



M 2022

OTIMIZAÇÃO DE SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE *INVESTMENT CASTING* NA FERESPE

DIOGO MIGUEL NUNES RAMÍSIO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA À FACULDADE DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE DO PORTO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

ORIENTADOR NA FEUP

ENGENHEIRO VÍTOR MARTINS AUGUSTO

ORIENTADOR NA FERESPE

ENGENHEIRO JOSÉ MOREIRA

Porto, 7 julho de 2022

CANDIDATO	Diogo Miguel Nunes Ramísio		Código 201707305
TÍTULO	Otimização de Simulação do Processo de <i>Investment Casting</i> Na FERESPE		
DATA	22 de julho de 2022		
LOCAL	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Sala F106-12:00 h		
JÚRI	Presidente	Sónia Luísa dos Santos Simões	DEMM/FEUP
	Arguente	Hélder Jesus Fernandes Puga	DEM - UMinho
	Orientador	Vitor Manuel Branco Martins Augusto	DEMM/FEUP

Resumo

O processo de fundição de precisão por cera perdida é utilizado desde os primórdios da metalurgia. Atualmente, como método de conformação industrializado, oferece valências como excelente acabamento superficial dos fundidos obtidos sem limitações geométricas e metalúrgicas.

A FERESPE- Fundição de Ferro e Aço Lda. implementou o processo em 2018. A divisão de fundição de areia da empresa é pioneira nacional no uso de *software* de simulação de fundição, utilizando o SOLIDCast com resultados satisfatórios. No entanto, falhas na detecção de macro e microporosidade na aplicação do SOLIDCast a este processo de fundição criaram a necessidade de uma otimização aprofundada do *software* de forma a adaptá-lo a fundição por cera perdida.

Como tal, foi planificada a aplicação do método inverso. Desta forma, foram recolhidas curvas de arrefecimento na carapaça de diversas peças vazadas na FERESPE, com posterior variação dos parâmetros das carapaças cerâmicas simuladas até obter valores que replicam no SOLIDCast o arrefecimento das carapaças vazadas. Ensaios de densidade e de calor específico foram também aplicados para suportar a aplicação deste método.

Apesar de dificuldades na modelação das condições experimentais no SOLIDCast, bem como a estacionaridade assumida pelo *software* das propriedades térmicas ao longo do processo, foram obtidos parâmetros capazes de simular defeitos previamente indetetados pelo programa, recomendando-se a utilização destes valores como método expedito de validação de geometria de cachos durante o projeto de fundição em cera perdida na FERESPE.

Palavras-Chave

Investment Casting, Simulação de Fundição, Otimização, SOLIDCast, Carapaças Cerâmicas, Método Inverso

Abstract

The investment casting process has been used since the earliest days of metallurgy. Currently, as an industrialized method, its' use offers advantages such as excellent surface finishing and lack of both geometric and metallurgical limitations in cast parts.

FERESPE- Fundação de Ferro e Aço Lda. implemented the process in 2018. The company's sand casting division is a national pioneer in the implementation of foundry simulation software, using SOLIDCast with satisfactory results. However, failures in the detection of macro and microporosity in the application of SOLIDCast to investment casting motivated the need for in-depth optimization of this software in order to adapt it to investment casting in FERESPE.

As such, the inverse method was applied. Cooling curves of parts cast in FERESPE were measured, with the later iterative variation of simulated shell parameters until a fitting simulated cooling curve is obtained. Density and specific heat tests have also been applied to support the application of this method.

Despite difficulties in modeling the experimental conditions in SOLIDCast, as well as the stationarity of thermal properties assumed by the software throughout the process, parameters capable of simulating defects previously undetected by SOLIDCast were obtained. The use of these values as an expeditious method of defect prevention in FERESPE is recommended.

Keywords

Investment Casting, Casting Simulation, Optimization, SOLIDCast, Ceramic Shells, Inverse Method.

Agradecimentos

À minha família, amigos, e namorada por todo o apoio e motivação nesta fase de enorme crescimento pessoal, aprendizagem e de transição. Este trabalho seria impossível sem vocês.

Ao meu orientador na FEUP, Professor Vitor Martins Augusto, pela mentoria, experiência e apoio dado nas alturas mais difíceis.

A todo o pessoal da FERESPE pelo acolhimento fantástico durante estes 5 meses. Em particular ao meu orientador na empresa, Eng.º José Moreira, pela disponibilidade e acompanhamento constante à realização da presente dissertação. Aos Engenheiros Pedro Lacerda, Bártolo Paiva e Joaquim Santos em particular pelo conhecimento transmitido, bem como ao Eduardo, Hugo e Carlos, pela ajuda indispensável em toda a componente experimental na FERESPE.

À Professora Cláudia Lopes pelo auxílio nos ensaios de DSC e ao Professor Luís Filipe Malheiros pela ajuda na procura de equipamento laboratorial.

Índice

Resumo	I
Palavras-Chave	I
Abstract.....	II
Keywords	II
Agradecimentos	III
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento e Objetivos.....	1
1.2. Apresentação da FERESPE	2
1.3. Estrutura da Dissertação.....	3
2. Fundamentos Bibliográficos.....	4
2.1. <i>Investment casting</i>	4
2.1.1. Introdução.....	4
2.1.2. Ceras	5
2.1.3. Carapaças Cerâmicas	6
2.1.4. Estado do Conhecimento da Caracterização de Carapaças Cerâmicas	10
2.1.5. Vantagens e Desvantagens	12
2.2. Simulação de Fundição.....	13
2.2.1. Introdução.....	13
2.2.2. Método das Diferenças Finitas.....	14
2.2.3. Método dos Elementos Finitos	15
2.2.4. <i>Software</i> de Simulação de Fundição.....	15
3. Metodologia e Procedimento Experimental	20
3.1. Metodologia Planificada	20
3.2. Processo de IC na FERESPE	21
3.2.1. Ligas em Estudo	22
3.2.2. <i>Software</i> de Simulação de Fundição Utilizado: SOLIDCast	23
3.3. Medição de curvas de arrefecimento	24
3.4. Peças Analisadas	25
3.5. Simulação e Parametrização do SOLIDCast	35
3.6. Determinação da Densidade.....	40

3.7. Determinação da Condutividade Térmica	41
3.8. Determinação do Calor Específico.....	41
4. Resultados e Discussão	43
4.1. Peça D	43
4.2. Peça C	43
4.3. Peça V	51
4.4. Peça F	54
4.5. Validação dos Resultados	55
4.6. Ensaio de Densidade: Método de Arquimedes	57
4.7. Ensaio para Determinação do Calor Específico	57
5. Conclusões.....	58
6. Trabalho futuro.....	59
7. Referências.....	61
Anexo	65
Propriedades de Liga	65
CF8M	65
AISI 4140	65
Material das Carapaças e Mantas	65
Fused Mullite Shell	65
Kaowool.....	65
Parâmetros de Simulação.....	65

1. Introdução

1.1. Enquadramento e Objetivos

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito da dissertação no 2º ano do Mestrado em Engenharia de Materiais, com especialização em Metalurgia, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Foi realizada em ambiente empresarial em parceria com a FERESPE- Fundação de Ferro e Aço Lda..

Com a exigência da procura contínua do aumento da eficiência de produção, bem como da melhoria das propriedades dos produtos fornecidos, a indústria da fundição adota crescentemente *software* de simulação. Desta forma, os métodos tradicionais empíricos e de cálculo são substituídos/complementados por uma abordagem mais eficiente no uso de energia e recursos, focalizando-se na prevenção de defeitos, uma vez que contabiliza mais variáveis dos processos aplicados (1,2).

O *software* utilizado pela indústria da fundição, apesar da sua utilidade comprovada, recorre a aproximações devido à complexidade dos fenómenos físicos e químicos que ocorrem durante o vazamento, solidificação e arrefecimento dos fundidos. Este facto é evidente nas moldações, cujas propriedades são frequentemente consideradas constantes, tanto durante o processo como entre diferentes fundições e processos. Tendo em conta a alteração de propriedades que cada moldação sofre durante o vazamento, bem como a variedade de composições usadas entre diferentes empresas entre a produção de peças com diferentes características, esta simplificação pode criar diferenças significativas entre os resultados simulados e as peças obtidas (1).

Recentemente, a descoberta de defeitos não detetados por simulação em peças produzidas por fundição de precisão por cera perdida (IC) na FERESPE, motivaram a reavaliação dos parâmetros introduzidos no SOLIDCast correspondentes à carapaça cerâmica, bem como uma análise e ajuste das curvas de arrefecimento determinadas pelo programa.

Tendo estes fatores em conta, para a presente dissertação foram estipulados os seguintes objetivos: (i) Definição de metodologia para a parametrização das carapaças cerâmicas utilizadas; (ii) Caracterização experimental da velocidade de arrefecimento das carapaças durante o vazamento e solidificação; (iii) Ajuste dos parâmetros relevantes no *software* para obter gradientes térmicos e velocidades de arrefecimento correspondentes com a realidade;

1.2. Apresentação da FERESPE

A FERESPE- Fundição de Ferro e Aço, Lda. é uma empresa especializada nos processos de fundição em areia e *Investment Casting* (IC) em aços de baixa e média liga, aços inoxidáveis e ferros fundidos (3).

Cerca de 90% das peças produzidas são exportadas. Os clientes da empresa inserem-se principalmente nas indústrias da energia (renováveis e limpas, gás natural e petróleo), transportes (naval e ferroviária), química, mineira e extrativa, bem como da pasta do papel e das águas residuais. A FERESPE focaliza-se essencialmente na produção de pequenas e médias séries (3).

A empresa foi fundada em 1981 pelo Eng.º Jorge Macedo Casais como fundição em areia de ferros fundidos de alta liga e de aços ligados, com a introdução de aços de baixa e média liga, bem como aços inoxidáveis, 3 anos depois (3).

Na década de 1990 foram estabelecidas relações comerciais internacionais, maioritariamente com países europeus (Espanha, França, Itália, Suíça, Áustria, Alemanha, Holanda, Bélgica, Reino Unido, Dinamarca, Suécia, Noruega) e Estados Unidos da América. Já no novo milénio, a FERESPE é crescentemente reconhecida a nível nacional e internacional pela produção de peças em aços inoxidáveis super duplex e super austeníticos (3).

Em 2013 arrancam investimentos nas áreas da moldação e tratamentos térmicos, com investimento posterior na implementação de processos de cera perdida (IC) em 2015. O arranque das unidades de tratamentos térmicos e IC foi dado em 2018 (3).

A FERESPE possui diversas certificações. O seu sistema de gestão de qualidade é certificado desde 1994 (ISO 9001, atualmente ISO 9001:2015), possuindo certificação do sistema de gestão ambiental desde 2017 (ISO 14001:2015). Ambas as certificações são atualmente concedidas pela DNV. É também certificada por outras entidades em processos, materiais e aplicações diversas, nomeadamente (3):

- NORSOK: Fundição em areia de aços inoxidáveis duplex e super duplex;
- Lloyd's Register: Fundição de peças em aço inoxidável austenítico;
- FRATOME: Produção de componentes para bombas e válvulas (incluindo para aplicações na indústria nuclear);
- TUV NORD: Produção de equipamento em pressão;
- TUV NORD e DB: Produção e soldadura de peças para a indústria ferroviária;
- Bureau Veritas, ABS e DNV: Produção de componentes para a indústria naval;

A FERESPE é ainda pioneira em Portugal na aplicação de simulação de fundição 3D, com a sua introdução em 1994 e com implementação do SOLIDCast em 1995. Este *software* é utilizado na empresa até à atualidade.

1.3. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação é composta por 7 capítulos distintos. Inicialmente é contextualizado o presente trabalho, sendo indicado o enquadramento e os objetivos estabelecidos na sua planificação, uma breve introdução à empresa.

De seguida são apresentados os fundamentos bibliográficos consultados. É apresentado o processo IC, a sua história, as ceras utilizadas para fabrico dos modelos, as vantagens e desvantagens inerentes ao processo, com especial focalização nas carapaças cerâmicas e a sua caracterização. É também dada uma breve introdução à simulação de fundição e aos modelos matemáticos a que recorre, bem como o *software* de simulação de fundição existente no mercado e os seus princípios de funcionamento com especial ênfase no programa utilizado: o SOLIDCast.

O 3º capítulo expõe a metodologia proposta para a parametrização do *software* e consequente melhoria da deteção de defeitos, com os métodos a aplicar e ensaios planificados. No capítulo seguinte são detalhados os procedimentos realizados, caracterizando-se também o estado atual do IC na FERESPE como ponto de partida.

No capítulo 5 são apresentados e analisados os resultados obtidos, sendo as principais conclusões detalhadas no 6º capítulo. Por fim, são dadas sugestões para a continuação do trabalho realizado.

2. Fundamentos Bibliográficos

2.1. *Investment casting*

2.1.1. Introdução

O processo de fundição por cera perdida é milenar (*Investment casting* em inglês, IC). As evidências mais antigas do seu uso, amuletos de cobre ligados com chumbo, são datadas do período calcolítico, por volta de 4000 A.C., tendo sido descobertos na província de Balochistão, atual Paquistão. A técnica revela-se importante considerando a dificuldade que a conformação metálica constituía na antiguidade. Os sistemas de gitagem primitivos eram criados por “tentativa-e-erro”, não sendo necessariamente removidos da peça final. Alguns artefactos indiciam também a utilização de machos de diversos materiais (4,5).

O desenvolvimento do processo é maioritariamente documentado e atribuído ao oriente médio e, posteriormente, civilizações mediterrânicas, com inúmeros artefactos evidenciando evoluções como a realização de acabamento superficial, utilização de dois materiais numa só carapaça e produção em massa (4). No entanto, existem evidências do seu uso também na China (1300 A.C.) e na Índia (1º século A.C.). Os navegadores portugueses e espanhóis descobriram também técnicas de fundição por cera perdida em ouro no oeste de África e na América do Sul, respetivamente (5).

A fundição por cera perdida continuou como meio artesanal na produção de joalharia (secular ou religiosa) e ornamentos em cobre e ouro. Apenas no século XX surgiu como processo mecanizável e reproduzível, primeiro em 1907 para produção de prótese dentárias de ouro e posteriormente em 1936 na indústria da joalharia (4). A demonstração da viabilidade da fundição por cera perdida levou a investimento na melhoria do processo, da cera e da cerâmica utilizada nas carapaças. Desta forma, o processo de IC surge na década de 40 do século XX como um setor pequeno e especializado (6). A 2ª guerra mundial foi um fator contribuinte para o desenvolvimento do IC. A elevada procura de equipamentos e serviços de maquinaria levou ao crescimento do processo pela capacidade de obtenção de acabamentos superficiais e tolerâncias geométricas excelentes em comparação a fundição em areia (7).

A essência do processo mantém-se inalterada desde o seu desenvolvimento inicial, podendo ser observado na figura 1. A primeira etapa deste consiste na obtenção do modelo de cera com a geometria da peça a criar. Geralmente a produção destes modelos é dada por injeção de cera em moldes metálicos. A seguir é criado o cacho de cera. Pode incluir um ou mais modelos, dependendo de fatores como as dimensões e geometria da peça. Estes são

constituídos por colagem dos modelos e modelos do sistema de alimentação ao sistema de gitagem em cera, normalmente fabricados em separado, por contacto. O cacho é posteriormente revestido por material refratário (este processo é denominado “*investment*” em inglês, dando origem à designação IC). A carapaça é, desta forma, criada sobre a superfície do cacho de cera. Após a sua conclusão esta é seca, e passa posteriormente por um processo de remoção da cera e endurecimento da mesma. Seguidamente é pré aquecida e sucede-se o vazamento, após solidificação e arrefecimento do metal vazado, dá-se a fragmentação da carapaça. O processo é finalizado pelo corte do sistema de alimentação e gitagem e operações de acabamento (7-9).

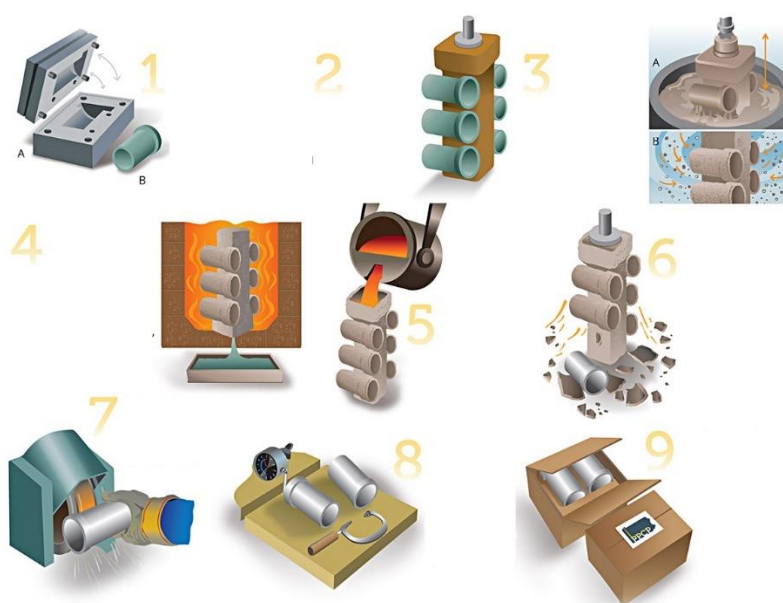


Figura 1: Processo de IC; 1: Injeção de cera; 2: Montagem do cacho; 3: Produção da carapaça; 4: Retirada da cera e pré-Aquecimento; 5: Vazamento; 6: Abate da carapaça; 7: Corte; 8: Acabamento; 9: Embalamento; (10)

2.1.2. Ceras

É necessário ter em conta que as características dimensionais e superficiais da cera são, pela natureza do processo, reproduzidas na camada primária da carapaça (face coat em inglês) e, conseqüentemente, no fundido obtido. Desta forma, a cera utilizada é crítica para a qualidade que é possível produzir no produto final. No entanto, existem outros fatores importantes na escolha da composição química das ceras a utilizar (11).

As propriedades das ceras devem ser adequadas à produção fácil, segura e dimensionalmente precisa do modelo. Em primeiro lugar, devem ser inertes aos materiais e compostos que contacta, da injeção à remoção da carapaça. O coeficiente de contração térmica deve ser baixo e, conseqüentemente, a temperatura de injeção necessária, de forma a manter tolerâncias dimensionais durante o arrefecimento. Uma viscosidade baixa é

também desejada para o enchimento eficaz do molde durante injeção e possibilitar a replicação de secções finas. Após injeção o molde necessita de possuir resistência mecânica para aguentar com as pressões de injeção da cera e do seu manuseamento na máquina de injeção. Por questões ambientais e económicas a cera deve idealmente ser recuperável. Além dos fatores anteriormente mencionados, deve-se atentar aos perigos à saúde dos operadores e ao meio ambiente que as ceras podem constituir (6,7,9,11).

As ceras utilizadas podem ter origem animal, vegetal ou petrolífera, podendo ser divididas em naturais ou sintéticas. As ceras de parafina e multicristalinas são as mais utilizadas. As ceras de parafina possuem uma temperatura de fusão entre os 52 e 68 °C. São caracterizadas pelo seu baixo custo e viscosidade, bem como alta lubricidade. No entanto, o seu alto coeficiente de contração térmica e fragilidade são desvantagens evidentes. As ceras multicristalinas apresentam um ponto de fusão superior, bem como plasticidade e resistência superiores. No entanto, as propriedades destas ceras variam dependendo da classe adquirida. Devido às suas propriedades complementares são frequentemente utilizadas em conjunto (9,11).

É também comum a aditivação ou a mistura de diferentes ceras em composições variáveis para a obtenção de determinadas propriedades. As usuais proporções de aditivação podem ser observadas na tabela 1. Plásticos são adicionados para melhorar a resistência da cera utilizada (ex: PE, *nylon*, etilcelulose). *Fillers*, partículas sólidas de adição opcional, (ex: PS esférico e microesferas ocas de carbono) estabilidade dimensional. Por fim, antioxidantes podem ser incluídos para impedir a deterioração térmica de certas ceras, podendo também ser utilizados pigmentos para facilitar inspeção e rastreabilidade dos modelos e cachos de cera (7,9).

Tabela 1: Composição de ceras utilizadas em IC; *A restante percentagem representa a mistura da cera e os restantes aditivos (9).

Cera (%)	Resina (%)	Plástico (%)	Outros (%)	Fillers (%)
30-70	20-60	0-20	0-5	15-45*

2.1.3. Carapaças Cerâmicas

As carapaças cerâmicas são produzidas por revestimento do cacho de cera por camadas sucessivas de cerâmicos. Cada camada é composta por uma imersão numa barbotina e pela adesão de posterior de partículas (8,9,12).

Os cachos de cera, após montagem, são sujeitos a processos de limpeza como preparação para um eficaz fabrico da carapaça cerâmica. Desta forma a adesão da cerâmica não é afetada pela eventual presença de desmoldantes provenientes da injeção da cera, pó ou cera residual. Os agentes de limpeza são compostos por agentes que promovem molhabilidade e que atacam superficialmente a cera (9,13).

O cacho é posteriormente submerso no tanque da barbotina. Este contém a mistura de farinha refratária e ligante. A sua composição pode ser consultada na tabela 2. A agitação no tanque de barbotinas é crucial para impedir a formação de aglomerados.

Tabela 2: Composição das barbotinas em IC (9).

