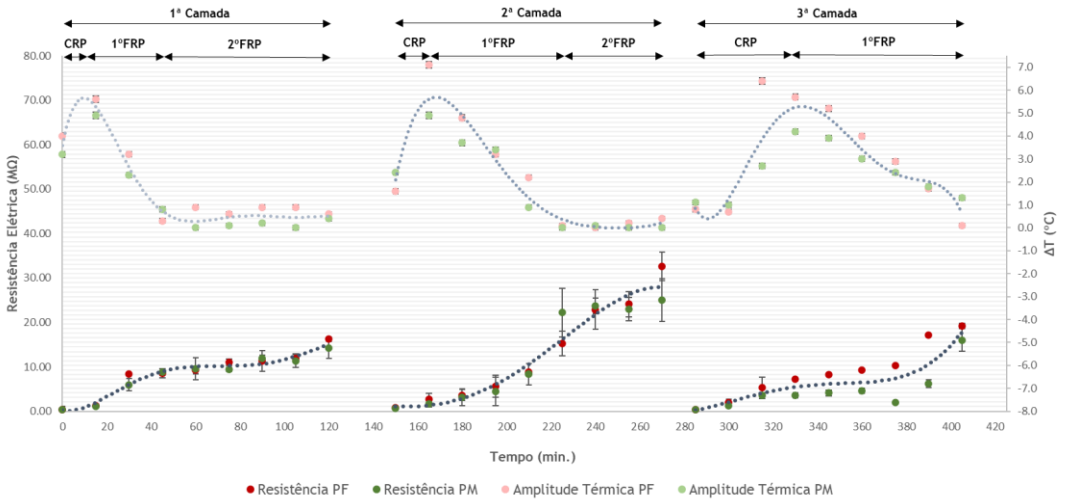


Figura 46: Variação da resistência elétrica e da temperatura das três primeiras camadas das carapaças cerâmicas, relativas à condição D, ao longo da sua secagem.

Para a 2ª camada, o 2º *FRP* tem início cerca de 75 min após o início da secagem, tanto para a condição C, como para a D, com a resistência elétrica a assumir valores, respetivamente, de ≈ 24 e 28 MΩ. À semelhança do que acontece relativamente à 1ª camada, o aumento da resistência elétrica torna-se mais discreto. Apesar daquela camada já se encontrar na última etapa do processo de secagem, verifica-se um aumento mais suave da resistência elétrica devido à água residual que vai sendo eliminada.

No que concerne à 3ª camada, regista-se uma amplitude térmica de 1,95ºC, para a condição C,

ao fim de 1,5 h, enquanto que, para a condição D, é de 0,7ºC no fim do período de secagem correspondente. Os valores de resistência elétrica são também diferentes para cada uma das condições: para a condição C, assume valores de 8 MΩ, enquanto que, para a condição D, o valor é de ≈ 18 MΩ. Esta diferença poderá dever-se à água remanescente da camada precedente, que será superior para a condição C (tempo de secagem inferior), do que para a condição D, obtendo-se, desta forma, um valor de resistência elétrica consideravelmente inferior.

Tendo em consideração que, a nível térmico, as carapaças relativas aos modelos PF e PM exibem um comportamento semelhante, serão apenas apresentados os termogramas referentes ao modelo PM (Figura 47), visto terem sido os selecionados para posterior inspeção visual.

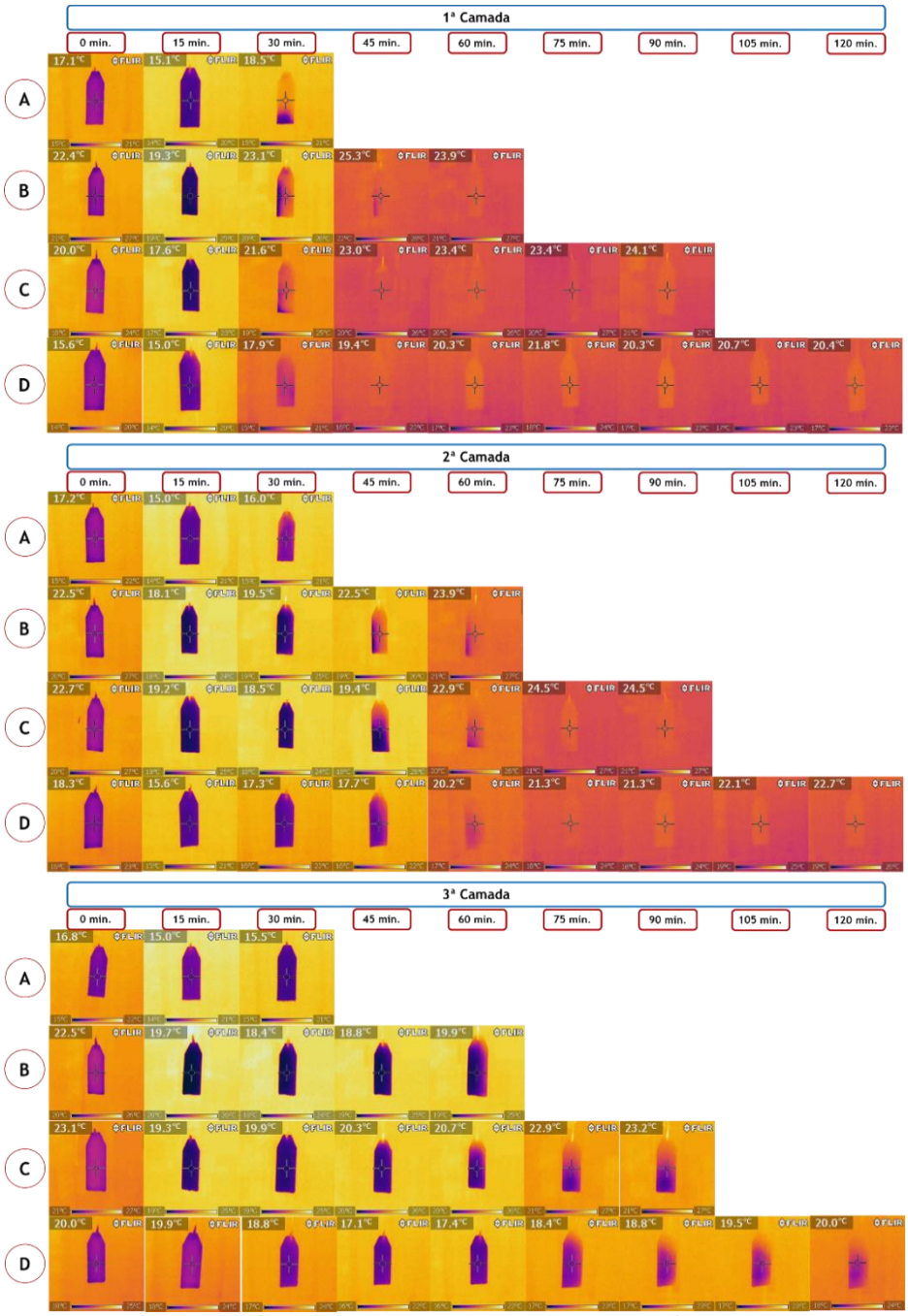


Figura 47: Termogramas relativos às três primeiras camadas das carapaças cerâmicas do modelo PM, para cada uma das condições.

Da análise dos termogramas, é notório o prolongamento do tempo de secagem até ser atingida uma tonalidade uniforme à medida que as novas camadas vão sendo depositadas. De acordo com a Figura 47, a homogeneidade dos termogramas é atingida para a 1ª camada, e para as condições B, C e D, entre os 30 e os 45 min, período coincidente com o início do *2ºFRP*, como discutido anteriormente. Para a 2ª camada, a uniformidade do gradiente de temperatura é conseguida unicamente para as condições C e D, e ocorre entre os 60 e 75 min, momento a partir do qual se verifica a estabilização da curva referente à amplitude térmica (Figuras 45 e 46). Finalmente, relativamente à 3ª camada, e no final do período de secagem estipulado, o gradiente de cores é ainda acentuado para todas as condições, o que comprova o facto da secagem desta camada ainda não se encontrar na fase final.

Face aos resultados obtidos, pode aferir-se que, quando a amplitude térmica se aproxima de zero ($\Delta T \leq 0{,}5ºC$), e se obtêm termogramas bastante homogéneos em termos de tonalidade, a secagem encontrar-se-á praticamente no fim, pelo que se poderá dar início ao processo de deposição de nova camada de refratário.

Dada a confiança na leitura obtida com a câmara termográfica relativamente ao instante em que é possível dar-se início ao processo de deposição da camada subsequente, procurou-se estabelecer uma correlação entre a amplitude térmica e a resistência elétrica das camadas cerâmicas. A Tabela 10 apresenta os valores médios dessas grandezas, e respetivos desvios padrão, obtidos sobre provetes correspondentes às condições anteriormente apresentadas.

Tabela 10: Resistência elétrica e amplitude térmica de cada camada da carapaça, para tempos de secagem distintos

		Tempo de secagem (min)			
		30	**60**	**90**	**120**
1ª camada	**R (MΩ)**	7,9 ± 3,5	10,2 ± 2,1	12,8 ± 1,3	15,4 ± 1,8
	ΔT (ºC)	1,9 ± 0,5	**0,4 ± 0,06**	0,4 ± 0,1	0,4 ± 0,2
2ª camada	**R (MΩ)**	2,5 ± 0,9	12,1 ± 2,8	24,7 ± 1,6	30,8 ± 2,3
	ΔT (ºC)	4,6 ± 0,9	1,5 ± 0,7	**0,5 ± 0,05**	0,3 ± 0,1
3ª camada	**R (MΩ)**	2,0 ± 1,4	4,1 ± 1,3	7,6 ± 1,0	16,7 ± 0,6
	ΔT (ºC)	4,5 ± 0,8	4,5 ± 02	2,6 ± 0,5	0,7 ± 0,04

Da análise da tabela, verifica-se que, relativamente à 1ª camada, se atinge uma amplitude térmica ≈ 0ºC a partir dos 60 min de secagem, a que lhe está associada uma resistência elétrica de ≈ 10 MΩ. Para a 2ª camada, o seu valor atinge os 25 MΩ ao fim de 90 min. No caso da 3º camada, não foi possível estabelecer o momento a partir do qual a amplitude térmica é < 0,5ºC.

Para o banho selante (Figura 48), a amplitude térmica assume valores ≈ 0ºC apenas ao fim de 14 h de secagem. Destaca-se o facto de o intervalo entre medições ser muito extenso (após 4 h, o registo só foi feito ao fim de 14 h), e, por isso, não há certeza relativamente ao preciso instante em que a amplitude térmica passa a ser ≈ 0ºC. Todavia, a partir deste momento, apesar de muito

suaves, continua a registar-se um aumento da resistência elétrica e uma diminuição do peso dos provetes, sem alterações significativas de termogramas. A estabilização da resistência elétrica nos 20 MΩ ocorre a partir das 18 h de secagem. A partir deste instante, e até às 46 h, não se regista variação do peso dos provetes. Ao fim deste período, observa-se uma diminuição da resistência elétrica e aumento muito suave do peso dos provetes, o que poderá indiciar a adsorção de humidade pela carapaça, o que determinou a tomada de decisão relativamente ao momento de promover a descerificação dos provetes.

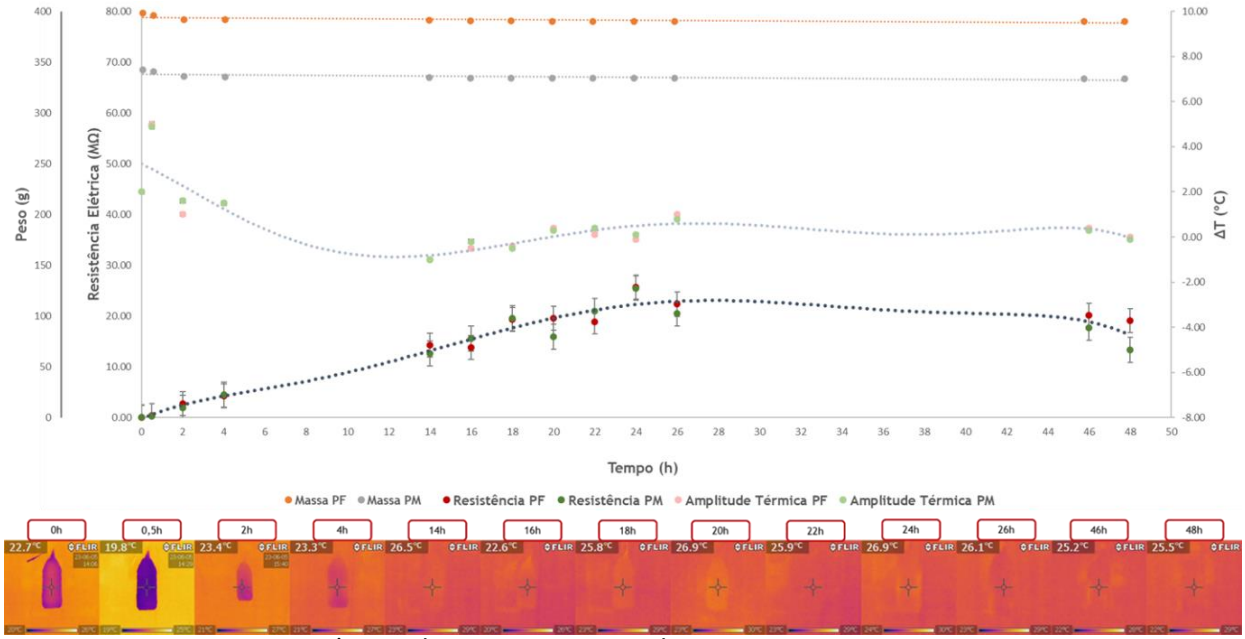


Figura 48: Variação da resistência elétrica, da amplitude térmica e do peso ao longo da secagem das carapaças cerâmicas, relativas a modelos PF e PM, após deposição do banho selante.

5.1.1 Inspeção Visual

Após descerificação, a inspeção visual da superfície interna das carapaças cerâmicas evidenciou a existência de depressões suaves, não identificáveis como defeitos *bulge* ou *buckle*. Estas pequenas depressões na *face-coat* resultam de imperfeições nos modelos de cera (Figura 49 a)).

Como referido na metodologia concernente a estes ensaios (subcapítulo 4.2.3), na produção dos modelos em cera foram utilizados moldes em resina, que não apresentam o grau de acabamento requerido, com o consequente impacto na qualidade superficial interna da carapaça cerâmica (Figura 49 b)).

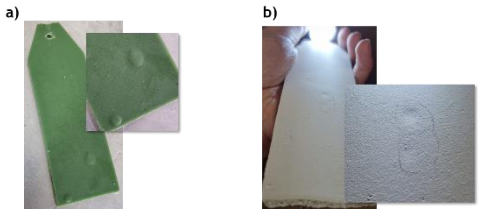


Figura 49: a) - Imperfeições no modelo em cera; b) - Defeitos na superfície interna da carapaça cerâmica.

Para além da inexistência de defeitos identificáveis como *bulge* ou *buckle*, não foi possível detetar outro tipo de defeitos associados a tempos de secagem desajustados. Os provetes apresentam geometrias simples e de reduzida massividade pelo que, muito embora o tempo de

secagem entre as três primeiras camadas seja curto, não foi suficiente para criar as condições que promovam o aparecimento de *bulge* ou de outros defeitos decorrentes do excesso de humidade na carapaça.

5.1.2 Resistência à flexão

No que concerne aos ensaios de flexão das carapaças cerâmicas, para cada uma das condições, verificou-se que a aplicação de diferentes tempos de secagem entre as três primeiras camadas não tem impacto significativo nos seus valores (Figura 50), que se situam na gama 3-4 MPa.