Sólido (ligante; %)	Líquido (ligante+adicional; %)	Farinha refratária (%)
5-10	15-30	60-80

Durante a imersão são aplicados movimentos rotativos e transversais para garantir um revestimento eficaz. Após este processo, o excesso de barbotina é removido durante a manipulação do cacho de cera de forma a garantir uniformidade ao longo da carapaça (8,9,12,13).

O cacho de cera é, subsequentemente, revestido por material refratário por “imersão”, sistema de leitos fluidizados ou por pulverização. Este é responsável por prevenir a fissuração da carapaça, promover a coesão e aumentar a espessura desta. Após repouso das carapaças para secagem o processo repete-se para formar uma nova camada (8,9,12).

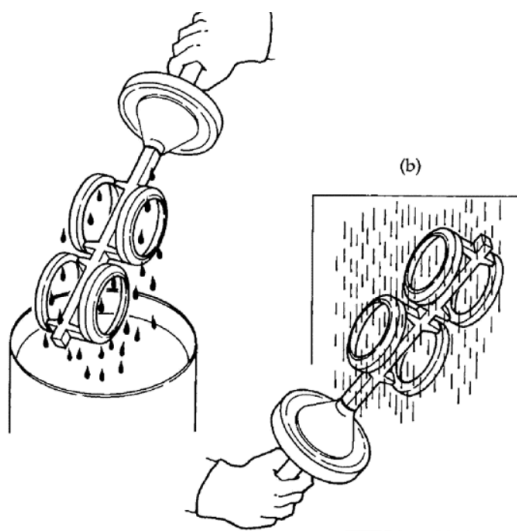


Figura 2: a) Imersão do cacho de Cera no tanque das barbotinas; b) Aplicação da areia refratária por pulverização (6)

O número de camadas utilizado varia usualmente entre 9 e 15, dependendo das dimensões e peso do cacho. Estas podem ser divididas entre uma ou duas camadas primárias (*face coat*), várias camadas de reforço (*back up coats*) e uma camada selante (*seal coat*). A camadas primárias são de extrema importância para o acabamento superficial do fundido, visto que possuem a função de replicar todos os detalhes do cacho de cera. Seguem-se

camadas de reforço com granulometria de areias superior e, por fim, uma camada selante. Esta deve conter apenas barbotina para evitar partículas soltas na superfície da carapaça (6,9,14).

A carapaça cerâmica, após devida secagem, deve ser sujeita a ciclos térmicos para descerificação e pré-aquecimento. A descerificação em particular deve ser estritamente controlada, uma vez que a elevada diferença de coeficiente de expansão térmica entre a cera e a carapaça podem criar elevadas tensões na carapaça e, conseqüentemente, levar à aparição de defeitos na carapaça. A presença de humidade causa também uma contração adicional durante o aquecimento, pelo que uma secagem eficaz deve ser garantida (6,13).

A carapaça cerâmica, após devida secagem, deve ser sujeita a aquecimento para a retirada da cera. Após esta etapa realiza-se o pré-aquecimento e, posteriormente, o vazamento. A retirada da cera em particular deve ser estritamente controlada, uma vez que a elevada diferença de coeficiente de expansão térmica entre a cera e a carapaça, poderá levar à rutura ou criação de defeitos na carapaça (6,13).

Existem diversos métodos para retirada da cera, sendo os mais utilizados industrialmente: autoclave e *high temperature flash*. O primeiro é o método mais utilizado industrialmente. Promove a fusão e escoamento da cera através de aquecimento rápido numa câmara com vapor de água saturado e pressão elevada (550 a 620 kPa). Todo o processo pode ser realizado em cerca de 15 minutos. A pressão contraria a expansão da carapaça, reduzindo a dilatação e expansão da carapaça. Estes fatores, quando aliados à possibilidade de boa recuperação da cera, tornam este método bastante eficaz. *High temperature flash*, por sua vez, consiste na retirada da cera com recurso a um forno, submetendo as carapaças a temperaturas geralmente entre 870 °C e 1095 °C. A cera escorre e é escoada pelo fundo do forno. No entanto, apresenta-se como desvantagem evidente a perda de parte da cera por combustão, resultando numa recuperação de cera menos eficiente. Os fornos utilizados neste método necessitam de equipamentos auxiliares para queimar as cinzas resultantes da combustão e assim mitigar a poluição (6,13).

Os materiais cerâmicos utilizados para o fabrico das carapaças são escolhidos por terem propriedades como estabilidade química a alta temperatura (impedindo a reação do metal vazado com a carapaça), condutividade térmica suficiente para ajudar no arrefecimento adequado do fundido, resistência mecânica em verde, resistência mecânica após sinterização e à fluência e choque térmico para manter a integridade estrutural durante o manuseamento, remoção da cera e vazamento (15).

Os cerâmicos mais utilizados para o fabrico das carapaças, tanto na barbotina como no material refratário, são silicatos de zirconia, mais propriamente zircão, sílica fundida e aluminossilicatos. São ainda utilizadas zicórnia, lítia e grafite na produção de carapaças para o vazamento de metais particularmente reativos. A sílica utilizada é obtida através da moagem de vidro de quartzo até à granulometria necessária para farinha refratária. A sílica

pode ser obtida a partir de quartzo ou vidro de sílica, com moagem até à granulometria indicada para barbotina ou material refratário. A sílica proveniente do vidro possui um coeficiente de expansão térmica baixo, conferindo-lhe resistência durante a retirada de cera e pré-aquecimento. A sílica de quartzo é utilizada pelo seu baixo custo. No entanto, o seu elevado coeficiente de expansão térmica, com abrupta dilatação a 531 °C (transformação $\alpha \rightarrow \beta$), requer especial atenção na aplicação de ciclos térmicos (7,9,13).

Os aluminossilicatos são produzidos pela calcinação de argilas refratárias. Os *pellets* resultantes sofrem moagem até à granulometria pretendida. São compostos por mulite e sílica livre. O aumento do teor de alumina aumenta a refratariedade dos aluminossilicatos, com um aumento correspondente no seu custo (9,13).

O zircão é particularmente utilizado por ser inerte e estável a altas temperaturas, possuindo também elevada resistência à molhabilidade pelo metal líquido no vazamento. Este material é utilizado como areia no seu estado natural. Uma vez que a sua granulometria é baixa naturalmente, é utilizado como material refratário nas camadas primárias. Pode ainda sofrer moagem até uma granulometria compatível com a sua adição à barbotina de camadas primárias (7,9,13).

Alumina pode também fazer parte da composição de carapaças cerâmicas, sendo principalmente utilizada para o vazamento de superligas pela sua refratariedade superior à sílica e mulite, bem como a sua estabilidade química no vazamento de uma grande variedade de ligas. Esta é geralmente extraída da bauxite através do processo Bayer. No entanto, o custo deste material é elevado, podendo ser pouco rentável o seu uso em certas peças (9,13).

Os ligantes mais utilizados são a sílica coloidal, o silicato de sódio e o silicato de etilo. A sílica coloidal é o ligante mais utilizados pela sua excelente aplicabilidade numa vasta gama de geometrias e carapaças. As partículas esféricas em dispersão coloidal neste ligante podem ser obtidas por permuta iónica a partir de silicato de sódio. A maior desvantagem do seu uso são os tempos de secagem elevados, especialmente em regiões da carapaça cobertas pela restante geometria (7,9,13).

O silicato de etilo é obtido pela reação entre tetracloro de silício e etanol. Este composto não apresenta propriedades ligantes, sendo estas conferidas por hidrólise com catalisador ácido. A sua base alcoólica garante um tempo de secagem reduzido, sendo esta a principal vantagem do seu uso como ligante. A secagem pode ser realizada em atmosfera de amoníaco entre a formação das camadas. Apesar das suas valências, o silicato de etilo cai atualmente em desuso devido a custos elevados e preocupações ambientais (9,13).

O silicato de sódio é apenas utilizado quando se pretende o menor custo possível, uma vez que possui fraca refratariedade (9,13).

No fabrico de carapaças cerâmicas pode também recorrer-se à aditivação com agentes molhantes, antiespumantes, entre outros. Os agentes molhantes, quando adicionados à barbotina, melhoram a molhabilidade do cacho de cera ou de cada camada, melhorando a adesão da camada posterior. Quando este aditivo é usado, deve-se também adicionar agentes antiespumantes para impedir a formação de bolhas de ar. Agentes nucleadores e refinadores de grão podem também ser utilizados na barbotina de camadas primárias para o vazamento de superligas (9,13).

2.1.4. Estado do Conhecimento da Caracterização de Carapaças Cerâmicas

De forma a definir a carapaça indicada para cada geometria e liga é necessário estudar as propriedades dos materiais utilizados e como estas poderão afetar a qualidade final do fundido. As propriedades das ligas de vazamento utilizadas são geralmente bem estudadas. Uma vez que são extensivamente utilizadas na metalurgia, as suas composições são conhecidas e controladas, existindo um historial de ensaios laboratoriais que conferem a diversas bases de dados valores fidedignos.

No entanto, as propriedades das carapaças cerâmicas utilizadas em IC dificilmente coincidem com valores de referência apresentados em bibliografia, uma vez que fatores como o número de camadas, a composição de barbotinas e o material refratário de cada camada, assim como a porosidade, espessura, e ciclos térmicos aplicados a estas variam amplamente entre fundições. Estes sistemas são também altamente heterogêneos, criando a dificuldade acrescida de prever a interação entre diferentes materiais durante os ciclos térmicos aplicados e o vazamento (16). Consequentemente, a caracterização de diferentes carapaças cerâmicas assume-se como uma etapa fundamental para o controlo do processo de IC e a compreensão da influência das principais variáveis envolvidas.

Konrad *et. al.* (17) procederam à medição da condutividade térmica e calor específico de carapaças de 4 a 11 mm com 4, 6 e 8 camadas. A camada primária de cada uma foi composta de sílica coloidal e zircão com adição de refinador de grão. As restantes camadas foram produzidas com sílica coloidal e mulite. A determinação do calor específico e da condutividade térmica das carapaças foi realizada com recurso a equipamentos de *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) e *Laser Flash Diffusivity* (LFA), respetivamente. Os resultados demonstraram que os valores medidos das duas propriedades são geralmente superiores a temperaturas de serviço que à temperatura ambiente. A condutividade térmica foi determinada indiretamente através da medição da difusividade térmica. Apesar da eficácia dos ensaios experimentais mencionados, existem metodologias alternativas para a determinação das propriedades de carapaças cerâmicas usadas em IC.

Xu *et. al.* (16) determinaram as propriedades de diferentes carapaças através do método inverso, comparando os valores obtidos a medições realizadas por LFA. A densidade e a porosidade foram também medidas e atribuídas como fatores críticos nas propriedades térmicas da carapaça.

O método inverso consiste na medição da temperatura em função do tempo durante o vazamento. Posteriormente, o sistema é replicado num *software* de simulação de fundição, sendo obtida uma curva de temperaturas no ponto onde o termopar foi colocado experimentalmente. De seguida, as propriedades da carapaça são variadas iterativamente até as curvas coincidirem. O processo foi simulado no MAGMASoft com auxílio da ferramenta de otimização inversa, sendo o metal de vazamento utilizado níquel puro. A carapaça foi isolada de forma a limitar a influência das condições exteriores de arrefecimento.

Este método garante que as diversas variáveis dos processos de fundição são consideradas na determinação das propriedades, devido à sua componente experimental baseada no vazamento. Logo, os valores obtidos podem possuir especial aplicabilidade em posterior simulação de fundição.

Esta valência é de especial importância tendo em conta que equipamentos de LFA são concebidos para determinar propriedades de materiais não porosos e homogêneos. No entanto, a natureza iterativa do processo torna o método inverso extremamente moroso. A validade dos resultados obtidos é também fortemente dependente da replicação exata das condições do vazamento no *software*, justificando a escolha deste autor de um metal puro para vazamento e uma geometria de fundido simples (neste caso, um cubo oco).

As simulações preliminares deste trabalho demonstraram que o aumento do calor específico reduz o tempo de solidificação devido ao aumento da energia necessária para alcançar a mesma temperatura na carapaça. Por sua vez, o aumento da condutividade térmica permite a transferência mais eficaz de calor entre o metal líquido e a carapaça, encurtando o tempo de solidificação e aumentando a temperatura máxima da carapaça. Estas simulações permitiram também concluir que a variação do coeficiente externo de calor influencia principalmente a curva de arrefecimento após solidificação.

Os resultados revelaram um aumento da condutividade térmica das carapaças com um aumento de temperatura. Os autores apontam que este resultado não é expectável na maioria dos cerâmicos densos. No entanto, a presença de sílica coloidal nas diversas carapaças aumenta a perda de calor por radiação da carapaça a altas temperaturas.

Conclui-se que os valores obtidos podem ser utilizados como ponto de partida na realização do método inverso, escolhendo a carapaça com composição mais próxima à utilizada e tendo sempre em consideração a influência da porosidade nas propriedades a estudar.

Da mesma forma, Chapman *et. al.* (18) mediram o calor específico, difusividade térmica e densidade de ligas de níquel e diferentes carapaças cerâmicas, avaliando posteriormente o

efeito da variação destas propriedades no arrefecimento do fundido através de simulação com recurso ao *solver* para método inverso do ProCAST.

Os ensaios de determinação do calor específico foram realizados em DSC. As amostras foram retiradas de cada carapaça e maquinadas conforme as dimensões do cadinho utilizado. Esta metodologia levou a elevada incerteza nos resultados devido a fraco contacto entre a amostra e o fundo do cadinho. Os valores de calor específico foram considerados próximos a valores calculados através da soma ponderada de cada constituinte da carapaça (regra das misturas). Os autores concluem que este cálculo será suficiente para a maioria das aplicações.

A difusividade térmica foi medida com recurso a LFA, calculando-se a condutividade térmica a partir dos valores obtidos. Estes foram 5 a 10 vezes superiores à soma ponderada dos valores de cada constituinte da carapaça.

A análise de sensibilidade realizada por simulação revelou que o efeito do calor específico na curva de arrefecimento é mais relevante no tempo até ao início da solidificação, com efeito decrescente com o aumento das dimensões da peça vazada. A condutividade térmica, por sua vez, influencia principalmente o tempo de solidificação total, sendo o efeito desta propriedade no arrefecimento mais relevante em peças mais massivas.

2.1.5. Vantagens e Desvantagens

As vantagens do IC são evidentes quando comparado com a fundição tradicional em moldações de areia. Esta é utilizada extensivamente pela sua versatilidade, simplicidade e custo. No entanto, possui limitações relativas à qualidade superficial e tolerâncias geométricas que produz. Utilizando o IC é possível obter peças sem limitações geométricas e metalúrgicas, bem como sem linhas de apartação, eliminando possíveis erros de alinhamento e ou separação das moldações durante vazamento. As moldações utilizadas são rígidas, de baixa rugosidade e sem zonas de união necessárias (6). Deste modo, os custos de IC situam-se frequentemente entre a fundição em areia e processos de conformação como forjamento e maquinagem conforme descrito por Pattnaik *et. al.* (7).

As peças produzidas em IC apresentam acabamento superficial e tolerâncias dimensionais apertadas, sendo possível incluir no *design* de peças para IC detalhes como ranhuras, orifícios, saliências, letras e números de pequena dimensão (7).

Estas características garantem o uso do IC em diversas aplicações nas indústrias dos transportes (aeroespacial, aeronáutica, motas e motociclos), biomédica (próteses, equipamento dentário), elétrica e eletrónica (comunicações, computadores, camaras, radares), petrolífera (equipamento de perfuração e auxiliar), alimentar, têxtil, agrónoma, da joalheria e do equipamento desportivo, das armas de fogo e pequeno armamento, entre

outros. O processo é utilizado também na produção de peças essenciais a equipamento industrial como válvulas, turbinas, sistemas hidráulicos e pneumáticos, sendo também produzidas peças para conformação e manuseamento de diversas ligas para a indústria metalomecânica (9,19).

As maiores limitações do IC são as restrições de massa e tamanho das peças e consequentemente da carapaça. Apesar de serem vazadas peças acima de 450 kg para motores aeronáuticos, o peso máximo do processo é significativamente menor na maioria das fundições. É comum encontrar valores de peso máximo entre 9 e 50 kg dependendo da fundição. Em termos de espessura mínima recomendada é de 1,6 mm, bem como espessura máxima recomendada de 1,5 vezes o diâmetro da secção (19,20).

A competitividade do preço do processo deve-se, em grande parte, à redução comparativa de custos de maquinagem que confere. Consequentemente, este fator revela-se como uma desvantagem quando, por motivos imprevistos, as tolerâncias dimensionais esperadas não são obtidas, sendo necessária uma maquinagem mais intensiva das peças vazadas e, consequentemente, resultando em custos finais das peças elevados (7,8).

2.2. Simulação de Fundição

2.2.1. Introdução

Atualmente, a exigência dos clientes na diminuição do tempo de projeto e manufatura, aumento de eficiência de produção, diminuição das tolerâncias geométricas permitidas e custos, bem como formas crescentemente complexas apresentam grandes desafios para fundições (21). Por estas razões, o *software* de simulação tem vindo a demonstrar-se como indispensável ao projeto de fundição. Estas ferramentas permitem aprimorar o conhecimento de materiais e processos, com foco na melhoria dos métodos aplicados através de soluções para o aumento da produtividade, redução de defeitos e do dispêndio de energia (1,22,23). Os métodos tradicionais, suportados por experiência e com pobre análise científica, são assim substituídos por uma abordagem de “validação do conceito” (2).

A tecnologia surgiu nos anos 80 com modelos em 2D simples para a identificação de pontos quentes. Através de desenvolvimento progressivo, é atualmente possível obter modelos que associam cálculos de termodinâmica, mecânica de fluidos, fenómenos de transferência de calor e propriedades termofísicas e a sua variação, culminando numa previsão mais eficaz de defeitos de fundição. Dependendo do *software* utilizado é possível também obter informação microestrutural e de tensões internas na peça (24).

Conforme descrito por Muenprasertdee *et. al.* (23), Pongsukijwat *et. al.* divide cada simulação de fundição realizada nas seguintes etapas:

- Elaboração de modelo CAD, se necessário, contendo peça, molde/moldação, sistema de alimentação e gitagem, mantas, ataques, etc.;
- Definição no *software* de simulação os parâmetros correspondentes ao vazamento, liga utilizada e molde/moldação;
- Simulação inicial
- Obtenção de resultados (critérios como tempo de solidificação, pontos quentes, densidade material, entre outros. Podem ser representados no modelo CAD em 3D ou graficamente;
- Interpretação dos resultados. Se os resultados obtidos não corresponderem ao desejado, o modelo CAD pode ser ajustado e o processo repetido;

O modelo matemático do *software* de simulação pode diferir entre diferentes programas. A sua função é a resolução das equações, geralmente equações diferenciais parciais, que dominam os fenómenos ocorrentes ao longo do processo. A simplificação do modelo CAD através da criação da malha (*mesh*, em inglês) também difere dependendo do método. As mais comuns são o método das diferenças finitas e o método dos elementos finitos. Ambos realizam cálculos iterativos com determinado intervalo de tempo, ou “*time-step*”, entre cálculos (23).

Apesar da sua utilidade comprovada, existem obstáculos notáveis na obtenção de resultados fidedignos. Em primeiro lugar, é necessário ter em conta as propriedades térmicas dos materiais do molde/moldação e da liga de vazamento apresentam variações dependendo de inúmeros fatores. Estes valores podem ser consultados bibliograficamente para as ligas de fundição mais comuns. No entanto, a parametrização das propriedades de moldações não permanentes podem apresentar um desafio devido à alta variação que existe entre diferentes fundições e peças. Este problema é evidente no IC, não só pelos problemas anteriormente mencionados como também pela sua constituição anisotrópica. A determinação experimental destes valores é também dispendiosa e morosa. É importante mencionar que o *software* não contabiliza também fatores como o erro humano, deficiências do processo e a variação de composição química das ligas de vazamento por contaminação (23).

2.2.2. Método das Diferenças Finitas

Consiste na divisão do domínio (modelo) num número finito de células definidas nos eixos x, y e z. O seu tamanho é definido pelo utilizador quando este é criado, sendo constante ao longo da malha. O utilizador deve escolher este parâmetro atendendo às secções mais finas

da peça. A redução do tamanho das células resulta numa malha mais precisa e, conseqüentemente, aumenta o tempo de cálculo exponencialmente. Os cálculos são realizados pela expansão da série de *Taylor* das equações correspondentes aos parâmetros a simular, sendo as propriedades dentro de cada célula consideradas constantes. Cada iteração realizada tem por base a interação entre células vizinhas. Uma vez que estas estão definidas em x, y e z, a orientação do modelo afeta os resultados obtidos (2,23).

2.2.3. Método dos Elementos Finitos

Por sua vez, não procura a resolução das equações representativas de cada fenómeno, utilizando a forma integrada das mesmas. O domínio é definido por diferentes pontos (nós) e as arestas criadas pela sua ligação, obtendo-se geralmente triângulos denominados de elementos. A distância entre os nós define o tamanho dos triângulos e pode ser variada ao longo do modelo, permitindo simultaneamente representar secções finas e poupar tempo de cálculo em secções grosseiras. Desta forma, os cálculos em fundição são realizados pela temperatura em cada nó. Este método origina cálculos com maior precisão. No entanto, pode requerer mais tempo e maior utilização de memória quando comparado ao método das diferenças finitas. Erros de cálculo podem também surgir na criação da malha neste método por ligação incorreta dos nós. Conseqüentemente, pode ser necessária uma verificação cuidada e morosa da malha pelo utilizador. A orientação da peça não afeta os resultados, uma vez que o posicionamento dos nós é definido de forma relativa (1,2,22,23,25).

2.2.4. Software de Simulação de Fundição

O *software* de simulação utilizado para a realização da presente dissertação será o SOLIDCast. Apresentam-se de seguida 3 programas considerados topo de gama em simulação de fundição, bem como o SOLIDCast, com especial ênfase no último.

MAGMASOFT

O MAGMASOFT é desenvolvido pela MAGMA GmbH, empresa multinacional sediada na Alemanha. Possui uma estrutura modular, com módulos correspondentes a diferentes ligas, processos (incluindo tratamentos térmicos e acabamento), moldes permanentes (com acompanhamento de ciclo de vida), bem como moldações e macharia, entre outros. Permite a simulação de praticamente todos os processos de fundição, ligas e defeitos. Ligas ausentes da base de dados podem também ser introduzidas no modelo sob a forma de gráficos das suas propriedades relevantes em função da temperatura. A interface do

utilizador mantém-se constante entre módulos, resultando numa utilização fácil e intuitiva (26).

O modelo matemático do programa baseia-se no método das diferenças finitas. Os resultados permitem avaliar diversos parâmetros da solidificação, enchimento e arrefecimento. Fornece informação relativa à microestrutura, tensões residuais, distorção e propriedades ao longo de todo o modelo (26).

A MAGMA APPROACH é uma metodologia sistemática integrada no *software* que guia o processo de projeto de fundição através da definição clara de objetivos e variáveis, bem como simulação automática para várias peças e critérios de custos ou qualidade, com ferramentas estatísticas para fácil análise e interpretação dos diferentes resultados obtidos. Esta metodologia suporta a realização do método inverso através da importação de dados experimentais, possuindo métodos de análise gráfica para ajuste dos parâmetros de simulação (27).

ProCAST e QuikCAST

O ProCAST é distribuído pelo Grupo multinacional ESI, baseado em França. Utiliza o modelo matemático das diferenças finitas. Tal como o MAGMASOFT, é bastante completo nos materiais, processos (incluindo tratamentos térmicos) e na detecção de defeitos. Possui também um módulo de cálculo termodinâmico. Desta forma, é possível obter, através da composição química, as propriedades relevantes em função da temperatura (28)

A interface do programa está inserida no *Visual-Environment* da ESI, permitindo ligação fácil com o restante *software* da empresa. Encontra-se dividido em *Visual-Mesh*, *Visual-CAST* e *Visual-Viewer*. A primeira etapa consiste na importação do modelo CAD no *Visual-Mesh* e, com o auxílio das suas ferramentas, a criação da malha a simular. Este é aberto no *Visual-CAST*. Pode-se recorrer a assistentes virtuais (“*wizards*”) para definição do processo e às bases de dados dos diversos materiais de molde/moldação, ligas e material como mantas e camisas exotérmicas. Por fim, o *Visual-Viewer* permite a visualização personalizada dos dados obtidos por simulação, pela criação de gráficos ou animações (28).

Os *solvers* de otimização do ProCAST permitem a melhoria dos parâmetros do processo, do *design* do cacho e avaliar a robustez do processo perante variações que inevitavelmente se verificam industrialmente. Possui também um *solver* para aplicação do método inverso, determinando condições de fronteira e propriedades de materiais a partir de valores de temperatura medidos experimentalmente (28).

O QuikCAST, também distribuído pelo grupo ESI, apresenta-se como uma alternativa mais económica, simples e menos com requisitos de *hardware* menos exigente. Consegue

corresponder às necessidades de fundições na maioria dos casos com tempos de simulação relativamente baixos, reduzindo o tempo de projeto de fundição (28).

FLOW-3D Cast

O Flow 3D é distribuído pela *Flow Science*, empresa norte-americana. O programa possui diferentes variações, entre as quais se encontra o Flow-3D Cast. No entanto, existem também versões para fabrico aditivo, soldadura e hidráulica. Também estão disponíveis módulos para automatização de simulações e otimização, apresentação de resultados e para tecnologia *cloud* (29).

A criação da malha é feita através do seu sistema FAVOR. O seu modelo matemático é único, combinando as vantagens da malha em grelha com elementos retangulares (método das diferenças finitas) e malha com grelhas que replicam as linhas da superfície do modelo (método dos elementos finitos). Este sistema possibilita a alteração da geometria do modelo sem a criação de uma nova malha, facilitando o processo de preparação para simulação (29).

O Flow-3D possibilita a simulação em todos os métodos de fundição utilizados industrialmente. No entanto, não estão presentes na base de dados superligas e ligas preciosas. Comparativamente ao restante *software* mencionados é menos abrangente na deteção de defeitos, não sendo possível detetar propensão a fissuração a quente e defeitos gasosos, bem como variações anormais de microestrutura ou propriedades na peça vazada (29).

Os 3 programas mencionados anteriormente (MAGMASOFT, ProCAST e Flow-3D Cast) podem ser considerados topo de gama em simulação de fundição (29).

SOLIDCast

O SOLIDCast é um programa de simulação de fundição baseado no método das diferenças finitas produzido pela *Finite Solutions*. Destaca-se pelo seu preço competitivo, sendo por isso o *software* de simulação mais utilizado, particularmente em instituições de ensino e fundições de pequena e média dimensão como, por exemplo, a FERESPE. O programa possui diversas ferramentas, principalmente para fundição em areia, IC e fundição em coquilha (30,31).

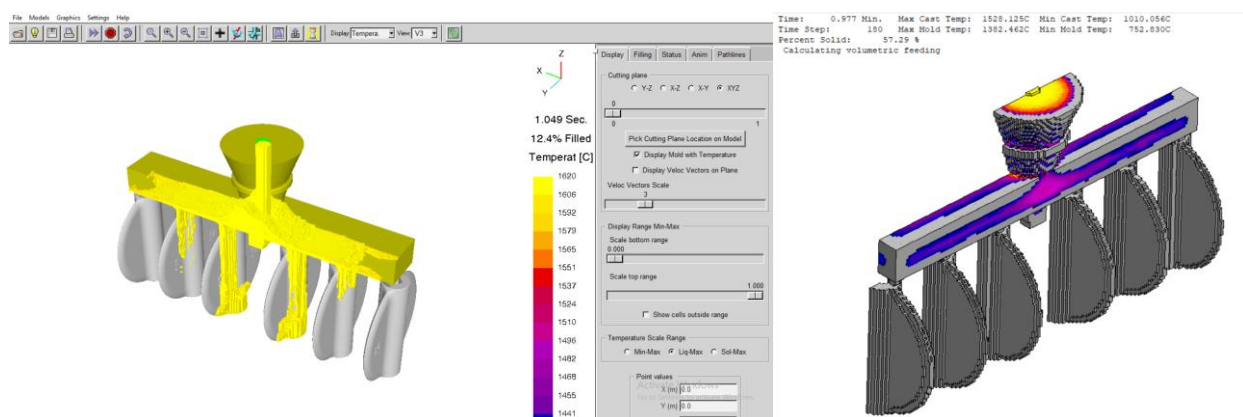
O SOLIDcast possui uma base de dados integrada de diversas ligas de vazamento, materiais de moldes e moldação, bem como materiais de outros componentes utilizados no vazamento, como mantas e camisas exotérmicas. Em alternativa, é possível a criação de um novo material através da inserção das suas propriedades no programa. O método inverso

é possibilitado através da inserção de até 8 termopares virtuais. Os dados podem ser posteriormente exportados para análise sob o formato *txt*. (32).

O SOLIDCast possui ferramentas para auxílio da determinação da geometria necessária para o sistema de alimentação e gitagem: *Riser* e *Gating Design Wizard*, respectivamente. Em *Riser Design Wizard*, a tradicional determinação de pontos quente e dos respectivos módulos é aliada a ferramentas que permitem a conciliação entre as dimensões e volume de cada alimentador através do input das variáveis desejadas para o cacho. De forma análoga, o *Gating Design Wizard* auxilia o projeto de sistema de gitagem a partir de critérios definidos pelo utilizador, tendo por base os princípios basilares da concepção de tais componentes. Para o vazamento de ferros fundidos, o SOLIDcast possui também um módulo de cálculo de variação volumétrica de ferros fundidos apresentado também nesta janela (*Iron Calculation*) (32).

A simulação de enchimento e solidificação pode ser realizada na íntegra pelo SOLIDCast. Em alternativa, a simulação de enchimento da cavidade moldante, bem como o sistema de alimentação e gitagem, pode ser realizada através do módulo especializado FLOWCast com posterior simulação de solidificação no SOLIDCast. Os cálculos de mecânica de fluidos computacional têm por base as equações de *Navier-Stokes*. Isto permite a simulação do percurso de partículas pelo modelo, possibilitando análise de possível turbulência ou formação de vórtices no modelo, bem como o trajeto de possíveis partículas de sujidade ou óxidos. A velocidade do metal líquido é também calculada em cada ponto, tornando este módulo particularmente útil para a avaliação da eficácia do sistema de gitagem elaborado, bem como a propensão ao desenvolvimento de defeitos de fundição relacionados com o fluxo durante o enchimento (23,32).

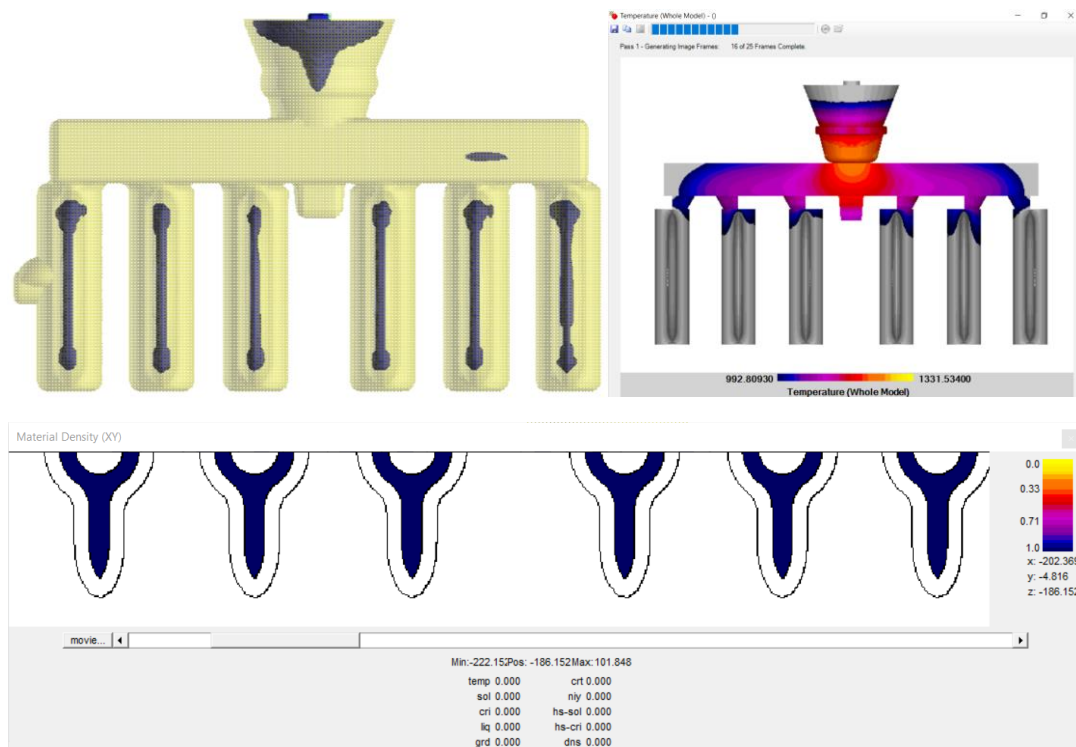
O SOLIDCast possui também o módulo OPTICast. Esta ferramenta auxilia a otimização do *design* do sistema de gitagem e alimentadores, automatizando o processo de melhoria após definição de variáveis, restrições e funções objetivo para o cacho e peça pretendidos.



Figuras 3 e 4: Simulação de enchimento no FLOWCast e simulação de solidificação no SOLIDCast, respetivamente

Após a simulação existem diversos critérios que podem ser utilizados para interpretação do sistema modelado. Pode-se observar ao longo de toda a geometria valores como o tempo de solidificação, tempo de fração crítica sólida, densidade material (Material Density), gradiente térmico, taxa de arrefecimento, critério de Niyama, pontos quentes, bem como critérios personalizados (32).

A janela *Simulation* permite a representação dos resultados de diversas formas. *Iso-Surface* é obtido através da inserção de um único valor. O modelo é apresentado tridimensionalmente com superfície transparente, sendo visíveis as secções com valores correspondentes ao input do utilizador no interior. Os resultados obtidos na presente dissertação serão representados desta forma. Em alternativa, *Cut-Plane* permite a observação em determinado plano (X-Y, X-Z ou Y-Z), possuindo a vantagem de representar a variação do critério escolhido ao longo da geometria com recurso a diferentes cores e legenda correspondente. *CastPic* combina as vantagens dos métodos anteriores, criando um modelo 3D com diferentes valores representados por cores e correspondente legenda, possibilitando ainda visualização do modelo pelos planos de corte anteriormente mencionados (23,32).



Figuras 5, 6 e 7: Apresentação de resultados por *Iso-Surface* (esquerda) *CastPic* (direita) e *Iso-Plane* (baixo), respetivamente

3. Metodologia e Procedimento Experimental

3.1. Metodologia Planificada

Para uma parametrização eficaz do SOLIDCast na prevenção de defeitos foi aplicado o método inverso. Conforme descrito nos fundamentos bibliográficos, este método permite a determinação de propriedades das carapaças cerâmicas através do ajuste dos gradientes térmicos obtidos em simulação com os obtidos experimentalmente, dando deste modo cumprimento aos objetivos estabelecidos.

O fluxograma da metodologia planificada para a presente dissertação está apresentado na figura 8. Peças vazadas na FERESPE durante o período de realização da presente dissertação foram escolhidas e sensorizadas com termopares (tipo K na carapaça cerâmica e tipo R, S ou B na cavidade moldante). As curvas registadas serão posteriormente comparadas às obtidas pelo SOLIDCast com os parâmetros originalmente utilizados pela FERESPE. Segue-se a análise dos resultados obtidos e o ajuste iterativo das propriedades das carapaças com vista à replicação da curva experimental. Com este processo, são obtidos os valores de condutividade térmica, calor específico e densidade associados às condições experimentais. Numa etapa final verifica-se se o SOLIDCast, com a consideração dos valores previamente determinados, melhor prevê os defeitos nas peças vazadas.

Paralelamente, foram planeados ensaios físicos experimentais às propriedades das carapaças cerâmicas anteriormente mencionadas. Desta forma, os ensaios de densidade pelo método de Arquimedes para determinação da densidade (ASTM C20-00) (33), medições em *Laser Flash Diffusivity* (ASTM E 1461 - 01) (34) para determinação da condutividade térmica, e aplicação do método de 3 ensaios num equipamento de DSC (ASTM E1269 - 11) (35), permitem obter informação complementar à obtida por aplicação exclusiva do método inverso. A inclusão destes resultados na simulação em SOLIDCast possibilitam concluir se a caracterização física da carapaça melhora a prevenção de defeitos.

Sendo conhecidas as simplificações consideradas na modelação do SOLIDCast, o uso de um *software* de simulação alternativo, por fim, avaliaria o efeito da variação das propriedades em estudo.

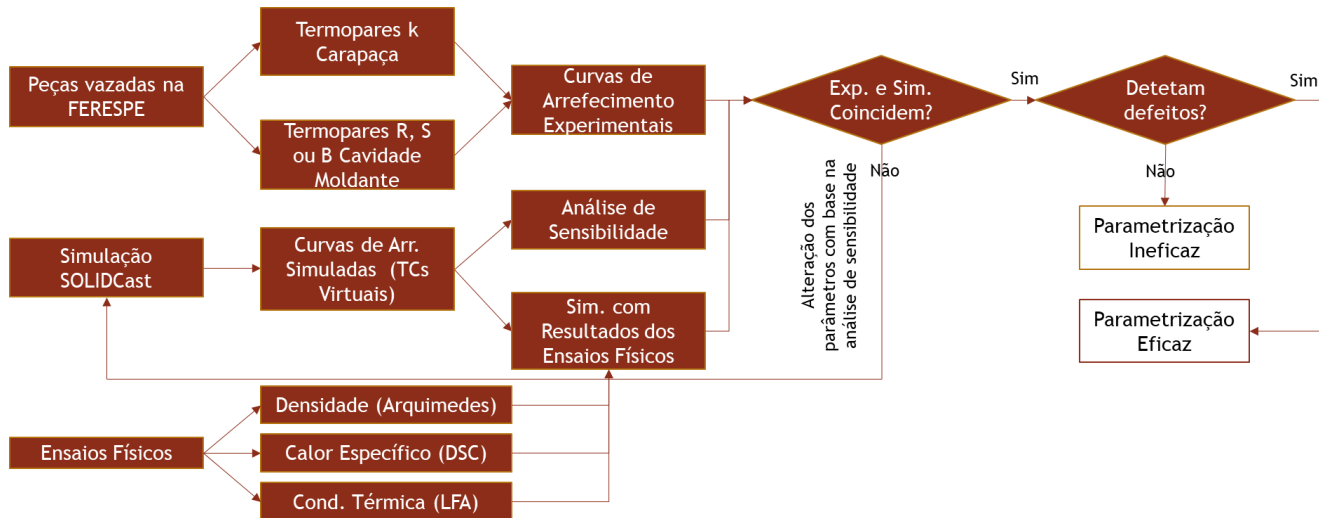


Figura 8: Metodologia Planificada

3.2. Processo de IC na FERESPE

O processo de IC começa com a engenharia do produto. A geometria da peça é modelada através do *software PTC Creo*, desenvolvido pela *PTC*, tendo os requerimentos do cliente em conta. Segue-se a escolha do número de peças por cacho e do sistema de giteamento adequado, bem como o dimensionamento de alimentadores e ataques. Esta etapa é acompanhada por simulação de enchimento e solidificação com recurso ao *SOLIDCast* e ao seu módulo *FLOWCast* (36).

A partir do modelo CAD é elaborado o molde metálico para a injeção dos modelos em cera. A FERESPE possui também equipamento para a sua produção por prototipagem rápida (*stereolithography* (SLA)), em alternativa aos moldes metálicos para casos muito específicos de pequenas séries e timings de produção. Devido ao seu efeito evidente na qualidade final do fundido, os moldes e modelos de cera são inspecionados com recurso a um sistema de digitalização fotométrica 3D. Após a injeção dos modelos, gitos, alimentadores e ataques o cacho é montado pelo processo tradicional de colagem (36).

Segue-se a obtenção da carapaça através da aplicação de camadas de barbotina e material refratário através de imersão. Cada etapa é seguida de secagem. Todo o processo ocorre numa sala ventilada com condições de humidade e temperatura controlada (36).

A retirada de cera é realizada juntamente com o pré-aquecimento e sinterização, com duração de cerca de 1h30 a temperatura até 1100 °C num forno de *high temperature flash*.

No mesmo forno são posteriormente pré-aquecidas várias carapaças simultaneamente, sendo retiradas, posicionadas e vazadas sucessivamente. Existem 3 fornos de indução disponíveis na ala de IC, 2 com capacidades de 50 kg e um de 150 kg (36).

A natureza manual e sucessiva do vazamento leva a perdas térmicas desconhecidas e variáveis entre vazamentos e peças, tanto no metal na colher como nas carapaças cerâmicas.

Por fim, as peças são separadas do cacho e sofrem operações de acabamento. A FERESPE realiza granalhagem (partículas metálicas ou cerâmicas), lixagem (máquina lixadora de cinta) e tratamentos térmicos *in situ*, subcontratando ainda revestimentos, maquinagem e tratamentos químicos a parceiros. A FERESPE realiza ainda controlo de qualidade através de ensaios destrutivos (ex: preparação metalográfica para observação microestrutural e ensaios de dureza) e não destrutivos (ex: líquidos penetrantes, espectrómetro de emissão ótica e radioscopia) (36).

3.2.1. Ligas em Estudo

AISI 4140

O aço de baixa liga AISI 4140 apresenta uma composição semelhante ao AISI 4130, possuindo apenas um teor superior de carbono. Contém como elementos de liga principais cromo e molibdénio. A sua composição está apresentada na tabela 3 (37). É um aço versátil, sendo utilizado em diversos componentes para as indústrias automóvel (ex: cambotas), da agricultura e da defesa, bem como engrenagens e peças para união mecânica em diversas aplicações (38).

É também possível recorrer a soldadura com AISI 4140, apesar do teor de carbono superior diminuir a sua soldabilidade comparativamente ao aço AISI 4130. É frequentemente endurecido por tratamento térmico, nomeadamente têmpera e revenido. Com este método é possível obter facilmente resistência à tração até 1650 MPa. Pode ser conformado por forjamento, usualmente a temperaturas entre 1100 °C e 1200 °C (39, 40).