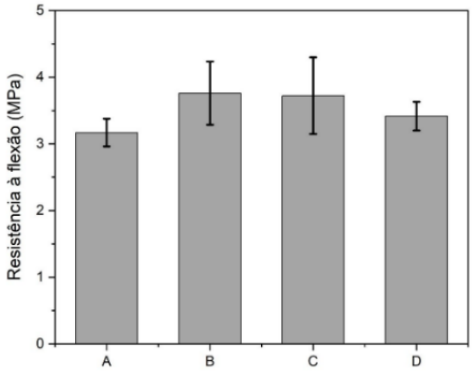


Figura 50: Resistência à flexão para as quatro condições ensaiadas em provetes de carapaças cerâmicas.

Constatou-se não ser possível estabelecer qualquer correlação entre os resultados obtidos com as condições de secagem das carapaças que potencialmente induzem a formação de defeitos. Assim, é necessário analisar o impacto da variação do tempo de secagem entre deposição de camadas na ocorrência de defeitos, para condições de produção normais.

5.2 Implementação da metodologia sobre carapaças relativas a peças de geometria simples

O ensaio anterior permitiu validar a metodologia de monitorização da secagem de provetes de carapaças cerâmicas. São agora apresentados, sob a forma de tabela, os resultados respeitantes à implementação dessa metodologia para carapaças de produção normal, o que permite uma análise mais expedita. Espera-se que, pelo facto de serem utilizados cachos tradicionais, o estabelecimento dos valores de resistência elétrica a partir dos quais será adequado prosseguir com a deposição das camadas subsequentes, a que está associada uma amplitude térmica ≤ 0,5ºC, seja mais representativo do valor de referência a considerar em novas produções.

São apresentados nas Tabelas 11 a 13 os valores médios dos parâmetros mencionados, para cada uma das geometrias, e para cada um dos intervalos de tempo de secagem entre camadas adotado. A título de exemplo, são ainda apresentados na Figura 51 os termogramas obtidos para a geometria B, para um tempo de secagem entre camadas de 3 h, permitindo ter uma visão mais abrangente do que acontece também para as outras condições.

Da análise da Tabela 11 constata-se que, a partir dos 120 min, e para as duas primeiras camadas, será aceitável passar à deposição da camada subsequente já que a amplitude térmica ao fim deste período assume valores < 0,5ºC. Porém, em relação à 3ª camada, estes valores só são

atingidos ao fim de 180 min. No que diz respeito à resistência elétrica, para o instante em que se verifica uma amplitude térmica ≈ 0ºC, ela assume valores de cerca de 63 MΩ, para a 1ª camada, e de 67 MΩ, para a 2ª e 3ª camadas.

Tabela 11: Resistência elétrica e amplitude térmica de cada camada da carapaça cerâmica, relativa à geometria A, para tempos de secagem distintos

			Tempo de secagem (min)		
			30	**120**	**180**
A	*1ª camada*	**R (MΩ)**	21,6 ± 0,7	63,4 ± 6,3	61,0 ± 0,02
		ΔT (ºC)	4,6 ± 1,0	**0,2 ± 0,2**	0,2 ± 0,08
	2ª camada	**R (MΩ)**	2,1 ± 0,4	67,0 ± 2,8	58,8 ± 0,02
		ΔT (ºC)	5,1 ± 1,2	**0,3 ± 0,2**	0,1 ± 0,08
	3ª camada	**R (MΩ)**	2,0 ± 0,05	64,0 ± 6,1	67,0 ± 0,02
		ΔT (ºC)	4,9 ± 0,8	1,9 ± 1,9	**0,1 ± 0,07**

Para as carapaças relativas à geometria B (Tabela 12), a amplitude térmica ≈ 0ºC é alcançada ao fim de 2 h, para a 1ª camada, e apenas ao fim de 3 h para as duas seguintes, tal como comprovado pelos termogramas patentes na Figura 51. De notar que, para a 2ª camada, a amplitude térmica alvo (0,5ºC) terá sido atingida pouco depois dos 120 min, o que é suportado pela proximidade entre os valores da resistência elétrica obtidos nesse instante para as carapaças relativas às geometrias B (63,2 MΩ) e A (67,0 MΩ). Em relação aos valores obtidos, para o instante em que se atinge uma amplitude térmica ≈ 0ºC, verifica-se que a resistência elétrica assume valores de 59 MΩ, 66 MΩ e 52 MΩ, para a 1ª, 2ª e 3ª camadas, respetivamente.

Tabela 12: Resistência elétrica e amplitude térmica de cada camada da carapaça cerâmica, relativa à geometria B, para tempos de secagem distintos

			Tempo de secagem (min)		
			30	**120**	**180**
B	*1ª camada*	**R (MΩ)**	19,5 ± 0,7	59,0 ± 3,7	61,7 ± 0,02
		ΔT (ºC)	5,1 ± 0,1	**0,25 ± 0,05**	0,1 ± 0,08
	2ª camada	**R (MΩ)**	2,2 ± 0,3	63,2 ± 3,9	65,9 ± 0,02
		ΔT (ºC)	5,6 ± 0,7	0,6 ± 0,2	**0 ,1 ± 0,08**
	3ª camada	**R (MΩ)**	2,9 ± 0,08	50,3 ± 5,0	51,5 ± 0,02
		ΔT (ºC)	5,4 ± 1,1	2,15 ± 1,1	**0,2 ± 0,07**

Por fim, para as carapaças relativas à geometria C, o comportamento é ligeiramente diferente (Tabela 13). Ao contrário do que acontecia nos casos anteriores, para esta geometria verifica-se que a primeira amplitude térmica indicativa de que o processo pode prosseguir é alcançada, para todas as camadas, ao fim de 120 min. Como referido na metodologia (Capítulo 4.2.4), o cacho correspondente a esta geometria é constituído unicamente por 12 modelos, permitindo, desta forma, um maior espaçamento entre si, facilitando a circulação de ar e, consequentemente,

promovendo uma secagem mais rápida da 2ª e 3ª camadas. No que concerne à resistência elétrica, os valores obtidos para as três primeiras camadas, e para os 120 min de secagem são, respetivamente, de 58, 64 e 57 MΩ.

Tabela 13: Resistência elétrica e temperatura de recuperação médias ao fim dos tempos de secagem considerados para a geometria C

			Tempo de secagem (min)		
			30	**120**	**180**
C	*1ª camada*	**R (MΩ)**	20,3 ± 3,2	57,6 ± 4,7	57,1 ± 0,02
		ΔT (°C)	5,2 ± 0,7	**0,3 ± 0,2**	0,2 ± 0,08
	2ª camada	**R (MΩ)**	1,6 ± 0,4	63,8 ± 4,5	67,4 ± 0,02
		ΔT (°C)	5,4 ± 0,7	**0,3 ± 0,2**	0,1 ± 0,08
	3ª camada	**R (MΩ)**	2,0 ± 0,3	57,3 ± 6,0	73,8 ± 0,02
		ΔT (°C)	4,8 ± 1,1	**0,3 ± 0,2**	0,2 ± 0,07

Tomando em consideração o supracitado, é possível aferir que os valores de resistência elétrica apresentam variabilidade de acordo com a geometria, não havendo uma clara evidência da forma como se correlacionam. Desta forma, neste estudo, não foi possível definir o valor de resistência elétrica a partir do qual o fabrico da carapaça cerâmica pode prosseguir, e que esteja associado, por sua vez, a uma amplitude térmica ≈ 0ºC. Assim sendo, a monitorização da secagem de cada camada através da medição da resistência elétrica vai requerer um acompanhamento contínuo e apenas garantindo que, só após a sua estabilização, poder-se-á prosseguir com a produção da carapaça. Uma vez mais, os resultados da termografia demonstram ser mais fidedignos do que a medição da resistência elétrica.

Relativamente aos resultados da termografia, da análise das imagens patentes na Figura 51, torna-se evidente que, ao fim de 30 min, a carapaça não está, de todo, seca dada a heterogeneidade de tonalidades nos termogramas relativos a cada uma das camadas. Para além disso, a cor azulada prevalecente no início da secagem de cada uma das camadas, e correspondente a uma temperatura consideravelmente mais baixa, prenuncia que ainda está a processar-se a transferência de água livre da superfície da camada de cerâmico para o meio ambiente.