Tabela 3: Composição química da liga AISI 4140 (37)

Cr (%)	Mn (%)	C (%)	Si (%)	Mo (%)	S (%)	P (%)	Fe (%)
0.8-1.1	0.75-1.0	0.38-0.43	0.15-0.30	0.15-0.25	0.040	0.035	Restante

CF-8M

As ligas ASTM CF-8M são aços inoxidáveis fundidos indicados para aplicações de resistência à corrosão (indicado pela letra “C”). São aços inoxidáveis de matriz austenítica, possuindo também ferrite δ (delta). Os seus principais elementos de liga são o cromo, níquel (a letra “F” indica o teor destes elementos) e molibdénio (representado da letra “M”), com um teor de carbono inferior a 0,08% (o número “8”, quando multiplicado por 0,01, indica a percentagem de carbono máximo) (13).

A presença de ferrite melhora a resistência mecânica, a resistência à fragilização por corrosão sob tensão e a soldabilidade por redução do risco de fissuração a quente. O molibdénio melhora a resistência à corrosão por fissura e picada, possibilitando a utilização em contacto com ácido sulfúrico e acético, bem como na indústria do papel. A composição semelhante aos aços de trabalho AISI 316 como se pode observar na tabela 4 (13).

Os aços CF-8M são tratados termicamente para homogeneização após vazamento ou para solubilização de carbonetos prejudiciais à resistência à corrosão formados no arrefecimento, como o carboneto de cromo (13).

Tabela 4: Composição química da liga CF-8M; * teor máximo; (13)

Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Si* (%)	Mn* (%)	P* (%)	S* (%)	C* (%)
18,0- 21.0	9,0- 12.0	2,0-3.0	1,50	1,50	0,04	0,04	0,08

3.2.2. Software de Simulação de Fundição Utilizado: SOLIDCast

Optou-se pelo SOLIDCast para a realização do presente trabalho, uma vez que este é o *software* de simulação disponibilizado pela FEUP, bem como o programa utilizado na FERESPE. A utilização de um segundo programa de simulação não foi possível por impossibilidade de obtenção de uma licença de estudante dos programas topo de gama anteriormente mencionados. Este programa foi introduzido na FERESPE em 1995, sendo utilizado até hoje na divisão de fundição em areia com resultados satisfatórios. No entanto, a descoberta de defeitos recorrente em peças vazadas não detetados por este *software* põe em causa a sua aplicabilidade na divisão da FERESPE de IC.

Apesar da sua utilidade comprovada, bem como um leque de ligas disponíveis para simulação bastante competitiva, o SOLIDCast apresenta limitações notórias comparativamente com os outros programas, considerados topo de gama, anteriormente mencionados.

O SOLIDCast não é capaz de simular determinados processos de fundição, sendo apenas utilizado para fundição em areia, coquilha e IC. Desta forma, a compra do SOLIDCast deve ser condicionada pelos processos que cada empresa ou instituição pretende simular. Outra

lacuna do programa é a incapacidade de detetar heterogeneidade no fundido relativa a microestrutura, propriedades e tensões resultantes. O utilizador do SOLIDCast deve reconhecer esta limitação quando realiza projeto de fundição.

A principal desvantagem no âmbito do presente trabalho é a utilização de valores das propriedades térmicas para efeitos de cálculo, nomeadamente a condutividade térmica e o calor específico, como constantes ao longo de todo o processo. É de salientar que estas propriedades sofrem variações significativas durante a solidificação e arrefecimento do metal vazado e, com especial relevância neste contexto, a carapaça. Logo, esta aproximação levará inevitavelmente a uma replicação ineficaz de todo o enchimento e solidificação (41).

A Interface do programa pode também ser considerada antiquada, levando a uma etapa de habituação e aprendizagem especialmente longa para alguns utilizadores (41).

3.3. Medição de curvas de arrefecimento

De forma a realizar a parametrização do *software* é vital entender as diferenças entre os dados obtidos por simulação com os parâmetros utilizados atualmente pela FERESPE e os resultados experimentais. Estes parâmetros iniciais podem ser consultados em nos anexos.

No entanto, a parametrização eficaz requer o input das propriedades térmicas dos materiais envolvidos no processo no SOLIDCast. As propriedades pedidas pelo SOLIDCast para a carapaça são a condutividade térmica, calor específico e densidade. Estas podem ser medidas experimentalmente por diferentes ensaios laboratoriais, como é evidenciado na revisão bibliográfica. É também possível a sua determinação indireta através do *software* de simulação com o método inverso.

O primeiro passo consiste na recolha da temperatura em função do tempo de determinado ponto do sistema durante o vazamento. As 3 peças inicialmente selecionadas (D, C e V) foram escolhidas entre as peças vazadas pela FERESPE durante o período do estágio da presente dissertação de mestrado. Os dados de temperatura foram recolhidos com recurso a termopares tipo k e um registador Fluke 54 II, ambos fornecidos pela FERESPE. A colocação de termopares na cavidade moldante não foi possível pelo custo associado ao uso dos termopares necessários.

Os pontos utilizados foram escolhidos com base na localização de defeitos ocorrentes em versões prévias na geometria a vazar para as Peças C e V. Na peça D, que é vazada frequentemente sem defeitos, escolheu-se um respiro exterior do cacho. Em todas as peças foi tida em conta a fixação eficaz e estável do termopar, uma vez que a carapaça com termopar necessita de ser transportada desde o forno de pré-aquecimento até ao local de

vazamento. Para a sua fixação recorreu-se a arame e massa *X9 Plaster* fornecida pela FOSECO

O vazamento é gravado, possibilitando a determinação do tempo médio de enchimento de cada geometria para posterior inserção no modelo de SOLIDCast. O intervalo de tempo entre a saída do forno de pré-aquecimento e o vazamento é também avaliado pelo vídeo do vazamento. Após vazamento, os pontos de temperatura em função do tempo são exportados do registador para o *Microsoft Excel*, sendo escolhido o ponto de início de vazamento com base no intervalo de tempo entre o início de descida de temperatura observado no gráfico e o tempo entre saída do forno e vazamento cronometrado no vídeo. Toda a modelação CAD necessária foi realizada com recurso ao *software Fusion 360*.



Figuras 9, 10 e 11: Termopares acoplados nas peças D, C e V, respetivamente

3.4. Peças Analisadas

Peça C

Na figura 12 está apresentada a peça C, com a versão anterior do seu cacho e a sua versão atual, respetivamente. A curvatura da zona intermédia da peça apresenta duas secções finas de 9 mm ao longo da peça. O topo possui a maior espessura de secção (37 mm). A simulação inicial da peça com o critério de densidade material =1 (critério que deteta lacunas na malha após solidificação) não prevê macrorrechupes nestas condições. No entanto, uma das peças do cacho apresenta propensão à formação de microrrechupe segundo o critério FCC (critério que avalia propensão à formação de microporosidade) a 30%.

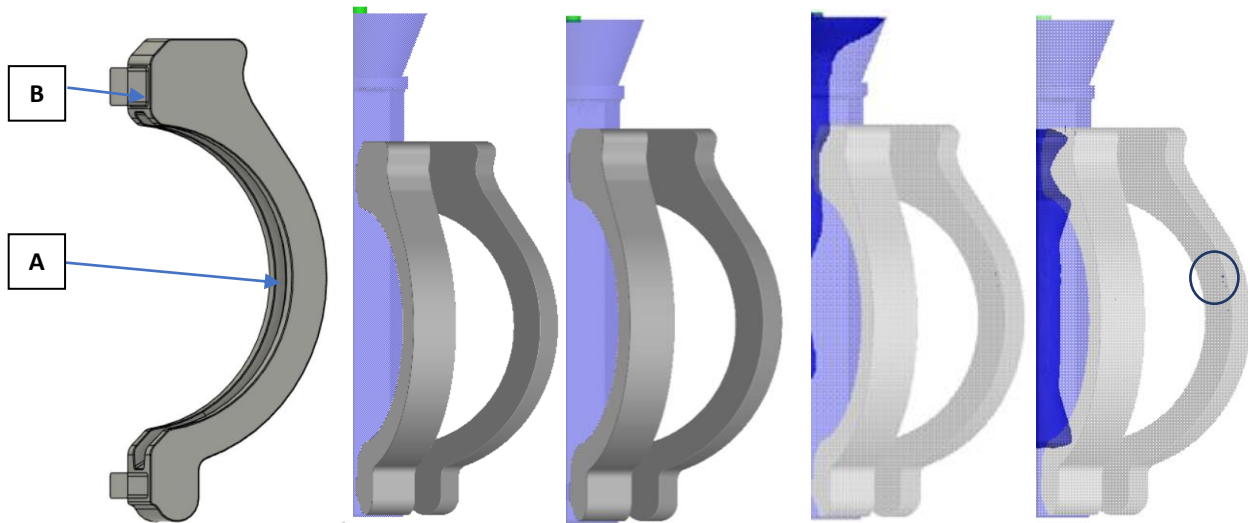
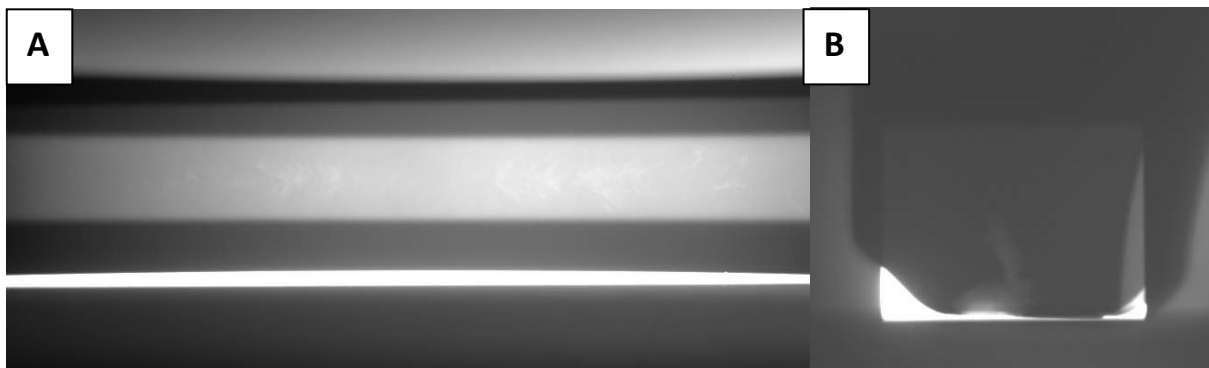


Figura 12: (da esquerda para a direita) Peça C; Versão anterior do cacho; Versão atual do cacho; Propensão a macrorrechupe segundo Material Density=1; Propensão a microrrechupe segundo critério FCC a 30%

Controlo de qualidade por radiografia revelou maior prevalência de microporosidade na secção central comparativamente ao previsto em simulação (figura 13). A versão anterior do cacho (Figura 14) apresentou macrorechupe na secção B. No entanto, a versão atual do cacho não revela este defeito.



Figuras 13 e 14: Defeitos observados em radiografia após vazamento: a) Microrrechupes na secção intermédia; b) Topo

Foram vazadas 3 carapaças distintas da versão mais atual deste cacho. Por este motivo, colocou-se um termopar na carapaça cerâmica da peça C antes do pré-aquecimento. O termopar foi posicionado entre a secção massiva entre duas peças. Foi escolhida a última carapaça de forma a ter em conta em simulação as perdas térmicas que ocorrem do pré-aquecimento até ao vazamento da última carapaça. Consequentemente, é esperada uma

maior propensão a defeitos, tornando-a especialmente relevante para o caso de estudo. Após o vazamento as peças foram cobertas por um recipiente metálico para diminuir a interação do metal com o O_2 e a consequente criação de óxidos (carepa) de difícil granalhagem.

A temperatura foi recolhida do pré-aquecimento até ao arrefecimento da peça vazada em intervalos de 30 segundos. Este valor foi ajustado para 10 segundos para as peças seguintes de forma a obter uma curva mais bem definida em análise com baixos intervalos de tempo. Este fator é especialmente importante durante a realização do método inverso, uma vez que o aumento da condutividade térmica e calor específico diminuem o tempo de solidificação e, consequentemente, o intervalo temporário analisado, conforme descrito por (16).

Para uma replicação fiel do cacho vazado, a massa utilizada para fixação do termopar foi modelada conforme apresentado na figura 15. O termopar virtual foi inserido no modelo entre a mesma e a carapaça cerâmica.



Figura 15: Massa modelada na carapaça da peça C

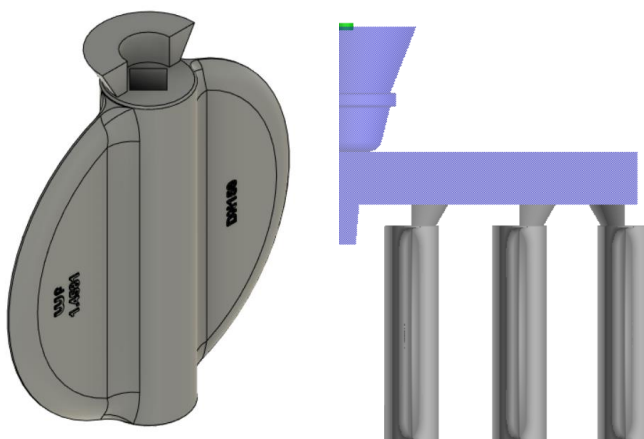
Após obtenção de resultados iniciais significativamente diferentes do observado bibliograficamente e dos parâmetros originais, procedeu-se a alterações no modelo, procurando uma representação mais eficaz das condições de vazamento. Os parâmetros avaliados foram a utilização de cálculo de *View Factor* antes da simulação, redução do valor de CFS para 30% e tentativa de modelação do ar quente no interior da cobertura metálica utilizada após vazamento.

Peça D

A peça D e o modelo do cacho desta modelado em SOLIDCast podem-se observar nas figuras 16 e 17. A sua secção mais fina é de 6 mm na ligação entre o ataque e o topo da peça, observando-se a espessura máxima de 13 mm nas paredes laterais da peça.

Esta peça é vazada frequentemente na FERESPE, existindo apenas microrrechupes pontuais considerados aceitáveis na secção central conforme apresentado na figura 20. O SOLIDCast prevê a formação de micro e macroporosidade quando a peça é analisada pelos critérios originais anteriormente mencionados.

A fixação do termopar foi realizada no respiro central de uma peça exterior do cacho. O termopar foi dobrado de forma a replicar a curvatura do respiro, sendo coberto por massa *X9 Plaster* e fixo com recurso e arame.



Figuras 16 e 17: Peça D (esquerda) e respetivo cacho (direita)

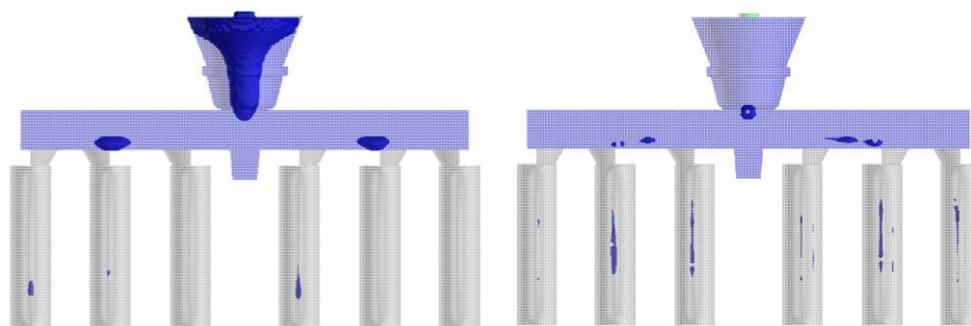


Figura 18 e 19: Propensão a macrorrechupe segundo densidade material=1; Propensão a microrrechupe segundo critério FCC a 30%

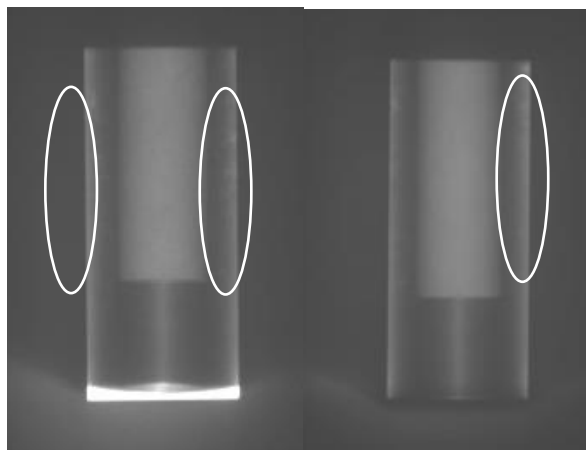
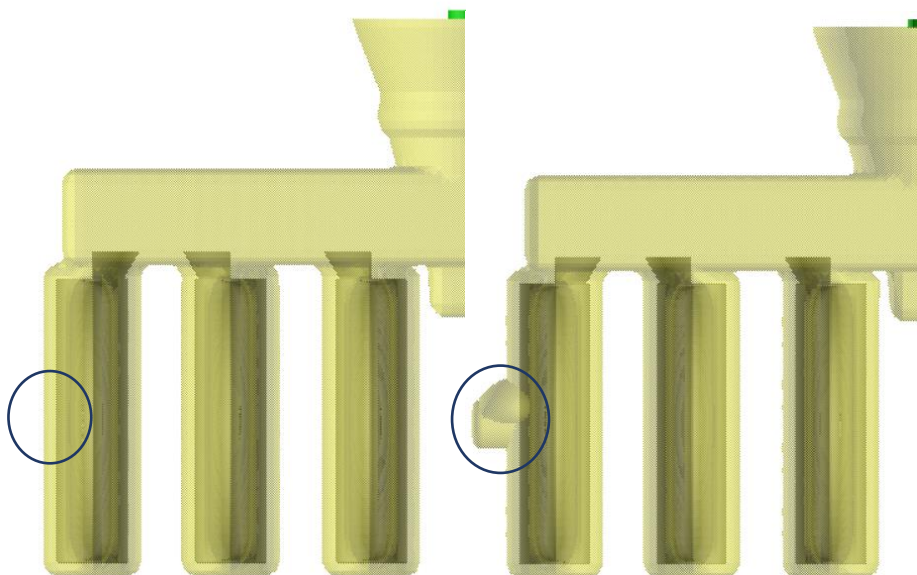


Figura 20: Defeitos detetados por radiografia na peça D



Figuras 21 e 22: Cacho com carapaça da peça D antes (esquerda) e depois (direita) da modelagem do respiro

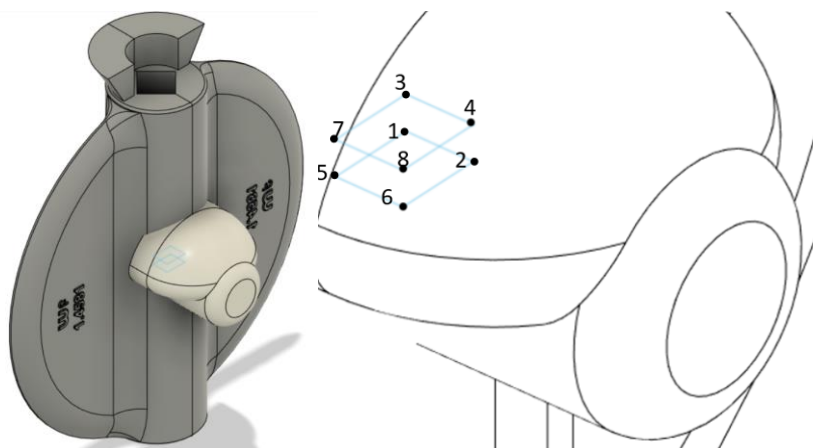
A peça D foi modelada conforme evidenciado nas figuras 21 e 22. Nesta peça, a planificação realizada previa a fixação do termopar em contacto com a superfície da carapaça cerâmica, repousando num respiro adicionado ao cacho. No entanto, dificuldades de fixação levaram à necessidade de colocação entre a carapaça, o respiro e o termopar. A fixação realizada foi ineficaz, levando à movimentação do termopar no interior da massa *X9 Plaster* durante o manuseamento.

A modelação no SOLIDCast inicial não incluiu o respiro, uma vez que a simulação não é usualmente feita com respiros na FERESPE. No entanto, revelou-se impossível a colocação do termopar no modelo de forma representativa do vazamento. Desta forma, realizou-se

um estudo do efeito do posicionamento do termopar ao longo da massa modelada para melhor compreender o erro associado à variação de posição deste.

Tabela 5: Distância ao fundido e à atmosfera dos termopares virtuais

Ponto	Distância Interna (fundido; mm)	Distância Externa (atmosfera; mm)
1	0,32	9,84
2	7,60	7,86
3	0,32	12,25
4	7,60	10,53
5	6,59	1,95
6	12,51	1,31
7	6,59	4,23
8	12,51	3,53



Figuras 23 e 24: Peça D com massa e respiro modelados (esquerda); Posição relativa dos pontos escolhidos (direita)

Peça V

Na figura 25 Pode-se observar a geometria da peça V, bem como o respectivo cacho modelado no SOLIDCast. Esta peça é, na sua generalidade, massiva, apresentando espessura de 25 mm máxima na base e espessura mínima de 5 mm nas paredes entre a base e o topo.