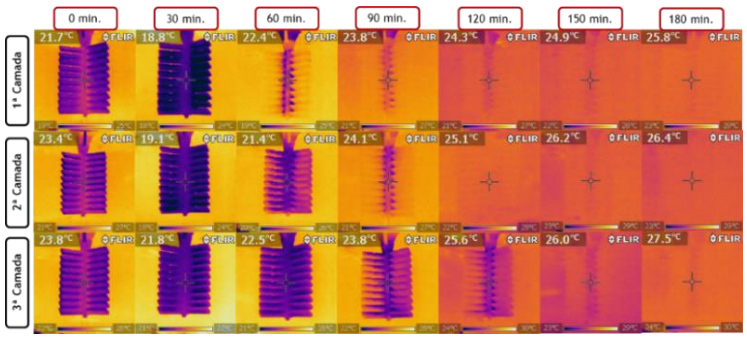


Figura 51: Termogramas relativos às carapaças das palhetas com geometria B, para diferentes tempos de secagem.

Ao fim de 120 min, e para as duas primeiras camadas, o termograma já se apresenta bastante uniforme e com uma tonalidade alaranjada, significando que a transferência de massa já é mais diminuta. Porém, verifica-se que, para a 3ª camada, o gito de descida apresenta uma tonalidade mais azulada, em comparação com o resto do cacho, o que significa que esta zona ainda não está devidamente seca. Transcorridos 180 min, os termogramas afiguram-se homogéneos para todas as camadas pelo que estão reunidas as condições para prosseguir com o fabrico da carapaça. Entretanto, de realçar que a tomada de decisão deverá ter sempre em consideração as zonas mais críticas da carapaça em termos de secagem.

No que concerne ao banho selante, da análise da Tabela 14, constata-se que, de uma forma geral, as carapaças cuja secagem se estendeu por 24 h, previamente à descerificação, são as que apresentam menor resistência elétrica (≈ 10 MΩ), comparativamente às que ficaram a secar durante uma semana (resistência elétrica ≈ 20 MΩ). Este facto é ainda mais notório no caso das carapaças que foram submetidas a secagens intermédias das suas camadas durante 30 min, cuja resistência elétrica se situa na gama 5-8 MΩ, ao fim de 24 h de secagem, atingindo valores ≈ 20 MΩ, ao fim de uma semana. Estes resultados são perfeitamente expectáveis pois, quanto mais extenso for o período de secagem, tanto entre camadas como após selagem, menor deverá ser o teor de humidade da carapaça cerâmica.

Nos ensaios anteriores, realizados sobre os provetes, verificou-se que, a partir de certo momento, a resistência elétrica estabiliza em torno dos 20-25 MΩ. Neste caso (Figura 52), verificou-se que, 94 h após a imersão da carapaça no banho selante e até ao fim de uma semana, a resistência elétrica se manteve praticamente constante. Porém, de realçar que, depois do controlo ao fim de 24 h, só voltou a efetuar-se após 94 h, não sendo por isso possível determinar o exato instante a partir do qual o valor desta grandeza estabiliza.

Tabela 14: Resistência elétrica e amplitude térmica para cada uma das geometrias, e para cada uma das condições após a deposição do banho selante

		Tempo de secagem (min)					
		30 min		***120 min***		***180 min***	
		24 h	**168 h**	**24 h**	**168 h**	**24 h**	**168 h**
A	**R (MΩ)**	5,1 ± 2,5	19,6 ± 2,3	10,8 ± 2,3	21,6 ±2,6	9,3 ± 2,0	19,3 ± 3,2
	ΔT (ºC)	0 ± 0,2	0 ± 0,2	0,2 ± 0,2	0,8 ± 0,2	0,9 ± 0,2	0,2 ± 0,2
B	**R (MΩ)**	8,4 ± 4,7	21,3 ± 4,7	10,1 ± 3,3	19,8 ± 7,2	12,6 ± 2,1	20,0 ± 3,6
	ΔT (ºC)	0,3 ± 0,2	0,1 ± 0,2	0,3 ± 0,2	0,5 ± 0,2	0,6 ± 0,2	0,2 ± 0,2
C	**R (MΩ)**	4,6 ± 1,2	20,5 ± 2,3	13,1 ± 2,5	19,0 ± 1,1	9,3 ± 2,0	19,3 ± 3,2
	ΔT (ºC)	0,8 ± 0,2	0,2 ± 0,2	0,9 ± 0,2	0,6 ± 0,2	0,8 ± 0,2	0,3 ± 0,2

Relativamente à amplitude térmica, verificou-se que, para a maioria das condições, a amplitude térmica é ≈ 0ºC. No entanto, foram identificadas situações em que o seu valor é > 0,5ºC, que estão devidamente assinaladas na Tabela 14. Assim, torna-se pertinente verificar se,

associada a estas amplitudes térmicas, terá havido ocorrência de defeitos. Esta análise é apresentada mais adiante, na inspeção visual dos fundidos (subcapítulo 5.2.1).

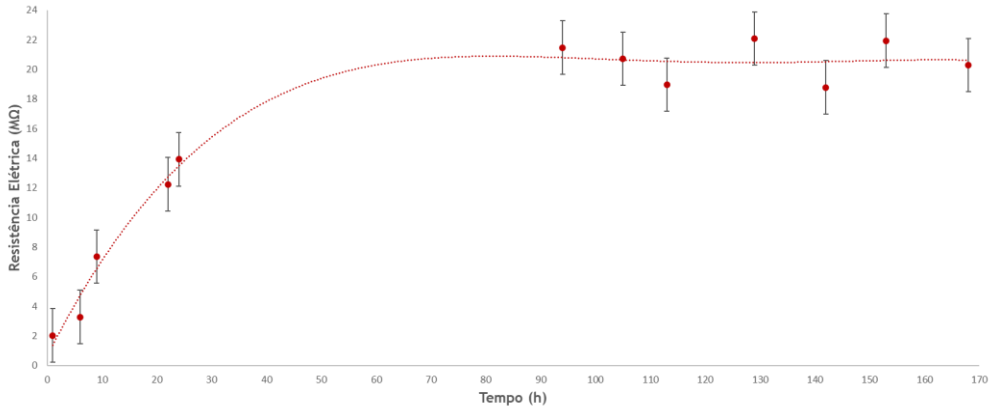


Figura 52: Variação da resistência elétrica de carapaça cerâmica após a deposição do banho selante, em função do tempo.

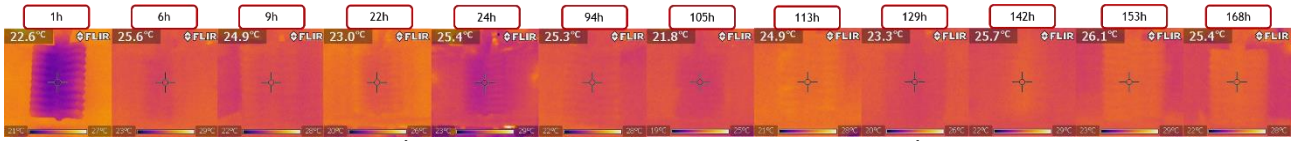


Figura 53: Termogramas relativos às carapaças das palhetas com geometria B, após a deposição do banho selante, para diferentes tempos de secagem.

De acordo com Brienza, *et al.*[22], a partir do momento em que a condutividade estabiliza, a secagem da carapaça cerâmica estará praticamente terminada. Assim, pode considerar-se que, no final do seu processo de fabrico, quando se registam amplitudes térmicas ≈ 0ºC ou valores de resistência elétrica entre 20-25 MΩ, a carapaça estará seca e apta para a etapa subsequente.

5.2.1 Inspeção visual

Neste ponto, procurou-se avaliar a adequação da radioscopia à inspeção da superfície interna das carapaças cerâmicas após descerificação, visando identificar a eventual ocorrência de defeitos suscetíveis de potenciarem a produção de fundidos não conformes. Constatou-se que, apesar deste tipo de análise ser um método expedito para a inspeção de fundidos, o mesmo não acontece relativamente às carapaças cerâmicas.

Da análise das imagens obtidas a partir da aplicação deste método de inspeção, verifica-se que algumas irregularidades presentes na superfície interna da carapaça cerâmica não têm repercussão na ocorrência de defeitos nos fundidos (Figura 54); noutros casos, foram identificadas deformações mais pronunciadas e que, efetivamente, se repercutiram em defeitos nas peças metálicas (Figura 55). Finalmente, houve ainda situações em que uma carapaça, aparentemente sã, deu origem a defeitos (Figura 55- C (2)).

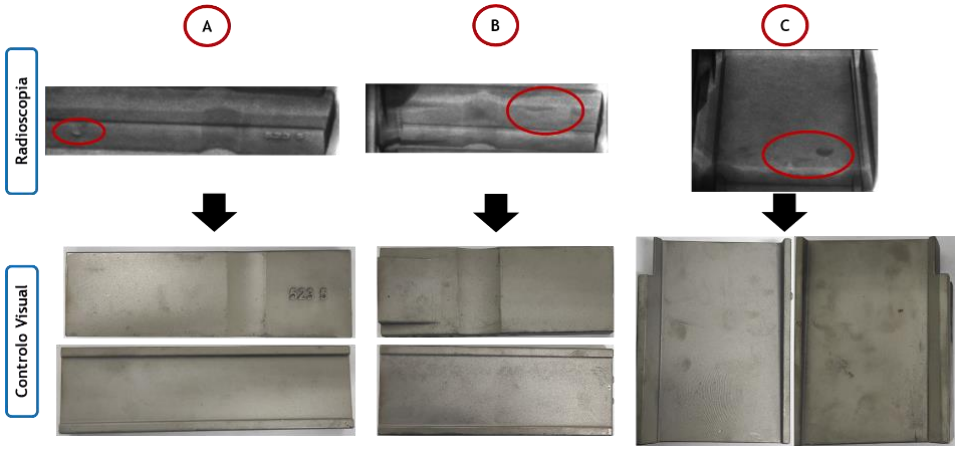


Figura 54: Exemplos de deformações nas carapaças mas sem repercussão, em termos de defeitos, nos fundidos.

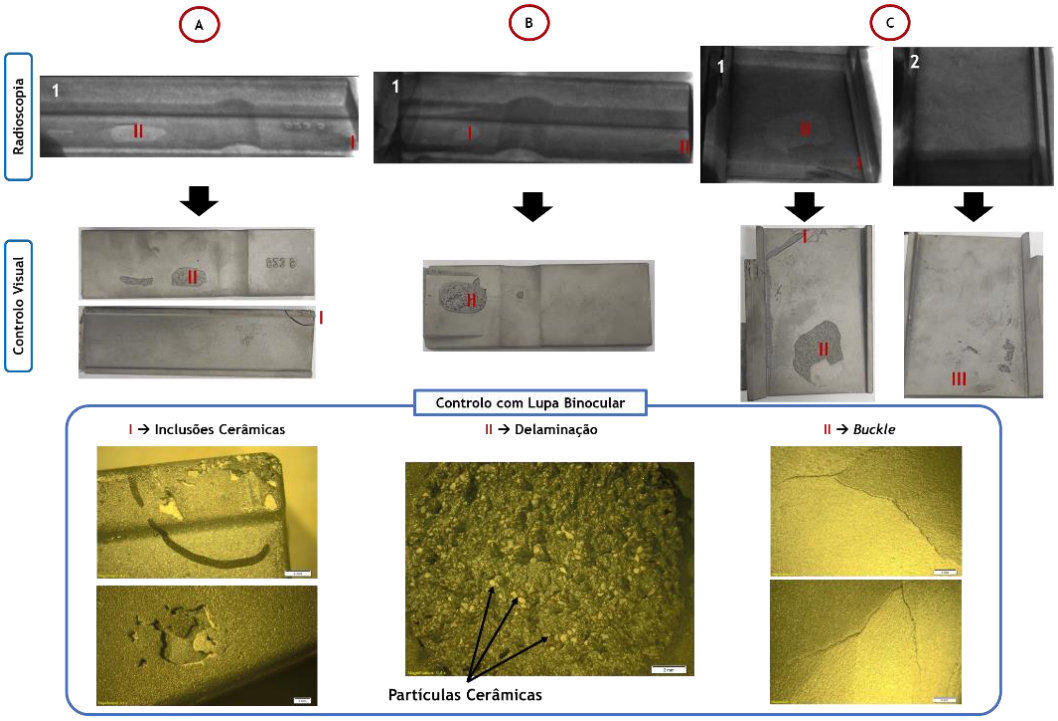


Figura 55: Imagens da superfície interna de carapaças, obtidas por radioscopia, e de defeitos nos fundidos com potencial origem em irregularidades dessa superfície.

O controlo visual dos fundidos permitiu identificar: inclusões não metálicas, delaminação e *buckle*. Na Figura 55, é possível observar a presença de pequenos fragmentos de cerâmicos depositados nas extremidades da cavidade moldante, resultantes da delaminação (II) associada à fissuração da *face-coat*. Uma vez que não é possível remover estes fragmentos sem comprometer a integridade da carapaça, os fundidos apresentarão, por conseguinte, inclusões cerâmicas (I). A observação destes defeitos em lupa binocular permitiu a sua melhor caracterização.

Desta forma, é possível aferir que, apesar da radioscopia ser um método de análise volumétrico não destrutivo utilizado na inspeção de peças metálicas, a sua utilização em carapaças cerâmicas é limitada pelo facto do detalhe da imagem e, consequentemente, o rigor da análise, ser afetado por fatores como: irregularidade e porosidade do material, disposição e/ou sobreposição dos modelos e variações de espessura.

Em termos de quantificação de peças metálicas não-conformes, os gráficos apresentados na

Figura 56 apresentam as frações de peças defeituosas e das que não apresentam defeito, para cada uma das geometrias analisadas, tomando em consideração a duração dos períodos de secagem entre a deposição das três primeiras camadas e após selagem. Da sua análise, torna-se evidente que o tempo de secagem entre a deposição de camadas cerâmicas tem elevado impacto sobre a taxa de refugo, nomeadamente para as geometrias B e C. Verifica-se igualmente que, para tempos de secagem entre camadas de 30 min, e, posteriormente, de 24 h até à descerificação, a fração de peças defeituosas é de 61, 89 e 100% para as geometrias A, B e C, respetivamente. Quando este último período é estendido para uma semana, regista-se um decréscimo, pela mesma ordem, da fração de peças defeituosas para 23, 47 e 83%.

Nos casos em que se aplicou um tempo de secagem entre camadas de 2 h e 3 h, não se observou a ocorrência de qualquer tipo de defeito daí decorrente, independentemente da extensão do período de secagem até à descerificação.

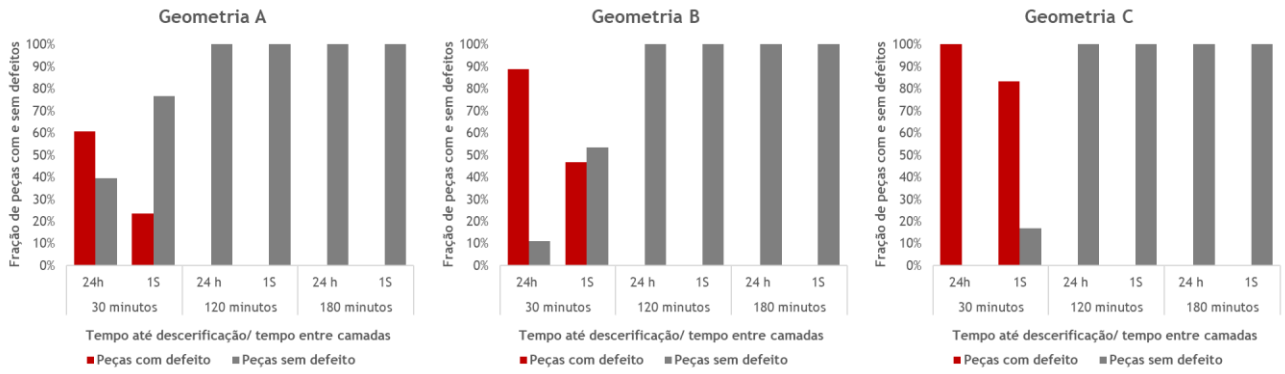


Figura 56: Variação da taxa de refugo de fundidos, em função das condições de fabrico das carapaças cerâmicas para cada uma das geometrias.