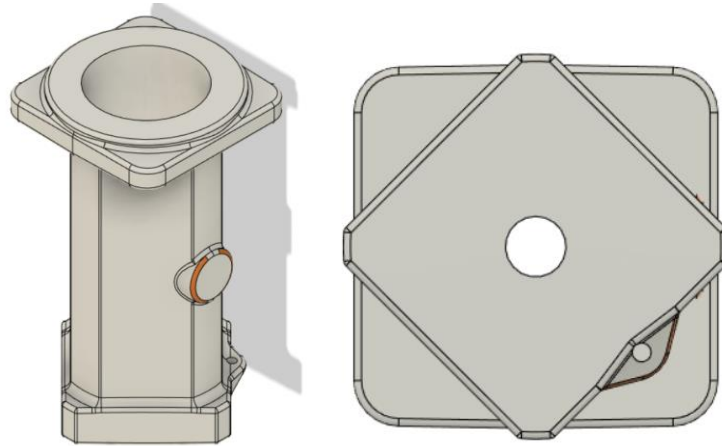
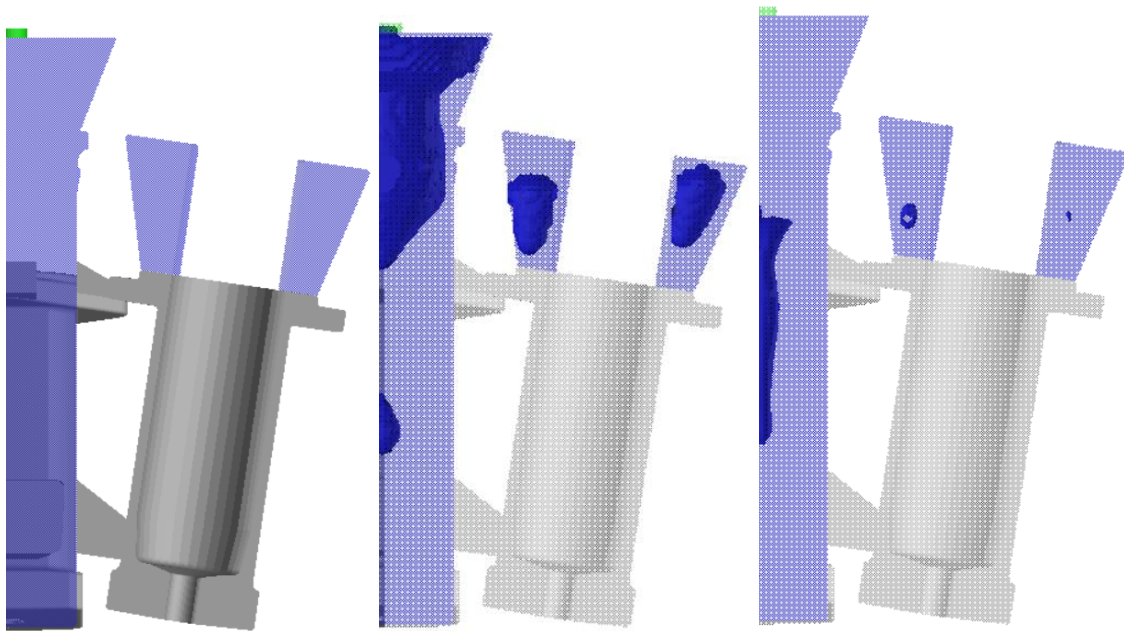


Figura 25: Peça V

A versão anterior do cacho, bem como os defeitos observados nas peças resultantes, estão presentes nas figuras 26, 27 e 28. Apesar de simulação inicial não detetar defeitos (figuras 27 e 28), verificam-se nas peças vazadas defeitos recorrentes como macrorrechupe nos alimentadores mais próximos do cacho e microrrechupe ao longo das paredes e na secção do topo. O controlo de qualidade através de líquidos penetrantes revelou também defeitos na região entre o corpo da peça e a secção superior (figuras 29-32).

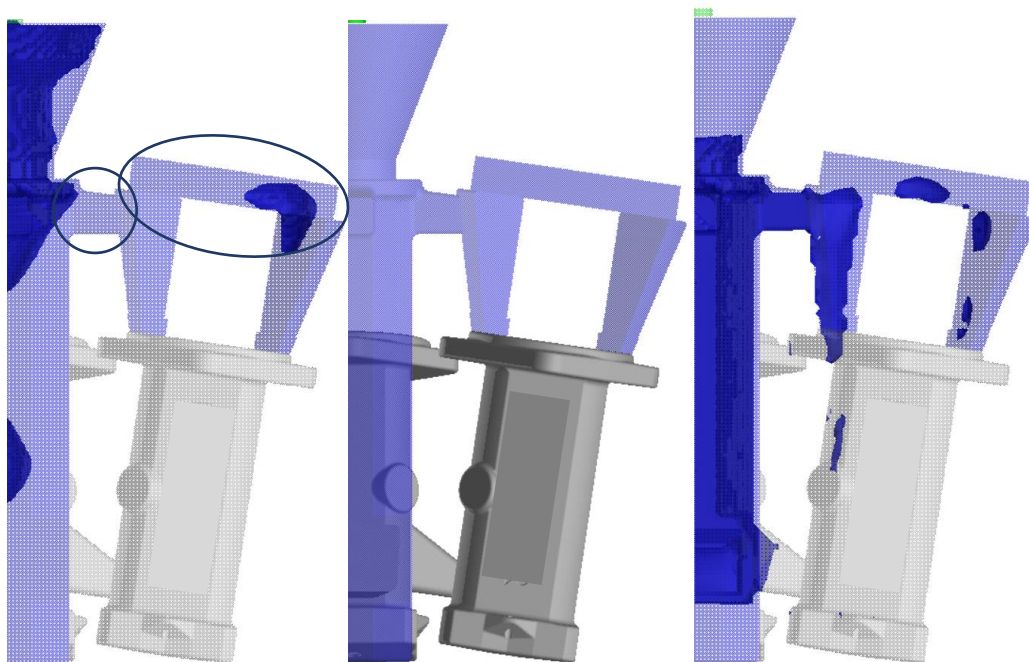


Figuras 26, 27 e 28: Cacho da peça V (Esquerda); Propensão a macrorrechupe segundo densidade material=1 (centro); Propensão a microrrechupe segundo critério FCC a 30% (direita)



Figuras 29, 30, 31 e 32: Defeitos detetados por líquidos penetrantes nas paredes da peça V (esquerda) e nos alimentadores (restantes)

Na versão atualizada do cacho foram adicionadas barras entre os 2 alimentadores de cada peça e um ataque que liga o gito ao alimentador mais próximo deste conforme a figura 33. O controlo de qualidade não revelou defeitos com esta geometria de cacho.



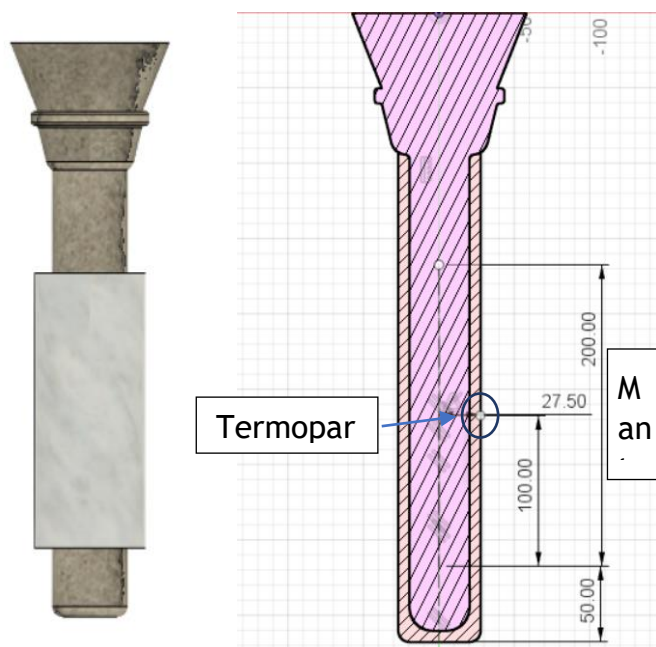
Figuras 33, 34 e 35: Versão atualizado do cacho da peça V; Propensão a macrorrechupe segundo densidade material=1; Propensão a microrrechupe segundo critério FCC a 30% (respetivamente)

Devido a dificuldades iniciais no ajuste das curvas de arrefecimento, foram realizadas alterações no modelo de forma a aproximar o mesmo das condições reais de vazamento. Nomeadamente, foi ajustado o valor de espessura das carapaças após medições (de 7,5 para 13 mm) e foi modelado ar quente entre alimentadores conforme recomendado pela *Finite Solutions*. Apesar da curva de arrefecimento simulada se aproximar à experimental, dificuldades no ajuste persistiram. Tendo em conta as conclusões retiradas na análise a peças anteriores, realizou-se a análise da peça V com o auxílio de uma peça de geometria simples e com condições mais facilmente replicáveis no modelo: Peça F.

Peça F

Devido a dificuldades na aplicação do método inverso verificados nas peças D e C, nomeadamente problemas na aplicação do método inverso em peças com geometrias complexas e dificuldade de replicação das condições de vazamento no *software* utilizado, recorreu-se ao vazamento de uma carapaça cerâmica de geometria simples de forma a orientar a aplicação do método inverso na peça V. A escolha de uma geometria simples é também motivada por metodologias observadas bibliograficamente (16,22).

O termopar foi colocado cuidadosamente na posição evidenciada na figura 39, sendo acoplado sem massa, utilizando-se apenas arame e uma manta envolvendo-o. O isolamento do termopar foi realizado de forma a eliminar a influência das condições de arrefecimento externas, conforme descrito por (16).



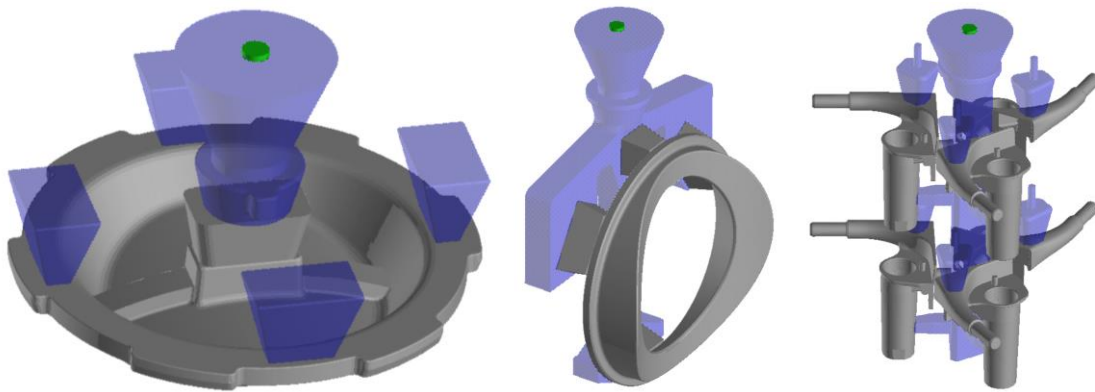
Figuras 36 e 37: Geometria da peça F com carapaça e manta modeladas; Posicionamento do termopar e manta

Para auxílio no método inverso utilizou-se o resultado obtido pelo ensaio de densidade, bem como a soma ponderada dos calores específicos dos constituintes da carapaça conforme recomendado por (18). O resultado do cálculo foi 1091 J/Kg*K.

Uma vez que as propriedades da manta isolante utilizada são também cruciais para o arrefecimento desta geometria, a condutividade térmica e a densidade foram introduzidas no *software* para a temperatura de 1000 °C. O calor específico não constou na informação fornecida, pelo que foi estimado pela soma ponderada dos seus constituintes. O valor obtido foi 1063 J/Kg*K.

Peças A, T e M: Validação de Resultados

Para além das peças analisadas experimentalmente, recorreu-se a outras peças vazadas pela FERESPE para validação dos resultados obtidos pelo método inverso. Estas peças apresentaram defeitos não detetados pelo SOLIDCast com as geometrias de cacho apresentadas, pelo que permitem comprovar a utilidade pragmática dos resultados obtidos para a FERESPE. Nas figuras 38, 39 e 40 estão apresentadas as peças escolhidas: T, A e M, respetivamente.



Figuras 38, 39 e 40: Peças T, A e M, respetivamente



Figura 41: Defeitos verificados nas peças vazadas T, A e M, respectivamente

3.5. Simulação e Parametrização do SOLIDCast

Em paralelo, realizou-se simulação do cacho. Os parâmetros e procedimentos usuais da FERESPE foram utilizados como ponto de partida (apresentados nos anexos) de forma a determinar que melhorias no procedimento e parâmetros a FERESPE deve adotar.

A utilização do programa começa pela inserção dos parâmetros de sistema adequados à peça e processo a simular (*tools > system parameters*). Destaca-se neste menu a definição da fração de sólido crítica (CFS, de *Critical Solid Fraction* em inglês), ponto de *Niyama* e % de encolhimento durante a solidificação.

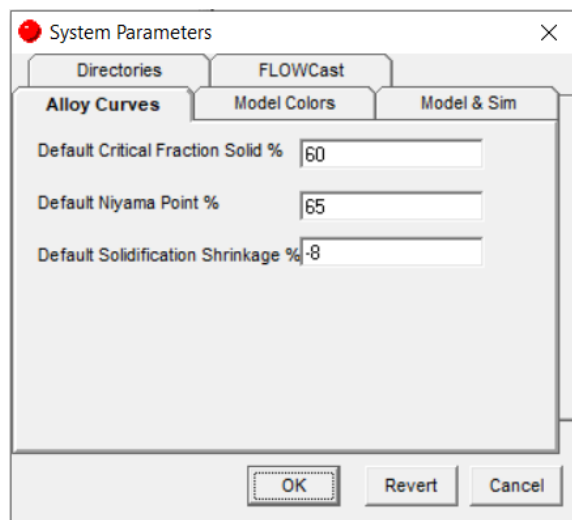
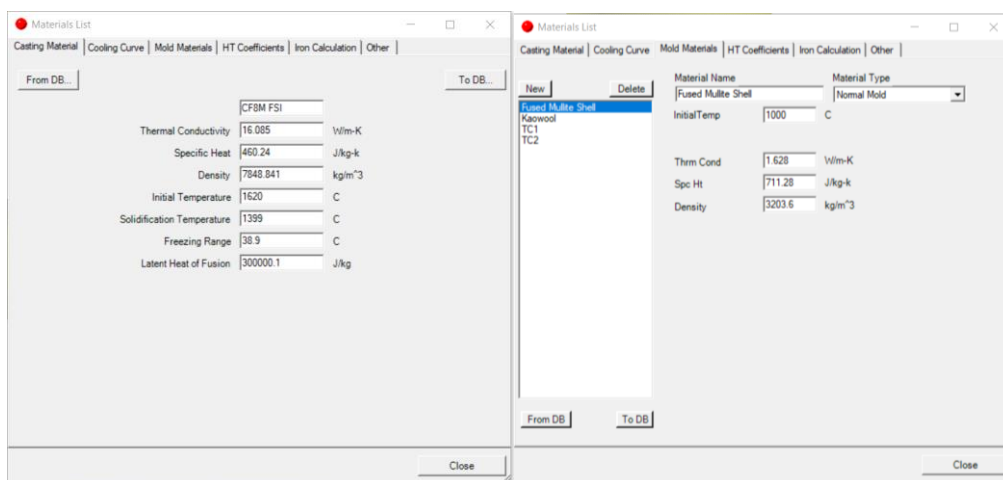


Figura 42: System Parameters

Após criação do projeto e modelo (*File > New Project; New Model*) e da sua gravação devem ser definidos os materiais a utilizar em *Model > Materials List*. A janela aberta permite importar da base de dados a liga de vazamento pretendida (*Casting Material > From BD...*), podendo-se ainda alterar as mesmas ou recorrer a uma liga fora da base de dados, inserindo cada uma das propriedades da liga pedidas pelo programa (*To DB...* para guardar a nova liga na base de dados, conforme apresentado na figura 43). A curva de arrefecimento da liga está presente na aba seguinte (*Cooling Curve*), no entanto, na presente dissertação não foram alteradas as curvas presentes na base de dados. Em *Materials List > Mold Materials* são inseridos os materiais de todos os componentes do sistema. Estes incluem a moldação, molde ou, no presente caso de estudo, a carapaça. O material de carapaça utilizado pela FERESPE, *Fused Mullite Shell*, foi fornecido diretamente pela *Finite Solutions*. As suas propriedades podem ser consultadas nos anexos.

Neste menu podem também ser adicionados outros componentes como camisas exotérmicas, mantas (utilizadas neste trabalho em algumas peças), e canais de arrefecimento no caso de simulação de vazamento em moldes permanentes. As restantes abas permitem definir o coeficiente externo de calor (*HT Coefficient*) pode também ser introduzido coeficiente de transferência de calor interno, apesar de ser apenas recomendado para fundição em coquilha), temperatura ambiente e tempo de vazamento (*Other*).



Figuras 43 e 44: Menu Materials List; Abas Casting Material e Mold Materials, respetivamente;

Em *Mold Materials* foram adicionados termopares virtuais no ponto desejado da carapaça. Estes termopares não são representados fisicamente no modelo, realizando apenas o registo da temperatura em função do tempo em determinado ponto. Para este efeito deve-se criar um novo material (*New*), escolher *Material Type* < *Cooling Channel* e *TemperatureON* < *High Limit*. Posteriormente podem ser inseridas as coordenadas desejadas para o termopar, sendo os resultados exportados em *Tools* > *Extract Thermocouple Data*.

Para a simulação em IC é recomendado o uso da opção “*Run View Factor Before Simulating*”. Esta opção calcula como as perdas de calor por radiação em determinada área da superfície da carapaça incidem noutra região, fornecendo-lhes energia calorífica. Este fator é particularmente relevante em IC, uma vez que as carapaças são pré aquecidas. Esta opção faz parte do procedimento de simulação na FERESPE e, conseqüentemente, foi utilizado na presente dissertação.

O modelo CAD é então adicionado por componentes, geralmente importados em formato *stl.*, elaborados num programa CAD, em *Edit* > *Add Shape* ou ícone na barra de ferramentas superior). Cada geometria é definida como cavidade moldante/peça, parte do sistema de alimentação e gitagem ou como um dos materiais inseridos em “*Mold Materials*”. Nesta etapa é importante definir a “*prioridade*” de cada componente de 1 a 10. No caso de sobreposição entre estes, o espaço será ocupado pelo componente com número de prioridade inferior. Desta forma, a ordem de prioridades deve ser a seguinte: Peça e enchimento, sistema de alimentação e gitagem, molde/moldação/carapaça cerâmica e, por fim, os restantes componentes.



Figura 45: Cacho com Peças (cinzento), Gito e Bacia (Azul)

No caso do IC, a carapaça cerâmica pode ser gerada pelo programa a partir de um ficheiro *stl*. do cacho. Em “*Tools*” pode-se criar o ficheiro através da funcionalidade “*STL From Model*”. Posteriormente, a função “*Create Shell Around STL Shape*” permite criar a carapaça, definindo-se a espessura desta, o refinamento do modelo e se o topo desta é aberto ou fechado. Após uns segundos a carapaça está pronta para ser inserida no modelo.

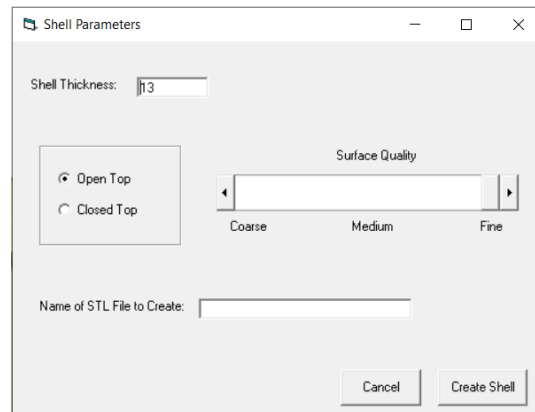


Figura 46: Shell Parameters

Resta apenas a colocação de um cilindro correspondente à entrada do metal líquido (*Fill Material*) no topo da bacia de vazamento e o malhamento do modelo. Este é realizado pelo método das diferenças finitas, podendo ser definido pelo utilizador o tamanho de cada célula ou o número total de células que compõem o modelo.

De forma a reduzir o tempo de simulação as (*Model > Options > Symmetry*)

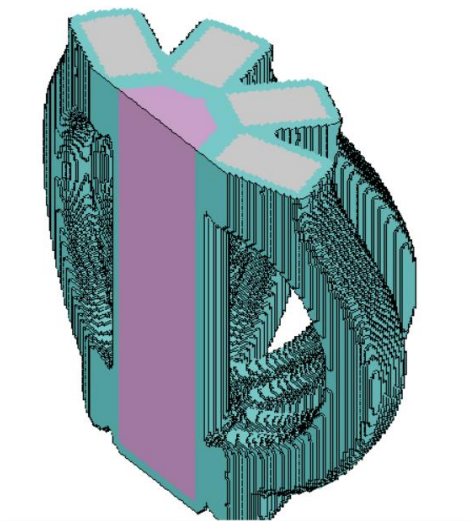


Figura 47: Criação da Malha com Carapaça (verde), Gito (lilás) e Peças (cinzento)

Por fim, é realizada a simulação de enchimento com recurso ao FlowCast, bem como solidificação até arrefecimento e solidificação total no SOLIDCast.

Na FERESPE, bem como ao longo da presente dissertação, foram utilizados os critérios de densidade material (“*Material Density*” em inglês) e FCC (“*FCC Custom Criterion*” em inglês, inserido nos critérios personalizados, *Custom- High* no menu *Simulation Results*) para avaliação para propensão à formação de macro e microrrechupe, respetivamente.