Dado que a duração dos períodos de secagem intermediários habitualmente utilizados pela empresa é de 2 h, não seria expectável a inexistência de defeitos nos fundidos uma vez que, como referido anteriormente, nesta condição, e para as geometrias em questão, é recorrente o aparecimento de defeitos *bulge e buckle*. Assim, coloca-se a questão da carga do forno, durante a descerificação, poder constituir igualmente uma condicionante ao aparecimento deste tipo de defeitos. Para além disso, constatou-se que as condições que induziram uma amplitude térmica > 0,5ºC (assinaladas na Tabela 14) não têm a si associada a ocorrência de defeitos nos fundidos. Desta forma, será necessário perceber qual a amplitude térmica máxima a ser estipulada para o controle do grau de secagem das carapaças cerâmicas sem comprometer a integridade dos fundidos.

Em virtude desta quantificação de defeitos, poderá assumir-se que, quando assegurada a secagem entre as três primeiras camadas, o tempo até à descerificação poderá ser minimizado. Deste modo, considerando períodos de secagem entre camadas de 2/3 h, e de 24 h até à descerificação, será possível encurtar em ≈ 56% o tempo necessário à disponibilização de carapaças cerâmicas para o vazamento do metal líquido.

5.3 Implementação da metodologia no sistema produtivo

Primeiramente, são apresentadas na Tabela 15 as condições de temperatura e humidade relativa registadas durante a deposição das três primeiras camadas para cada conjunto de cachos, a correspondente humidade absoluta, bem como o tempo de secagem necessário para atingir a homogeneidade de cores dos termogramas. Pela sua análise, pode constatar-se que, aquando da produção das carapaças relativas à condição A, as condições atmosféricas eram ligeiramente superiores às da condição B, para todas as camadas. As alterações destas condições ambientais interferem com a amplitude térmica. Para a condição A, a humidade absoluta é superior para todas as camadas comparativamente à da condição B (aproximadamente 9 g/m^3 para A, variando entre 7 e 8 g/m^3, para B). Verificou-se, também, que o período de secagem entre camadas para a condição A é superior ao obtido para a condição B. Uma vez que amplitude térmica é superior para a condição A, a transferência de massa do interior da carapaça para o exterior é dificultada, e, daí um período de secagem mais extenso para se atingir amplitudes térmicas ≈ 0ºC. Assim, espera-se que, quanto menor a humidade absoluta, menor a duração da secagem.

Tabela 15: Temperatura, humidade relativa e humidade absoluta do meio ambiente aquando da construção das carapaças para os cachos dos conjuntos A e B, e respetivos tempos de secagem para cada uma das camadas

	A			B			Secagem (min)	
	T (ºC)	*RH (%)*	*AH (g/m^3)*	*T (ºC)*	*RH (%)*	*AH (g/m^3)*	A	B
1ª camada	22,9 ± 1,0	47,6 ± 3,4	9,7 ± 0,2	22,5 ± 0,3	44,0 ± 2,9	8,8 ± 0,6	100	80
2ª camada	24,0 ± 0,2	44,6 ± 4,4	9,7 ± 1,0	22,7 ± 0,1	35,5 ± 1,4	7,2 ± 0,3	150	100
3ª camada	23,7 ± 0,1	42,7 ±2,2	9,1 ± 0,4	23,4 ± 0,5	37,3 ± 3,8	7,8 ± 0,7	180	160

Para além disso, uma vez mais, constata-se que, à medida que novas camadas de material cerâmico vão sendo depositadas, mais extenso será o período de secagem para alcançar amplitudes térmicas entre a carapaça cerâmica e o meio ambiente mais reduzidas.

A título exemplificativo, são apresentados na Figura 57 os termogramas obtidos para as carapaças relativas à condição B, bem como os tempos de secagem associados à obtenção da homogeneidade de tonalidades nos mesmos. Como seria de esperar, a carapaça não seca uniformemente, sendo possível identificar, a partir da análise dos termogramas, os locais mais críticos do cacho.

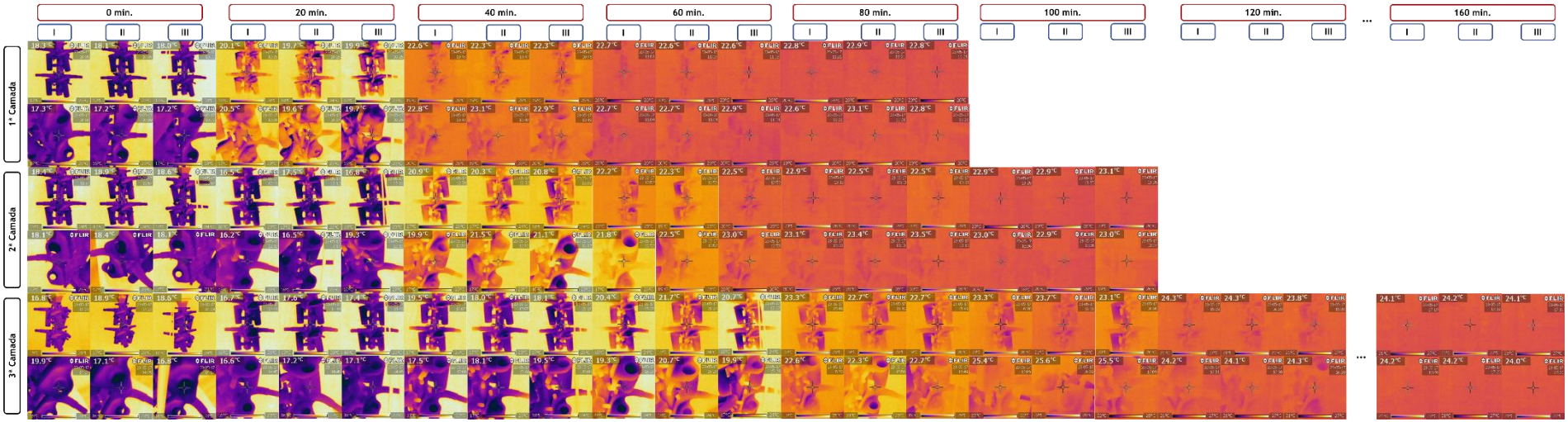


Figura 57: Termogramas relativos às três primeiras camadas, para o conjunto de carapaças relativas à geometria B e para cada uma das posições analisadas (Figura 42 c)).

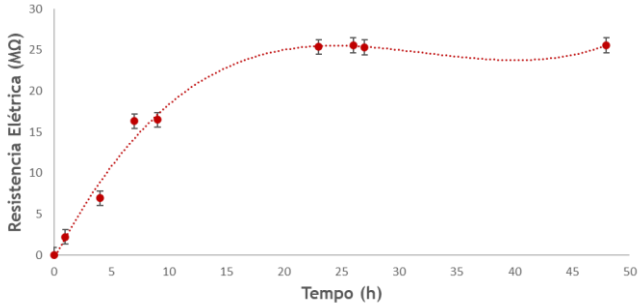


Figura 58: Variação da resistência elétrica da carapaça cerâmica, em função do tempo de secagem após a deposição do banho selante para a condição B.

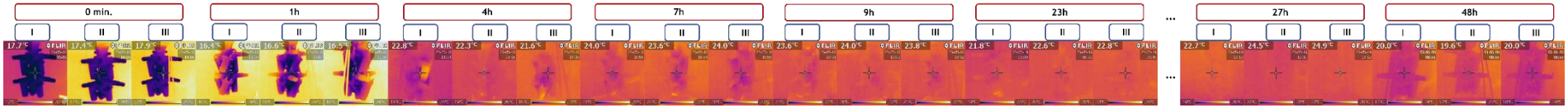


Figura 59: Termogramas relativos às carapaças cerâmicas após a sua imersão no banho selante e até à descerificação, para a condição B.