O critério de densidade material tem por base a contração do metal e como esta influencia o fluxo do metal líquido durante a solidificação. O valor deste critério varia entre 0 e 1, correspondendo “0” a metal completamente drenado da região especificada e “1” zona completamente íntegra após solidificação. Valores inferiores a 0,99-0,995 são geralmente considerados propensos à aparição de defeitos. Este parâmetro é utilizado para avaliar a propensão à formação de macrorrechupes na contração do metal. No entanto, as zonas assinaladas por este critério não representam o volume e forma do defeito, destacando apenas determinada secção como possivelmente problemática durante o projeto de fundição (23).

Os critérios personalizados no SOLIDCast incluem o critério FCC integrado. Este critério foi desenvolvido Por *Franco Chiesa* da *Collège de Trois-Rivières* em Québec e baseia-se na velocidade da frente metálica sólida e no tempo de solidificação local. Inicialmente foi desenvolvido para avaliação da propensão à microporosidade (microrrechupe) em ligas de alumínio, sendo posteriormente utilizado com sucesso em ligas ferrosas. Os valores resultantes devem ser interpretados de forma diferente dependendo da geometria e liga. No geral, quanto maior o valor do critério maior a probabilidade de desenvolvimento de

microporosidade. Para a análise de secções do modelo, deve-se procurar valores superiores a 40% no modelo para ligas de alumínio, sendo utilizados valores de 30% na FERESPE (23).

Após contacto com a *Finite Solutions*, foi sugerida a descida do valor de CFS de 60% para 30%, bem como a modelação de ar quente entre os alimentadores e mantas na peça V, de forma a simular a transferência de calor ocorrente pelo ar debaixo das mantas.

Os dados simulados e experimentais são então justapostos em folha de cálculo no *Microsoft Excel*. Como ponto de partida ao ajuste da curva de arrefecimento simulada, é realizada uma análise de sensibilidade à variação de cada propriedade (condutividade térmica, calor específico e densidade). Esta irá permitir a definição de uma metodologia para o ajuste da curva de arrefecimento. Como mencionado por (16), o coeficiente de transferência de calor externa afeta principalmente a taxa de arrefecimento após solidificação, pelo que não foi analisado.

De forma a compreender o efeito da variação de cada propriedade da carapaça na curva de arrefecimento, realizou-se uma análise preliminar de sensibilidade. Para o efeito, foram escolhidos dois valores, um superior e um inferior, para cada propriedade. Para o calor específico e densidade escolheu-se variações de aproximadamente 50%. Para a condutividade térmica, devido a variabilidade de magnitudes superiores observada bibliograficamente, as variações realizadas foram de 100%. Após obtenção das curvas, a sua comparação com a curva de arrefecimento com propriedades originais permitiu orientar o posterior ajuste das curvas simuladas.

Posteriormente, as propriedades da carapaça são então ajustadas de forma a replicar a curva de arrefecimento experimental no *software*. Desta forma são estimadas as propriedades térmicas reais das carapaças utilizadas pela FERESPE, com o objetivo de uma previsão de defeitos mais eficaz.

3.6. Determinação da Densidade

A determinação da densidade foi realizada conforme o método de Arquimedes (ASTM C20-00) (33). Desta forma, duas amostras de carapaças com diferentes espessuras (7,5 mm e 13 mm, respetivamente) mantidas em água em ebulição por 2h, com repouso de 12 h para o preenchimento completo dos poros exteriores por água.

Posteriormente, as amostras foram pesadas suspensas em água, saturadas com água e, após devida secagem, secas. Foram realizadas três pesagens para cada etapa do processo. A densidade aparente é dada pela divisão entre o peso seco da amostra e a diferença entre o peso da amostra saturada e suspensa.

3.7. Determinação da Condutividade Térmica

A determinação da condutividade térmica não foi possível, devido à indisponibilidade de equipamento de *Laser Flash Diffusivity* na FEUP e nas instituições contactadas, bem como de outros equipamentos e montagens experimentais capazes da medição de condutividade e difusividade térmica às temperaturas de serviço das carapaças cerâmicas utilizadas na FERESPE.

3.8. Determinação do Calor Específico

Foi escolhido para medição do C_p um equipamento de *Differential Scanning Calorimetry* (DSC). Este fornece informação qualitativa e quantitativa sobre reações endotérmicas e exotérmicas sofridas pela amostra a determinada temperatura. Para o efeito, são programados o fluxo de gás protetor e a taxa de aquecimento/arrefecimento da câmara de ensaio. De seguida é preparada a amostra, bem como um material de referência estável às temperaturas de ensaio. Ambos são inseridos na respetiva câmara num cadinho escolhido para as condições de ensaio desejadas. Com o aumento de temperatura programado, dois termopares montados em série medem a temperatura da amostra e referência. Consequentemente, qualquer diferença entre o aquecimento causa uma diferença de potencial, medindo o fluxo de calor diferencial em função do tempo e da temperatura (42,43).

Desta forma, as duas espessuras de carapaça analisadas, bem como as mantas utilizadas nas peças V e F, devem ser ensaiadas por DSC segundo o método dos 3 ensaios, conforme descrito na norma ASTM E1269. Para a aplicação deste método, 3 ensaios são realizados, com obtenção de resultados para dois cadinhos vazios, um cadinho vazio e uma safira de referência e, finalmente, um cadinho vazio e outro contendo a amostra a ensaiar. O calor específico é determinado por análise gráfica dos resultados dos 3 ensaios.

Os ensaios foram planificados para o equipamento de DSC disponível no Departamento de Metalurgia e Materiais da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Um NETZSCH STA 449 F5 Jupiter com cana para TGA-DSC. Este equipamento permite ensaios até 1600°C.

Devido às elevadas temperaturas de ensaio, são excluídos tradicionais cadinhos em alumínio. Foi utilizada uma safira de referência de 40 mg, bem como cadinhos de alumina (99.7%), com 6.8 mm diâmetro externo, 85 µl capacidade e 1700 °C de temperatura máxima. A escolha destes foi feita com base na disponibilidade de equipamento do

departamento. Tendo em conta o diâmetro reduzido, a conformação de uma amostra de carapaça dificilmente seria representativa de toda a espessura desta. Acrescentando a estes fatores a dificuldade de contacto com o fundo do cadinho descrita por (18). foi escolhida a granulagem da carapaça para uma amostragem quimicamente representativa.

4. Resultados e Discussão

4.1. Peça D

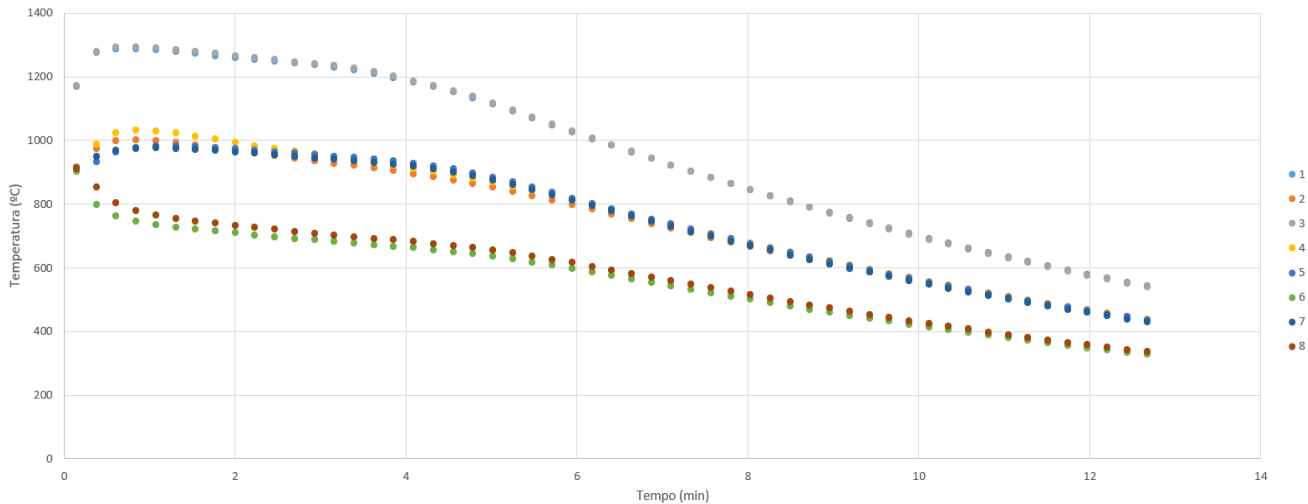


Figura 48: Resultados obtidos pelo estudo de posicionamento do termopar na peça D

Como se pode observar na figura 48, as curvas obtidas revelam que, apesar de variações na distância exterior, os pontos com distância semelhante ao metal vazado revelam curvas de arrefecimento semelhantes. Desta forma, as curvas agrupam-se (1 e 3; 2,4,5 e 7; 6 e 8) em função à distância ao fundido. Consequentemente, conclui-se que a distância ao fundido deve ser o fator mais revelante na fixação correta do termopar na aplicação do método inverso no SOLIDCast.

A forma mais eficaz de controlar a distância do termopar ao metal vazado será a sua fixação ao exterior da carapaça, sem elementos externos entre os dois. Desta forma conclui-se que o método de colocação do termopar nesta peça é considerado ineficaz, devendo-se optar por uma fixação semelhante à realizada nas Peças C, V e F.

4.2. Peça C

Os resultados experimentais e de simulação com parâmetros originais são justapostos na figura 49. O intervalo de tempo escolhido para análise, 15 minutos, tem em conta a incapacidade do SOLIDCast de prever mudanças microestruturais no arrefecimento. Consequentemente, O arrefecimento após a solidificação total simulada (12 minutos para as condições iniciais) torna-se menos relevante para os resultados de simulação e,

consequentemente, esta análise. Tal como mencionado por (16), o arrefecimento após solidificação é principalmente influenciado pelo coeficiente de transferência de calor externo, pelo que não será contemplado nas seguintes simulações.

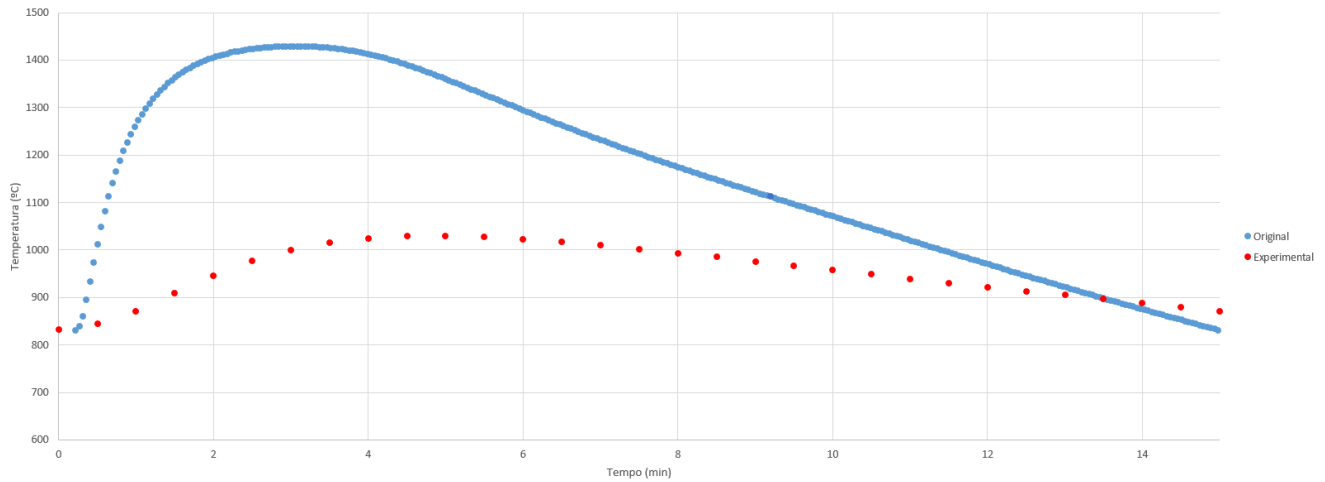
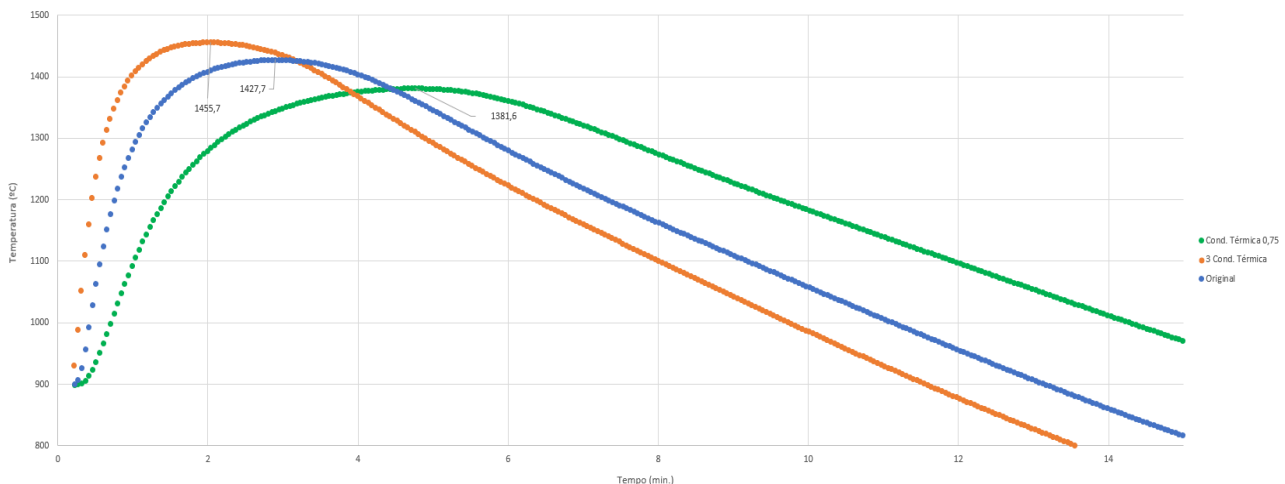
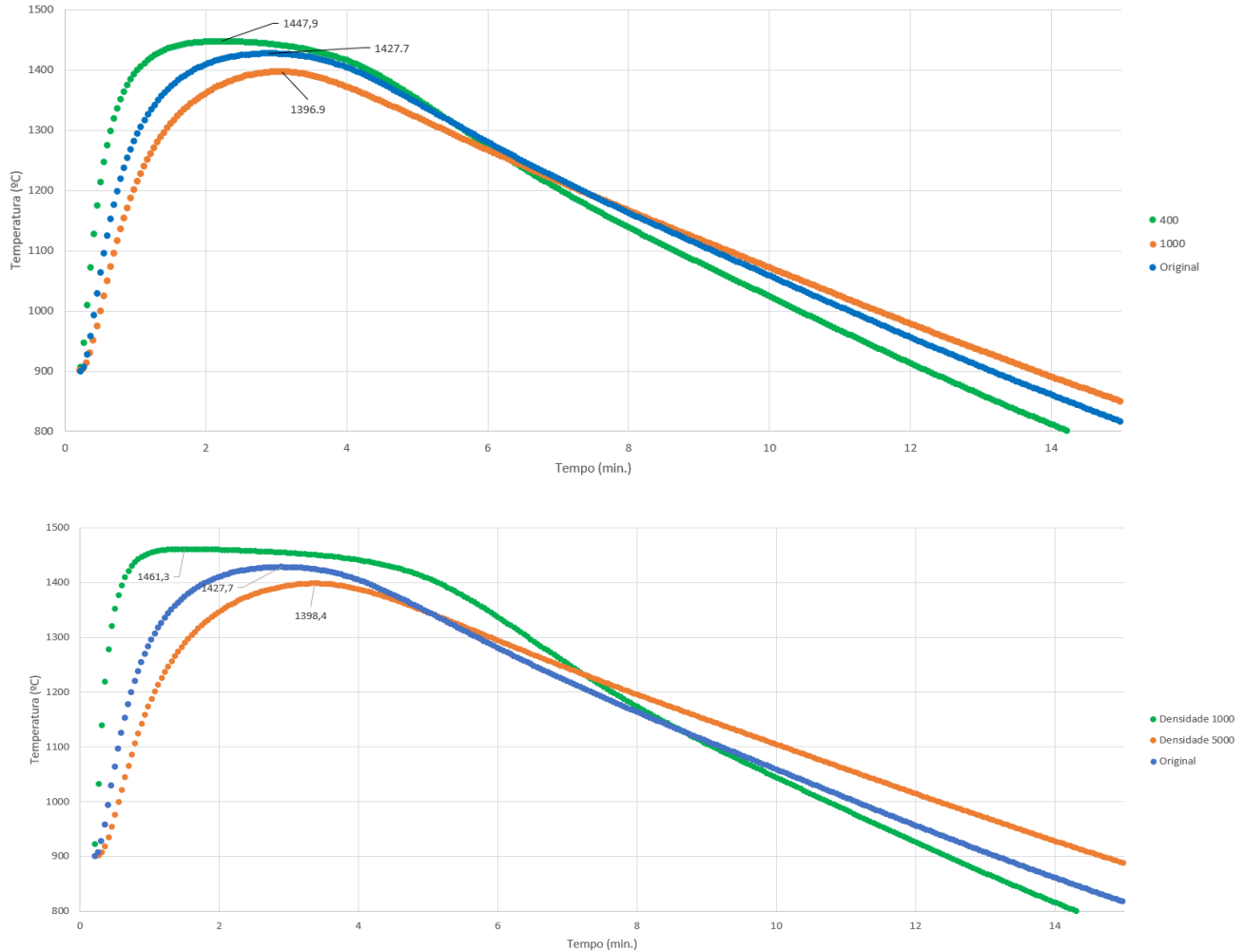


Figura 49: Comparação de Curva de Arrefecimento Experimental e Simulada com Parâmetros Originais

A diferença significativa entre a curva de arrefecimento real e experimental da carapaça, bem como nos pontos de temperatura máxima assinalados (cerca de 2 minutos e 400 °C de diferença), sugeriu a necessidade da análise preliminar da influência da variação das propriedades térmicas da carapaça na curva de arrefecimento obtida no *software*. Desta forma, estes parâmetros foram variados e simulados independentemente como ponto de partida para a aplicação do método inverso.

As figuras 50, 51 e 52 representam o efeito da variação da condutividade térmica (em W/m*K), do calor específico (em J/Kg*K), e da densidade (em Kg/m³), respetivamente na curva de arrefecimento da carapaça obtida por simulação.





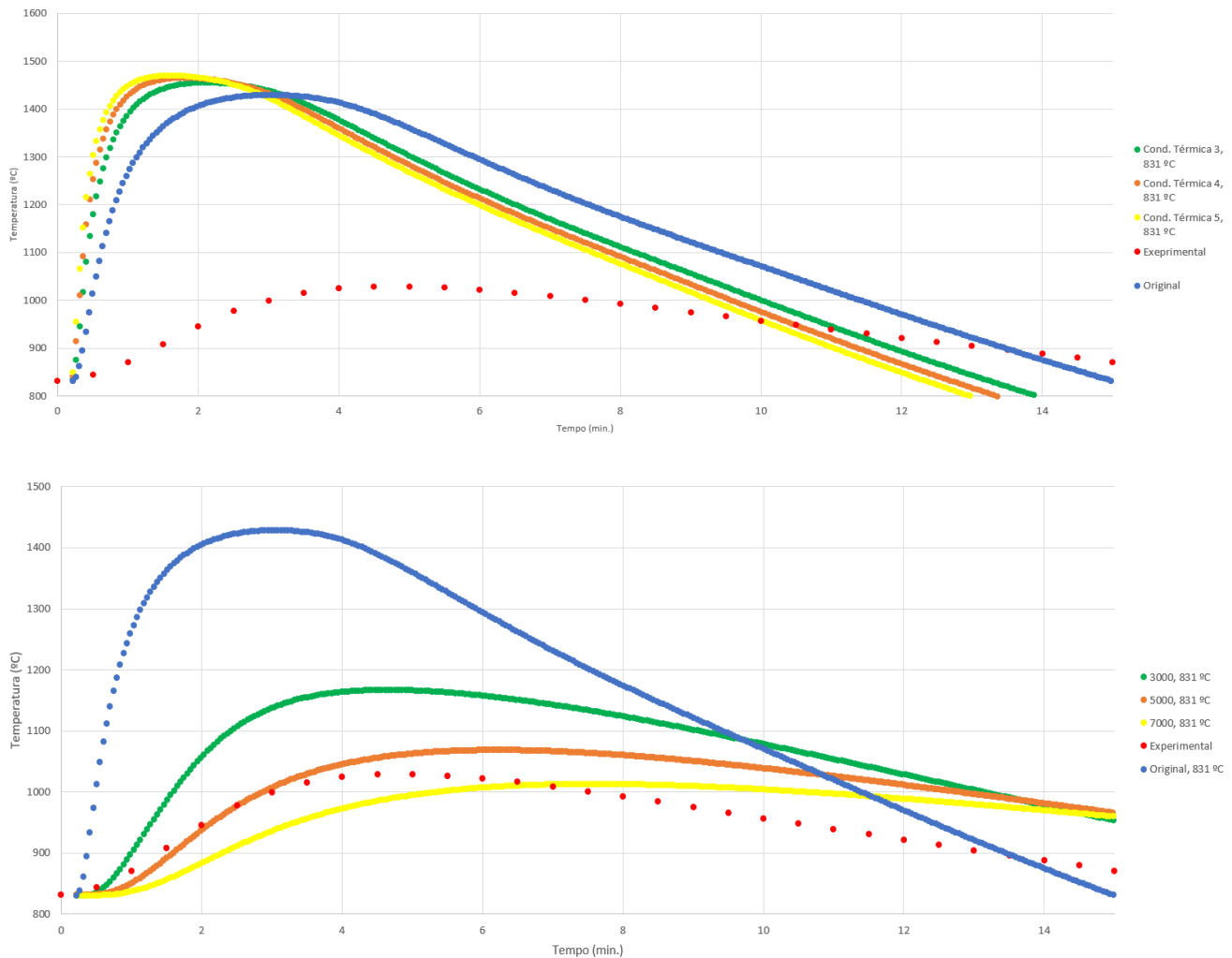
Figuras 50, 51 e 52: Análise de sensibilidade à variação da condutividade térmica, calor específico e densidade, respetivamente

Após análise de sensibilidade conclui-se que:

- O aumento da condutividade térmica altera o ponto de temperatura máxima da curva para valores de temperatura superiores e de tempo inferiores, aumento a velocidade de arrefecimento após o ponto de temperatura máxima;
- O aumento do calor específico resulta na deslocação do ponto de temperatura máxima para temperaturas inferiores e tempos superiores, bem como num arrefecimento da carapaça mais lento;

- A variação da densidade aparenta ter efeito semelhante à variação do calor específico, tanto no ponto de temperatura máxima como no declive do arrefecimento;

Nas simulações seguintes foram apresentados 3 valores para cada parâmetro para valores superiores. Estas simulações tiveram como objetivo a seleção de uma curva simulada para “ponto de partida” do método inverso, bem como confirmação das conclusões anteriores. A temperatura inicial das carapaças foi alterada para corresponder com o valor experimental aquando do vazamento- 831 °C.



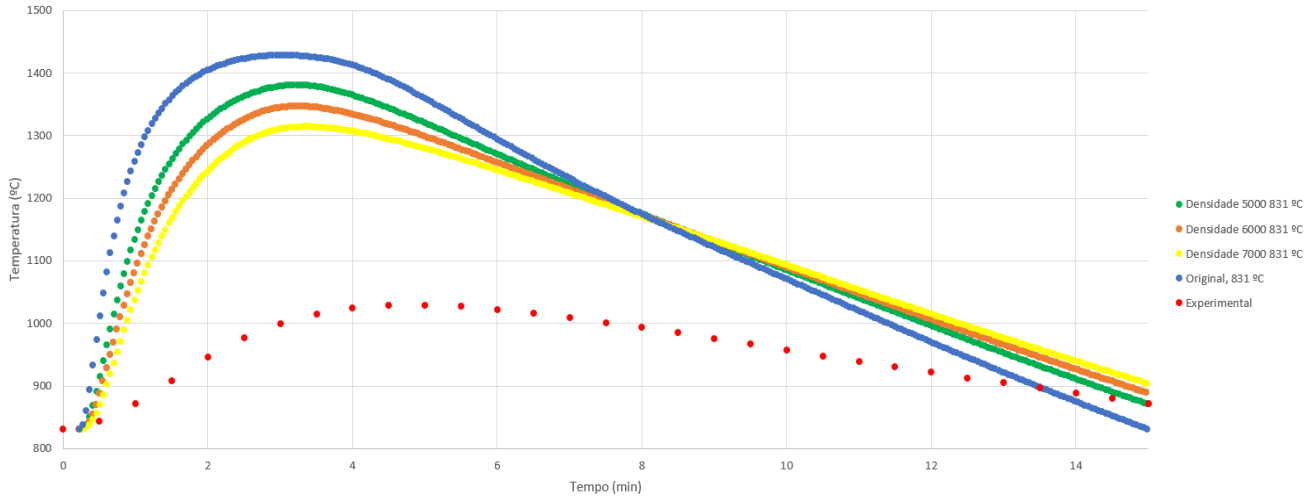


Figura 53, 54 e 55: Aumento de valores da condutividade térmica, calor específico e densidade, respetivamente

Como se pode observar, a curva correspondente à variação do calor específico para 5000 J/kg*K aproxima-se notoriamente à curva de arrefecimento observada experimentalmente. Desta forma, esta curva foi tida como ponto de partida. Apesar da sua replicação eficaz do início da curva, é importante mencionar que, devido ao aumento do calor específico, o ponto de temperatura máxima é deslocado para um valor de tempo superior, afastando-o do ponto de temperatura máxima observado experimentalmente. Desta forma, o aumento da condutividade térmica foi utilizado para ajuste do ponto de temperatura máxima, variando-se o valor da densidade como ajuste do declive de arrefecimento.

Após diversas iterações do ciclo de simulação e ajuste dos parâmetros, o melhor resultado foi obtido até aos 5 minutos, estando apresentado na figura 56, para valores de condutividade térmica de 2,5 W/m*K, calor específico de 5000 J/kg*K e densidade de 4000 Kg/m³.

Os valores de cada propriedade obtidos são consideravelmente superiores aos observados bibliograficamente. São também significativamente mais altos que os parâmetros iniciais, representando subida de cerca de 25% da densidade, 50% de condutividade térmica e 700% do calor específico.

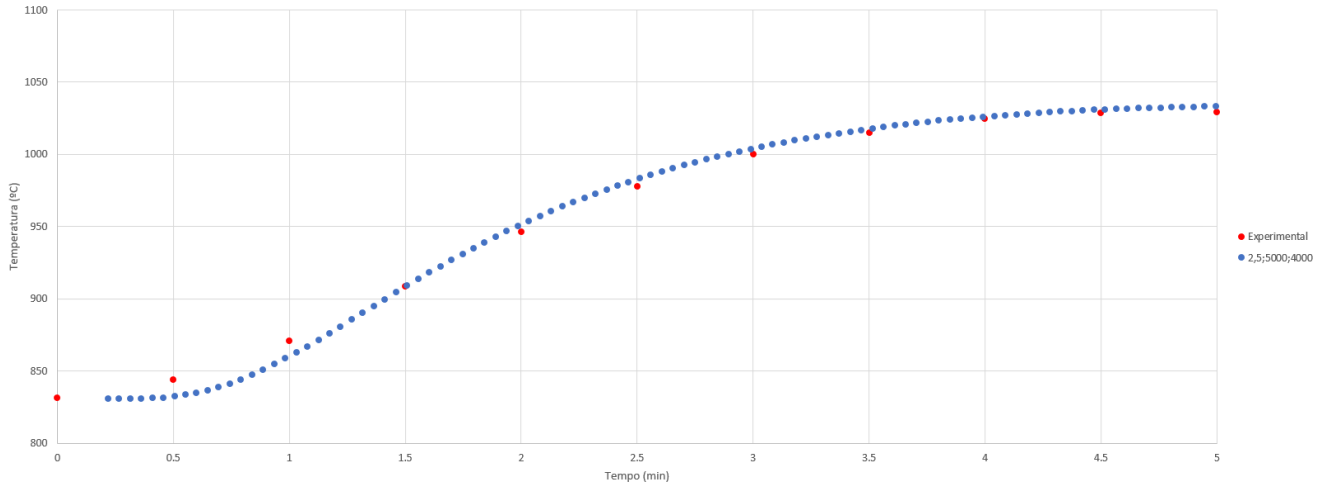


Figura 56: Resultado da aplicação do método inverso na peça C



Figura 57: Resultados obtidos de densidade material e critério FCC para a simulação ajustada da peça C

A propensão da peça à aparição de marco e microrrechupe com os parâmetros obtidos pelo método inverso está apresentada na figura 57. Análise de densidade material e critério FCC para estes parâmetros assinala elevada propensão à aparição de macrorrechupe nas secções grossas da base e topo da peça. Apesar deste defeito não ser observado nas peças vazadas, a versão anterior do cacho, com um gito ligeiramente superior, apresentou estes defeitos em algumas das peças.

Analisando os resultados de critério FCC a 30%, observa-se que a zona curva da peça apresenta propensão a microporosidade. Estes defeitos foram observados em todas as

versões do cacho vazadas até agora, tal como evidenciado durante a descrição da peça no capítulo 4.

Apesar de serem detetados defeitos observados em peças fundidas, os valores elevados quando comparados à literatura sugerem que a influência da cobertura das carapaças induz erro nos resultados obtidos por este método. Este fenómeno pode ocorrer devido à acumulação de calor no interior da cobertura. Desta forma, o calor específico obtido por método inverso é possivelmente inflacionado, uma vez que o SOLIDCast considera que o arrefecimento menos eficaz do fundido resulta de elevados valores de calor específico da carapaça, comparativamente ao arrefecimento ao ar livre. Desta forma, analisaram-se mais aprofundadamente as condições do vazamento de forma a procurar variáveis que possam justificar esta discrepância e simular a cobertura das carapaças após vazamento.

A cobertura da carapaça após vazamento neste processo foi analisada, uma vez que inevitavelmente influencia o arrefecimento da carapaça e, consequentemente, dos fundidos.

Como mencionado anteriormente, o procedimento da FERESPE na simulação para IC prevê a utilização ferramenta de cálculo do *View Factor* no SOLIDCast. Esta permite estimar geometricamente como a radiação emitida por uma secção da geometria pode aquecer a restante carapaça, fator de elevada importância no IC.

No entanto, a curva de arrefecimento para os parâmetros obtidos continua geralmente coincidente com a curva de arrefecimento experimental, reduzindo apenas em 9 segundos o tempo até solidificação total. Esta alteração não surtiu também efeito na propensão à aparição de micro e macrorrechupes.

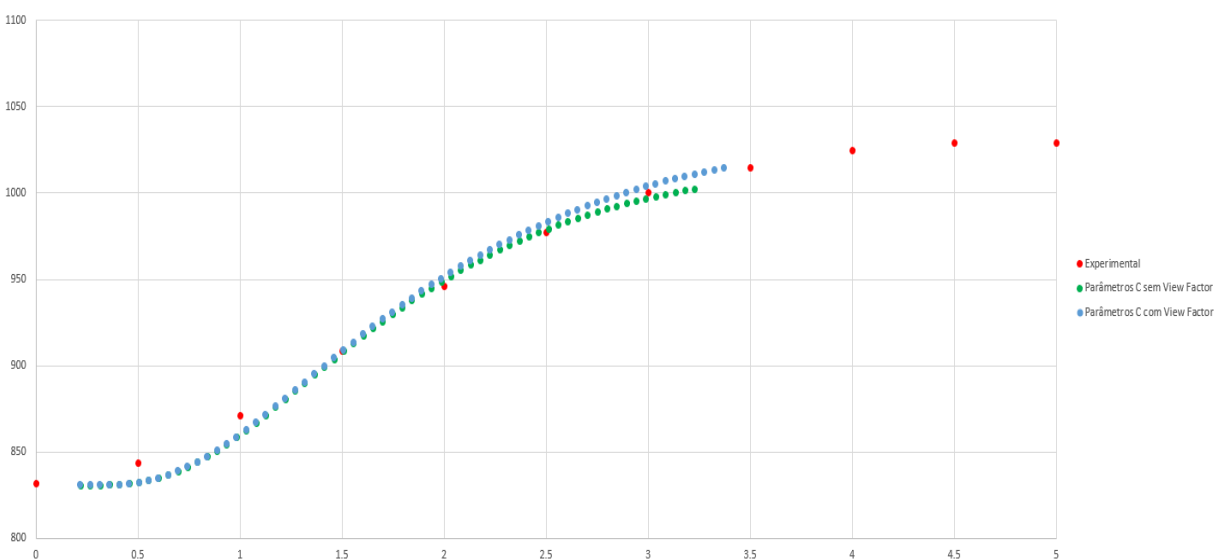


Figura 58: Influência do cálculo do *View Factor* na curva de arrefecimento da peça C

Utilizando o valor de $CFS=30\%$ não se verifica variação na previsão de defeitos. A curva de arrefecimento sofre uma variação negligenciável, sendo apenas relevante a redução drástica do tempo de solidificação para cerca aproximadamente 3 minutos. O encurtamento do tempo de solidificação verificado é expectável, conforme concluído por (16).

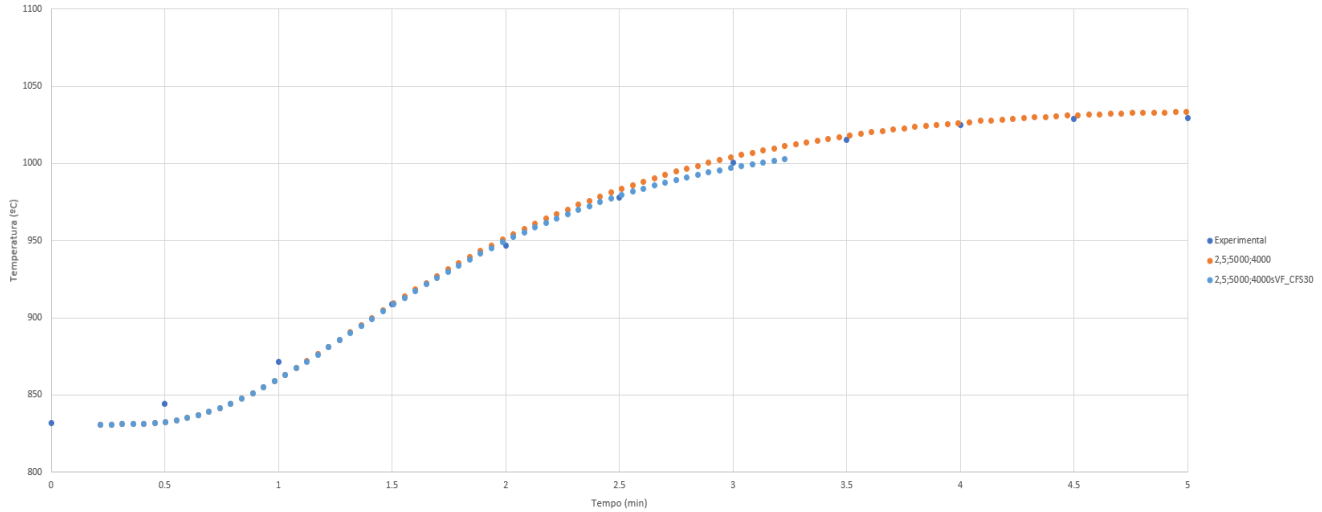


Figura 59: Influência da descida do CFS para 30% na curva de arrefecimento da peça C

Conforme a recomendação da *Finite Solutions* para o volume entre alimentadores na peça V, realizou-se também um teste com a modelação de ar quente no *software* na tentativa de replicar a atmosfera fechada criada pela operação de cobertura metálica dos cachos da peça C após vazamento. Para o efeito, foi modelado um cilindro com dimensões idênticas às da cobertura utilizada pela FERESPE, simulando-se o cacho posteriormente com os parâmetros desenvolvidos até este ponto. No entanto, a curva de arrefecimento obtida revela que a modelação de ar quente impede a transferência de calor da carapaça para o meio e, consequentemente, aumenta o tempo de arrefecimento.

Os resultados obtidos indicam que o SOLIDCast assume os materiais inseridos como sólidos, não assumindo perdas de calor por convecção. Logo, o ar quente modelado funciona como um material isolante com condutividade térmica baixa que impede o arrefecimento do sistema após vazamento.

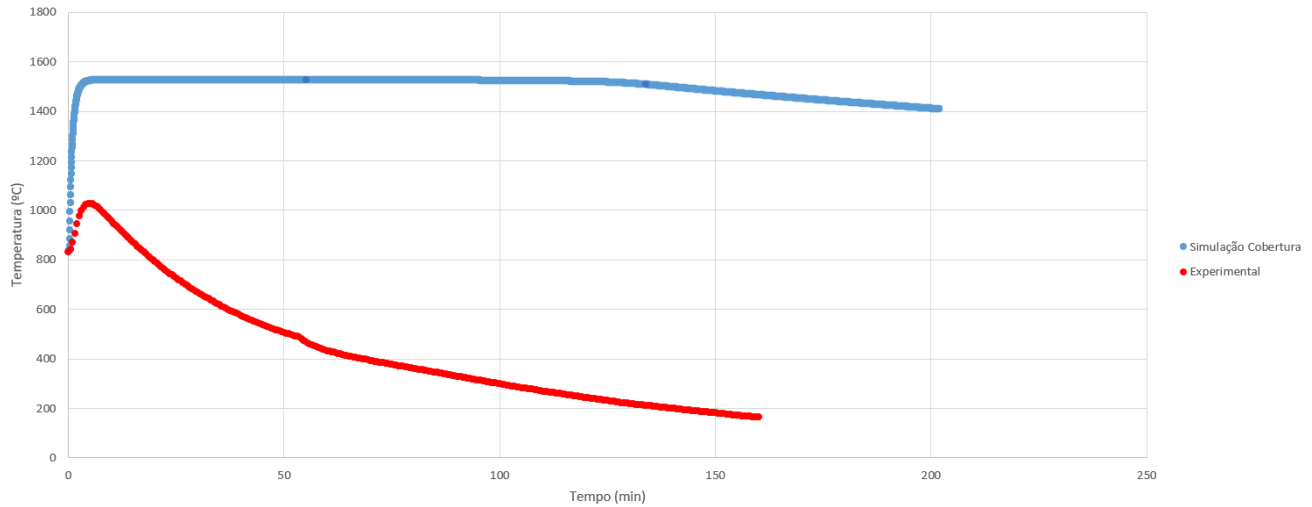


Figura 60: Efeito da modelação de ar quente na curva de arrefecimento da peça C

4.3. Peça V

A figura 61 apresenta o cacho da peça V, bem como a massa *X9 Plaster* modelada no SOLIDCast. Foram verificadas dificuldades na aplicação do método inverso na versão inicial do cacho. Consequentemente, as condições de vazamento foram analisadas mais aprofundadamente analogamente ao realizado na peça C.

Inicialmente a carapaça foi modelada no SOLIDCast com espessura de carapaça de 7,5 mm. No entanto, medições realizadas nas carapaças cerâmicas após vazamento revelaram uma espessura média de carapaça de 13 mm como está apresentado na figura 62.

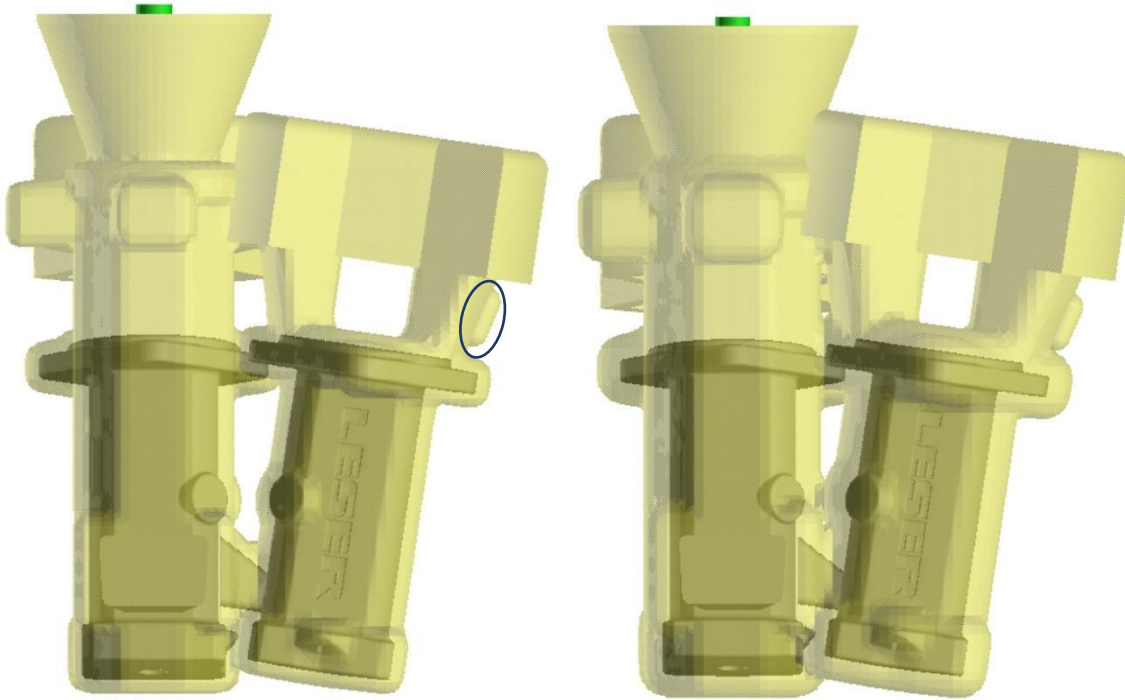


Figura 61 e 62: Cacho da Peça V com Massa Modelada (esquerda); Correção da Espessura da Carapaça (direita)

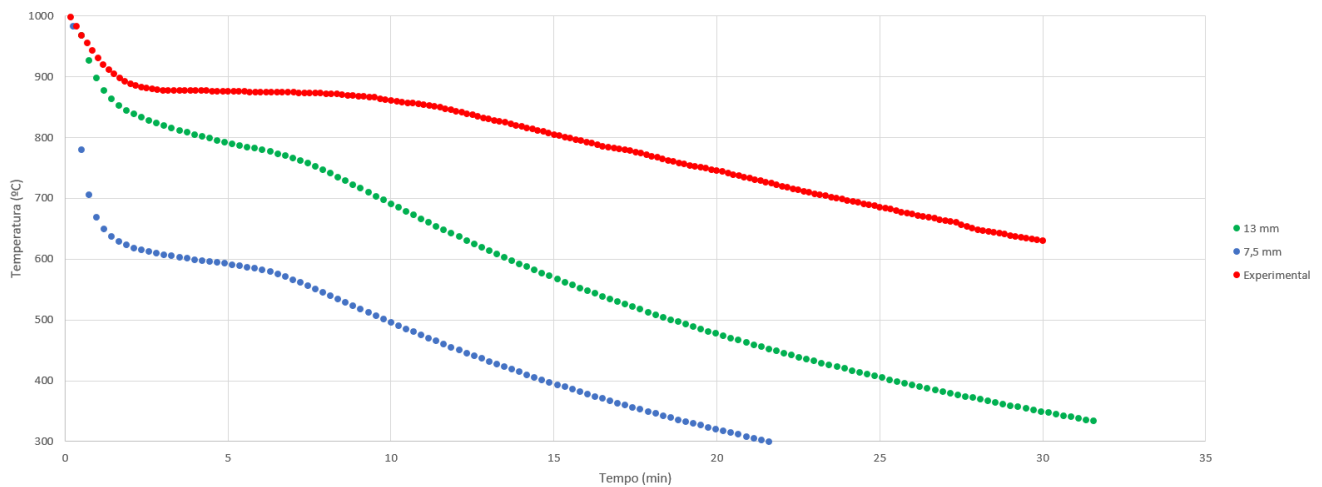


Figura 63: Influência da correção da espessura da carapaça na curva de arrefecimento da peça V

Como se pode comprovar, a correção da espessura da carapaça no modelo do SOLIDCast aproxima a curva de arrefecimento simulada à medida experimentalmente, mantendo os restantes parâmetros.