A monitorização da resistência elétrica e da amplitude térmica no fim da produção das carapaças cerâmicas permitiu estabelecer, para ambas as condições, que a descerificação podia ser efetuada a partir de 48 h após a sua imersão no banho selante. Este tempo foi determinado tendo por base a estabilização da resistência elétrica em valores ≈ 25 MΩ, e a homogeneidade dos termogramas em todas as direções. Da análise do gráfico da Figura 58 verifica-se que, ao fim de um período de 24 h de secagem, é obtido o primeiro valor de resistência elétrica desejável, e os termogramas correspondentes já se apresentam bastante homogéneos (Figura 59). Todavia, uma vez que transcorre um período de 15 h entre este registo e o imediatamente anterior, não foi possível determinar o exato instante a partir do qual ocorre a estabilização da resistência elétrica. Por este motivo, a monitorização de ambos os conjuntos continuou até às 48 h, ao fim das quais se confirmou a estabilidade do valor da resistência elétrica e da tonalidade dos termogramas, permitindo prosseguir com a descerificação de acordo com o procedimento definido pela FERESPE.

5.3.1 Inspeção Visual

O controlo visual dos fundidos identificou 21% de peças com defeitos *bulge* e *buckle*, para a condição A, e 0% de peças defeituosas para a condição B (Figura 60 a)). Dada a discrepância entre a fração de fundidos não conformes para cada um das situações, e tendo em conta que a única variável foi a alteração do número de respiros, pode assumir-se que o aparecimento de defeitos *bulge* e *buckle* poderá depender igualmente das pressões que se desenvolvem durante a descerificação. Como ilustrado na Figura 60 b), este tipo de defeito surge nas zonas mais maciças da peça, o que reforça a importância da colocação de respiros para escoamento da cera durante a descerificação.

A observação à lupa binocular permitiu ter uma melhor perceção da configuração deste defeito presente à superfície da peça metálica. Enquanto o *buckle* se distingue por haver fissuração e empolamento da *face-coat*, no *bulge*, não se regista fissuração, e o empolamento é mais suave.

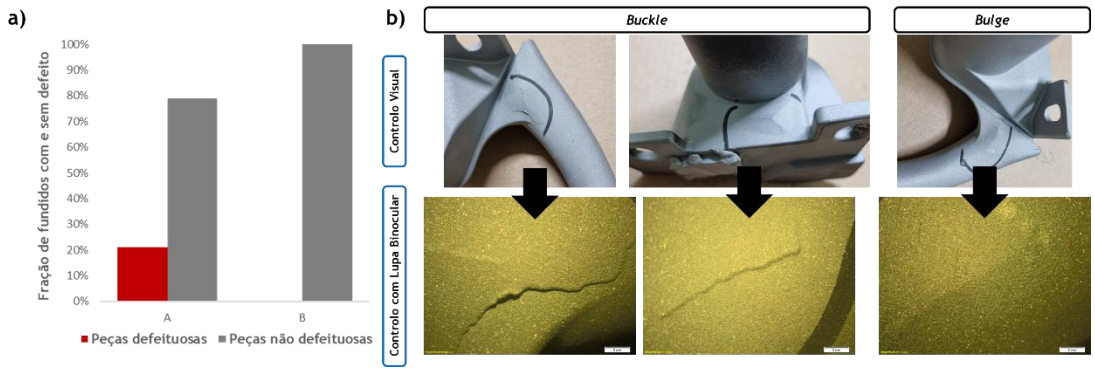


Figura 60: a) - Fração de peças não conformes de acordo com o conjunto de cachos; b) - Controlo visual e localização dos defeitos identificados nos fundidos.

Com base nos resultados obtidos nesta análise, confirma-se que o aparecimento destes dois tipos de defeitos poderá também estar associado ao número de respiros de cada carapaça, que variará em função da massividade dos modelos. Deste modo, na fase de projeto, deve ser

delineada a correta disposição dos respiros e, assim, minimizar o impacto que as sobretensões possam ter na integridade da carapaça cerâmica e, consequentemente, na qualidade dos fundidos.

6 Conclusão

A minimização da ocorrência de defeitos em *IC* é um processo complexo devido ao elevado número de etapas inerentes. As condições de produção das carapaças cerâmicas afiguram-se cruciais e com elevado impacto nas suas propriedades mecânicas e sanidade da sua superfície interna, com repercussão na qualidade dos fundidos. O controlo da secagem das diferentes camadas que compõem as carapaças cerâmicas é um dos pontos fulcrais a ter em consideração no seu fabrico.

A realização deste estudo mostrou que o recurso à termografia é um método expedito e fidedigno para a monitorização do processo de secagem das carapaças cerâmicas. A utilização desta técnica neste contexto é algo inovadora, trazendo oportunidades em termos de melhoria do processo de fabrico de carapaças cerâmicas.

Relativamente à monitorização da secagem das carapaças cerâmicas, através da medição da resistência elétrica das diferentes camadas cerâmicas depositadas, não foi possível estabelecer o valor limite a partir do qual será possível prosseguir com a produção das carapaças cerâmicas sem risco de ocorrência de defeitos que possam comprometer a qualidade superficial dos fundidos a produzir.

Uma vez asseguradas as adequadas condições de secagem entre deposição de camadas, poder-se-á encurtar o período de secagem, que medeia a imersão no banho selante e a descerificação, promovendo-se assim um aumento de produtividade, em pelo menos 56%, encurtando assim o tempo necessário para a disponibilização de carapaças para o vazamento do metal.

A ocorrência de defeitos *bulge* e *buckle* estará associada a um conjunto de fatores, nomeadamente: tempo de secagem, carga do forno na descerificação e número e posicionamento de respiros das carapaças. Este último fator será tanto mais importante quanto maior a massividade dos modelos. O ajuste do número e do posicionamento de respiros permitirá atenuar o problema de sobrepressões durante a descerificação, bem como durante o vazamento, com a consequente redução da taxa de refugo.

7 Trabalhos futuros

Neste estudo foram abordadas diferentes metodologias de monitorização do processo de secagem de carapaças cerâmicas utilizadas em *IC*, tendo em vista um aumento de produtividade e um decréscimo da taxa de refugo.

Este trabalho foi desenvolvido em condições ambientais relativamente amenas na medida em que os ensaios decorreram durante a primavera. A variação pouco significativa destas condições não conduziu a alterações relevantes nas curvas da evolução da resistência elétrica e da amplitude térmica ao longo da secagem das carapaças cerâmicas. Torna-se assim pertinente avaliar o

impacto de condições ambientais mais extremas sobre essas grandezas.

Por sua vez, os ensaios de flexão em três pontos, realizados para as diferentes condições, evidenciaram que não existe variação significativa do valor da resistência das carapaças cerâmicas com as condições de secagem utilizadas. Todavia, este tipo de ensaio não é totalmente representativo do comportamento da carapaça cerâmica ao longo de todo o seu processamento uma vez que, ao longo do ensaio, a carga aplicada fica circunscrita a uma zona específica da carapaça. Após o seu fabrico, toda a superfície da carapaça cerâmica em contacto com os modelos em cera ficará sujeita, durante a descerificação e, posteriormente, no vazamento do metal a temperaturas elevadas, a elevadas pressões. De modo a averiguar de um modo mais fiável o desempenho das carapaças, de acordo com as condições a que serão submetidas ao longo de todo o processo de produção em *IC*, é aconselhável que se realizem ensaios de flexão em quatro pontos.

Tal como mencionado, no subcapítulo respeitante aos ensaios sobre carapaças relativas a peças de geometria simples, seria expectável a ocorrência de defeitos visto que estas peças seriam as mais propícias à formação de *bulge* e *buckle*, de acordo com o historial da empresa. A única variável nestes ensaios foi a carga do forno de descerificação (três carapaças/carga). Face aos resultados obtidos, seria relevante a realização de um estudo com enfoque no impacto que a carga do forno de descerificação terá na integridade das carapaças cerâmicas e, posteriormente, na potencial ocorrência de defeitos nos fundidos.

Ao longo de todo o trabalho, considerou-se que a secagem das camadas cerâmicas poderia ser dada por concluída para um valor de amplitude térmica ≤ 0,5ºC, tanto para as três primeiras camadas, como após imersão no banho selante. Porém, verificou-se, nos ensaios sobre carapaças relativas a peças de geometria simples, que, após o período de secagem do banho selante, a amplitude térmica apresentava valores superiores ao estipulado. Deste modo, sugere-se determinar o valor máximo de amplitude térmica a ser adotado, ao longo da produção da carapaça, bem como após a imersão no banho selante, sem qualquer comprometimento em termos da sua integridade. Caso seja possível estabelecer um valor mais elevado a partir do qual pode prosseguir o fabrico da carapaça, será possível aumentar um pouco mais a produtividade.

O estudo em questão restringiu-se à monitorização da resistência elétrica e da amplitude térmica das três primeiras camadas por se considerar que estas são de capital importância na ocorrência de defeitos nos fundidos. Afigura-se de enorme interesse um estudo sobre a necessidade de controlo da amplitude térmica entre a deposição da 4ª camada até à imersão no banho selante de modo a validar a metodologia atualmente adotada pela empresa ao promover secagens intermédias, com uma duração de 2 h, nessa fase do processo de produção de carapaças cerâmicas.

Referências Bibliográficas

[1] FERESPE, «Company», *FERESPE*, 2023. https://ferespe.com/company (acedido a 3 de abril de 2023).

[2] FERESPE, «Investment Castings», *FERESPE*, 2023. https://ferespe.com/company/ (acedido a 3 de abril de 2023).

[3] R. Prasad, «Progress in Investment Castings», em *Science and Technology of Casting Processes*, Aero Metals Inc., Ed., USA: InTech, 2012. doi: 10.5772/50550.

[4] L. F. Moreira, «Desenvolvimento da metodologia de fabrico de protótipos de torneiras pelo Processo da Cera Perdida», Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, FEUP, Porto, 2014.

[5] S. Pattnaik, D. B. Karunakar, e P. K. Jha, «Developments in Investment Casting process - A review», *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, n. 11. pp. 2332–2348, novembro de 2012. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.06.003.

[6] S. Jones e C. Yuan, «Advances in shell moulding for investment casting», *J Mater Process Technol*, vol. 135, pp. 258–265, abril de 2003, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00907-X.

[7] J. P. Silva, «A carapaça cerâmica e o seu impacto em Investment Casting», Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, FEUP, Porto, 2017.

[8] V. Csáky, «Desenvolvimento do processo de produção de próteses crânio-maxilofaciais fundidas», Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto, 2014.

[9] E. Oberg, F. D. Jones, H. L. Horton, H. H. Ryffel, C. J. McCauley, e L. Brengelman, «Machinery's Handbook», 31.ª ed., Industrial Press, 2020, pp. 1401–1648.

[10] American Casting Company, «Investment Casting Process Steps (Lost Wax)», *Casting Company*, 2022. https://americancastingco.com/investment-casting-process/ (acedido a 15 de junho de 2023).

[11] A. I. H. Committee, «Casting», em *ASM Handbook, Volume 15 - Casting*, ASM International, 2008, pp. 646–661.

[12] F. Alexandra Martins Rocha, «Melhoria do processo de fundição por cera perdida de próteses de joelho em ligas CoCr», Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, FEUP, Porto, 2017.

[13] R. G. Craig, J. D. Eick, e F. A. Peyton, «Properties of natural waxes used in dentistry», *J Dent Res*, vol. 44, n. 6, pp. 1308–1316, 1965, doi: 10.1177/00220345650440063301.

[14] D. Barbosa, «Otimização do processo de produção em fundição de modelo por cera perdida vazado em carapaça cerâmica de um componente para a indústria automóvel», Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, FEUP, Porto, 2015.

[15] J. Bundy e S. Viswanathan, «Characterization of zircon-based slurries for Investment Casting», *International Journal of Metalcasting*, vol. 9, pp. 27–37, 2008.

[16] J. Simas, «Fundição de turbinas em aluminetos de titânio», Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, FEUP, Porto, 2015.

[17] S. Oummadi, «Drying behaviour of ceramic green bodies: experimental characterization and numerical modeling», Tese de Doutoramento, IRCer, Limoges, 2019.

[18] P. Leardini e H. De Groot, «Indoor air quality and health in New Zealand's traditional homes», em *44th Annual Conference of the Architectural Science Association*, ANZAScA, Ed., 2010.

[19] Z. Zhang, S. Yang, e D. Liu, «Mechanism and mathematical model of heat and mass transfer during convective drying of porous materials», *Heat Transfer- Asian Research*, vol. 28, n. 5, pp. 337–351, 1999.

[20] Z. Harun, «Simulation of drying for multilayer investment casting shells», Tese de

Douoramento, Universidade de Swansea, Swansea, 2007.
[21] G. W. Scherer, «Theory of drying», *J. Am. Ceram. Soc*, vol. 73, n. 1, pp. 3–14, 1990.
[22] M. Brienza, D. Kaye, A. Browsky, N. Doiron, e M. Oles, «Intercoat drying and shell properties», Milford, 2018.
[23] P. Sen Wang, «Assessment of moisture measurement techniques for ceramic processing», National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 2000.
[24] M. Koralnik, «Evaluation of the drying time of the first and second layer of a ceramic casting mold using a thermal imaging camera», *Glass and Ceramics*, vol. 1, pp. 6–10, 2017.
[25] K. Zaba, M. Zybura, R. Sitek, e S. Puchlerska, «Thermal imaging analysis of the structure of multilayer of ceramic moulds», em *27th International Conference on Metallurgy and Materials*, 2018, pp. 1801–1806.
[26] FLIR, *Manual do utilizador - FLIR i3 FLIR i5 FLIR i7 Extech IRC30*. 2010.
[27] O. Vrátný, A. Herman, e I. Kubelkovă, «The application of thermographic diagnostic in investment casting process», em *28th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*, DAAAM International, 2017, pp. 1118–1125. doi: 10.2507/28th.daaam.proceedings.156.
[28] A. Menezes, M. Glória Gomes, e I. Flores-Colen, «In-situ assessment of physical performance and degradation analysis of rendering walls», *Constr Build Mater*, vol. 75, pp. 283–292, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.11.039.
[29] Transmetra, «Table of emissivity of various surfaces for infrared thermometry».
[30] A. Domingues, «Medição do teor de humidade e sua importância no diagnóstico", Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP, Porto, 2016.
[31]Doser Messtechnik, «Capacitive measuring prinziple», 2023. https://doser.de/messtechnik/en/home/infos/capacitive-measuring-principle---.php?lang=EN (acedido a 15 de junho de 2023).
[32] S. Tada, «An overview of principles and techniques of moisture properties measurement for building materials and components», Tsukuba, 1998.
[33] W. Snyder, C. Whitehouse, e J. Markee, «Further discussions about drying», em *66th Technical Conference and Expo 209*, Investment Casting Institute, 2019, pp. 1–20.
[34] I. B. Burgess, M. Lončar, e J. Aizenberg, «Structural colour in colourimetric sensors and indicators», *J Mater Chem C Mater*, vol. 1, n. 38, pp. 6075–6086, Out. 2013, doi: 10.1039/c3tc30919c.
[35] Ransom & Randolph, «ReDip indicator». 2019. Acedido a 1 de maio de 2023. [em linha]. Disponível em: https://www.ransom-randolph.com/_files/ugd/cc5f22_9d52d3bb3a4b40a4832a311f10ffad75.pdf
[36] *Atlas of Casting Defects*. Investment Casting Institute, 2017.
[37] S. N. Bansode, V. M. Phalle, e S. S. Mantha, «Influence of slurry composition on mould properties and shrinkage of Investment Casting», *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 73, n. 3, pp. 763–773, março de 2020, doi: 10.1007/s12666-020-01872-5.
[38] P. R. G. Hein e L. Brancheriau, «Comparison between three-point and four-point flexural tests to determine wood strength of Eucalyptus specimens», *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, vol. 20, n. 3, pp. 333–342, Jul. 2018, doi: 10.4067/S0718-221X2018005003401.
[39] ASTM International, «C1161-Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature», 2014 doi: 10.1520/C1161-13.