Conforme mencionado anteriormente, foi também modelado ar quente entre os alimentadores, por recomendação da *Finite Solutions*, de forma a simular mais eficazmente a transferência de calor na secção entre os alimentadores

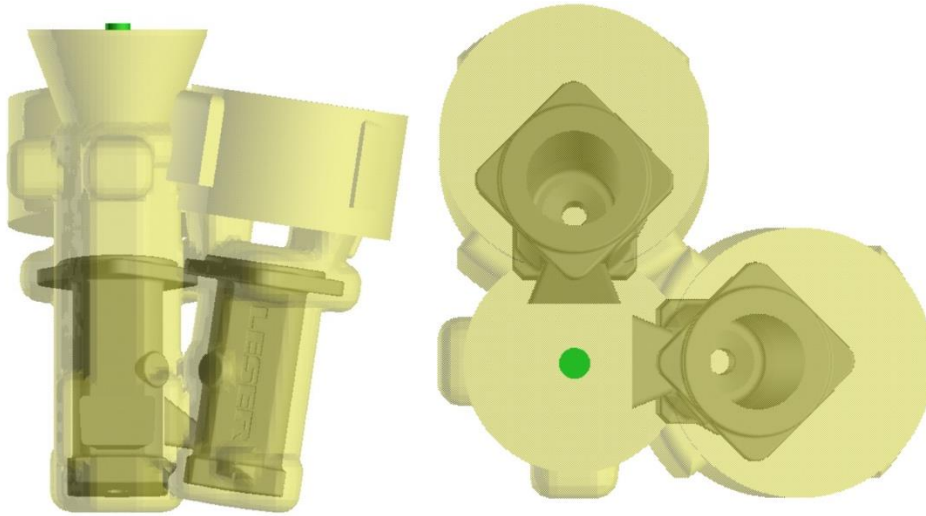


Figura 64 e 65: Cacho da Peça V com Ar Modelado entre Alimentadores

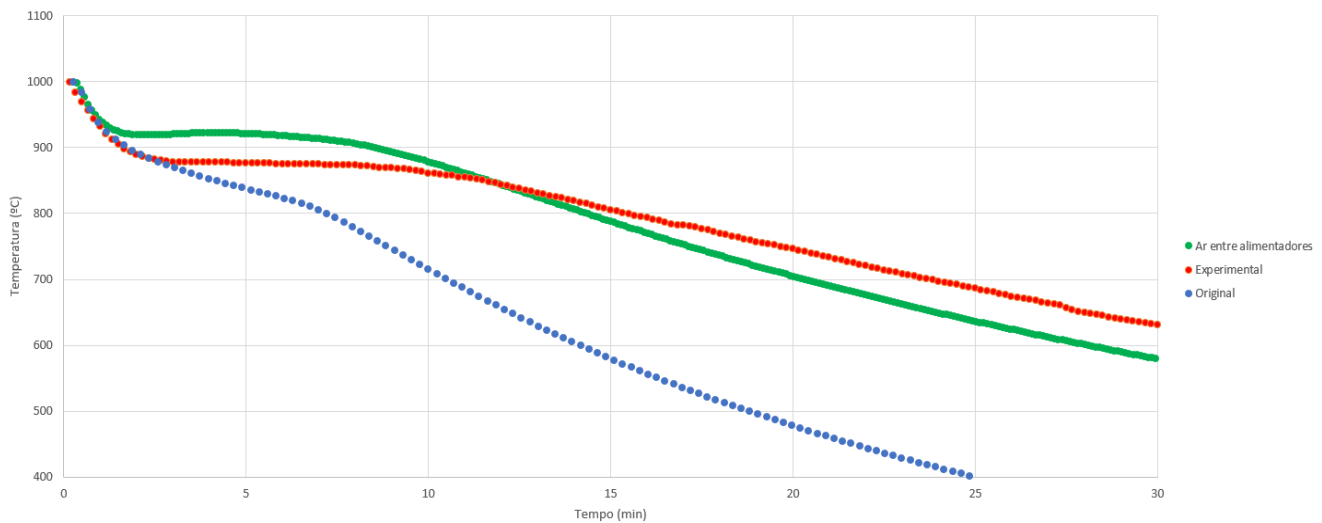


Figura 66: Influência da modelação de ar entre os alimentadores na curva de arrefecimento da peça V

Esta alteração aproximou a curva de arrefecimento simulada aos resultados experimentais obtidos, como se pode observar na figura 66, simulando mais fielmente o efeito das mantas na acumulação de calor no ar entre os alimentadores.

No entanto, após persistência das dificuldades de ajuste da curva de arrefecimento simulada, procedeu-se ao vazamento de uma geometria simples com condições estritamente controladas (Peça V), de forma a aproximar a metodologia à observada bibliograficamente. Os resultados de ensaios de densidade e DSC, bem como de cálculo da

estimativa do C_p da carapaça conforme recomendado por (18), foram utilizados de forma a diminuir o tempo necessário para a aplicação do método inverso.

4.4. Peça F

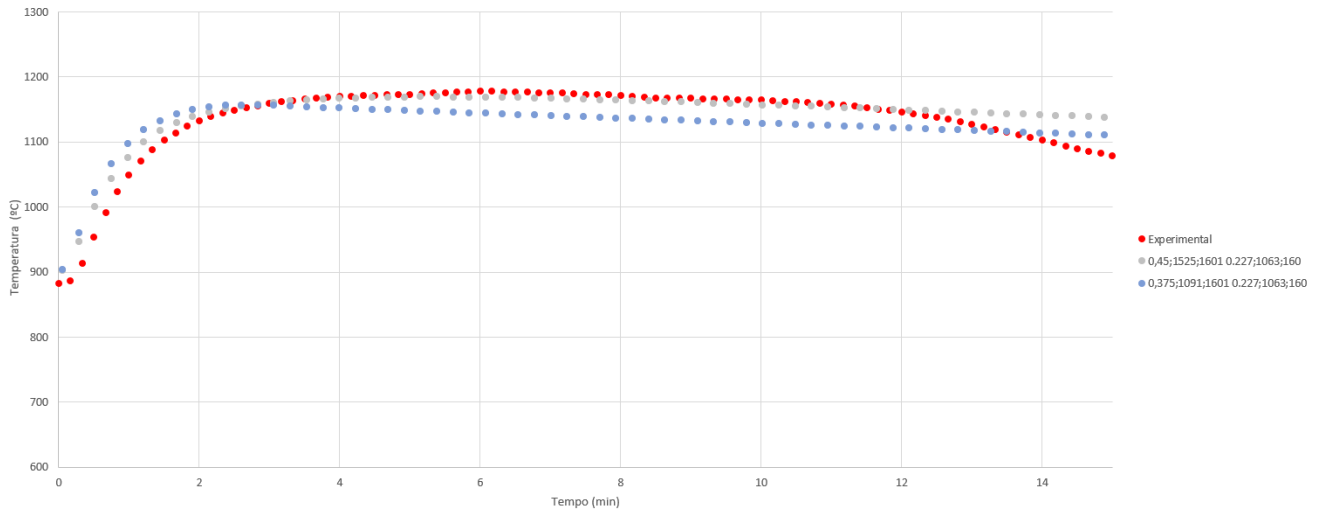


Figura 67: Resultados obtidos pela aplicação do método inverso na peça F

Na figura 67 pode-se observar a curva de arrefecimento obtida experimentalmente. Estão também apresentadas as curvas de arrefecimento obtidas com o valor de calor específico calculado e medido por DSC, utilizando ambos o valor da densidade experimentalmente determinado para carapaças cerâmicas de 7,5 mm de espessura, após aplicação do método inverso para determinação da condutividade térmica. O valor de condutividade térmica obtido foi de 0,375 e 0,45 W/m*K para a carapaça com valor de C_p calculado e experimental, respetivamente.

No entanto, a realização do método inverso na peça V revelou que é obtido o melhor ajuste para o valor de condutividade térmica de 1,3 W/m*K, conforme apresentado na figura 78. A elevada discrepância entre os resultados obtidos nas peças V e F sugere a existência de variáveis determinantes que não foram consideradas durante este processo.

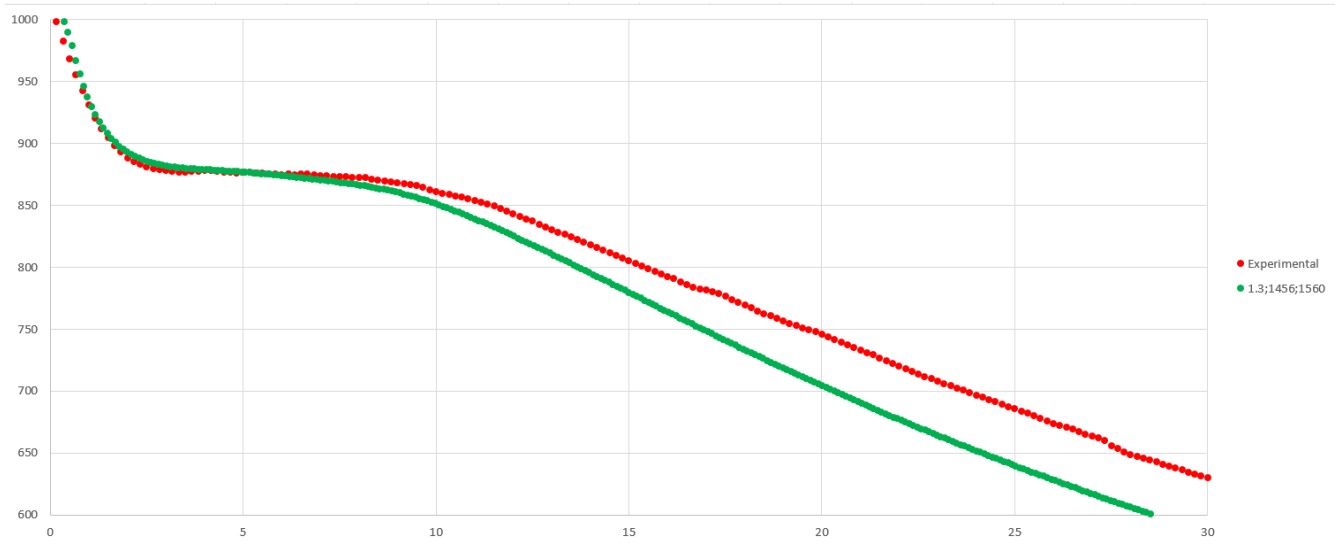


Figura 68: Resultados obtidos pela aplicação do método inverso na peça V

4.5. Validação dos Resultados

Parâmetros Obtidos para a peça C

Os valores de propriedades obtidos exclusivamente pela aplicação do método inverso na peça C ($2,5 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$, $5000 \text{ J/Kg}^{\circ}\text{K}$ e 4000 Kg/m^3) foram aplicados às peças T, A e M. Apesar do erro experimental associado à obtenção destes parâmetros, a sua utilização é eficaz na detecção de rechupes previamente não detetados. Nestas geometrias, a utilização dos parâmetros obtidos na análise da Peça C revelou propensão à formação de macrorrechupes previamente indetetados por simulação através da utilização do critério densidade material=1 como se pode observar na figura 69.



Figura 69: Resultados de densidade material e critério FCC, respectivamente, das peças A, T e M com os parâmetros obtidos pela análise da peça C

Apesar do acrescido rigor metodológico, os parâmetros obtidos por ensaios experimentais e método inverso nas peças F e V não detetaram os defeitos previamente apresentados.

4.6. Ensaios de Densidade: Método de Arquimedes

A aplicação do método de Arquimedes para as amostras de carapaça cerâmica de 7,5 mm e 13 mm de espessura revelaram uma densidade de $1,557 \text{ g/dm}^3$ e $1,5601 \text{ g/dm}^3$. Estes valores correspondem a cerca de metade do valor de densidade presente nos parâmetros utilizados pela FERESPE no SOLIDCast ($3,2036 \text{ g/dm}^3$). No entanto, aproximam-se de resultados obtidos por (16) da aplicação do mesmo método em carapaças cerâmicas de composições próximas.

É de destacar que a fragilidade das carapaças cerâmicas facilmente induz erros experimentais na aplicação deste método, uma vez que o manuseamento da amostra pode levar a perda de massa por fragmentação.

4.7. Ensaios para Determinação do Calor Específico

Após a aplicação do método dos três ensaios, obteve-se o valor o valor de $1525 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ para a amostra de carapaça de 7,5 mm de espessura e $1456 \text{ J/Kg}\cdot\text{K}$ para a carapaça de 13 mm. A pequena diferença entre os resultados é atribuída à ligeira diferença de composição química, visto que a carapaça de 13 mm possui duas camadas de reforço adicionais.

Os ensaios realizados a amostras obtidas das mantas utilizadas nas peças V e F foram inconclusivos, tendo-se verificado que os cadinhos disponíveis não possuem o volume necessário para a análise de amostras de manta com massa equivalente à da safira de referência.

5. Conclusões

Após a realização do presente trabalho, conclui-se que o método inverso, apesar da sua utilidade comprovada, requer uma representação minuciosa das condições reais de vazamento. Caso contrário, fatores como a distância do termopar ao metal líquido, condições externas de arrefecimento e temperatura de vazamento podem desviar os resultados obtidos pela sua aplicação. A consideração de fatores como a espessura da carapaça, presença de respiros, ar entre alimentadores conforme recomendado pela *Finite Solutions*, assim como propriedades de outros materiais utilizados, como as mantas presentes em algumas peças vazadas, permitem ainda melhorar o rigor da modelação.

A aplicação deste método no SOLIDCast, sem recurso a *software* automatizado de ajuste de curvas, revelou-se demasiado morosa. Como tal, recomenda-se a realização de ensaios experimentais como ponto de partida. A utilização de *software* de simulação com módulos dedicados a otimização inversa, como o ProCAST e MAGMASOFT, será a forma mais eficaz de reduzir o tempo necessário para a aplicação deste método.

A distância do termopar ao metal vazado, tal como demonstrado na análise da peça D, deverá ser o principal fator tido em conta para a colocação de termopares na carapaça, pelo que é recomendada a fixação em contacto direto com a mesma. O local da geometria a estudar deve ser escolhido também de forma a possibilitar uma fixação eficaz durante o manuseamento até ao vazamento.

A utilização do SOLIDCast para determinação inversa das propriedades das carapaças cerâmicas apresenta limitações notórias, uma vez que este *software* não tem em conta a variação de propriedades térmicas durante o arrefecimento. Este fator dificulta a aplicação do método inverso, uma vez que é necessário comparar as curvas simuladas com dados experimentais, em que as propriedades térmicas variam ao longo do tempo após vazamento. A diferença entre os valores de condutividade térmica obtidos pelo método inverso nas peças F e V, após as melhorias no modelo aplicadas, indicam que o *software* não foi bem-sucedido na replicação das condições reais de vazamento.

A validação dos resultados comprovou que os parâmetros obtidos pela análise da peça C, apesar do erro experimental ocorrente, são bem-sucedidos na deteção de defeitos previamente ausentes dos resultados apresentados pelo SOLIDCast, pelo que é recomendada à FERESPE a sua utilização na ausência de outra melhoria. A sua utilização é particularmente recomendada em peças cobertas após vazamento, uma vez que estes resultados foram obtidos num vazamento com cobertura. Os parâmetros obtidos para as peças F e V, por sua vez, não foram capazes de detetar os defeitos presentes nas peças vazadas T, A e M, podendo indicar mais uma vez dificuldades no algoritmo na previsão de defeitos em IC.

6. Trabalho futuro

A continuação do trabalho descrito na presente dissertação deve começar pela caracterização da condutividade térmica por métodos experimentais como ponto de partida para a aplicação do método inverso, bem como auxiliar à interpretação e análise crítica dos resultados obtidos em simulação. Para continuação do presente trabalho, a condutividade térmica pode ser medida por LFA, conforme descrito na metodologia. Os valores obtidos poderão contextualizar os resultados obtidos na presente dissertação por aplicação do método inverso.

A caracterização das carapaças é de especial importância tendo em conta o facto do SOLIDCast assumir as propriedades destas como estáveis durante o vazamento e solidificação. Consequentemente, ensaios para determinação da condutividade térmica e calor específico obtidos a diferentes temperaturas podem ser utilizados em simulação para determinar a temperatura ou etapa do processo em que o *input* das propriedades corretas é mais eficaz na deteção de defeitos.

O método inverso deve ser realizado de forma rigorosa, com medições da posição dos termopares acoplados, bem como uma modelação precisa de todo o material utilizado para a fixação destes. Para o efeito, estes materiais, como mantas e a massa utilizada na fixação dos termopares, podem também ser ensaiados pelos métodos descritos anteriormente. A colocação de termopares na cavidade moldante é também recomendada, uma vez que permite obtenção de valores de temperatura do metal vazado, eliminando alguns dos fatores de variabilidade anteriormente mencionados.

A cobertura de carapaças vazadas deve também ser estudada mais aprofundadamente, comparando geometrias semelhantes cobertas e descobertas. A análise da diferença no arrefecimento, bem como na aparição de macro e microrrechupes na peça, deve ser acompanhada de testagem de diferentes modelos de replicação deste procedimento no SOLIDCast.

O *software* de simulação utilizado, SOLIDCast, como descrito anteriormente, assume as propriedades das carapaças cerâmicas utilizadas em IC como constantes e independentes da temperatura e tempo após vazamento. Como tal, recomenda-se a utilização de *software* sensível à alteração das propriedades da carapaça cerâmica para a obtenção de resultados mais representativos dos fenómenos ocorrentes na FERESPE, com posterior comparação aos resultados obtidos no SOLIDCast. A utilização de funcionalidades destinadas ao método inverso, presentes no MAGMASOFT e ProCast, poderiam também auxiliar numa aplicação deste método mais fundamentada, reduzindo também consideravelmente o tempo necessário para a sua aplicação.

Devido ao vazamento sucessivo de diversas carapaças com a mesma colher de vazamento, recomenda-se também um estudo das perdas de calor nas carapaças e na colher em diferentes condições, intervalos de tempo e geometria. Desta forma, a garantir o *input* de valores de temperatura inicial destes 2 materiais tendo em conta as perdas térmicas associadas à metodologia aplicada pela empresa.

7. Referências

1. Ohnaka I, Zhu JD, Sako N, Sugiyama A, Ye CK. Challenging issues in computer simulation of casting. *International Journal of Cast Metals Research*. 2011;24(3-4):133-8.
2. Khan M, Sheikh K. A Comparative Study of Simulation Software for Modelling Metal Casting Processes. *International Journal of Simulation Modelling*. 2018; 17:197-209.
3. Conheça a FERESPE <https://ferespe.com/company/?lang=pt-pt#conheca-a-ferespe>: FERESPE.
4. Davey CJ. The early history of lost-wax casting. 2022:147-54.
5. Hunt LB. The long history of lost wax casting. *Gold Bulletin*. 1980; 13:63-79.
6. Beeley PR, Smart RF. 1.2.3 Investment Casting. *Investment Casting*: Maney Publishing for IOM3, the Institute of Materials, Minerals and Mining; 1995.
7. Pattnaik S, Karunakar DB, Jha PK. Developments in investment casting process—A review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012; 212:2332-48.
8. Jones S, Jolly MR, Lewis K. Development of techniques for predicting ceramic shell properties for investment casting. *British Ceramic Transactions*. 2002;101(3):106-13.
9. Wood RL. Progress In Investment Castings. *Metallurgical Reviews*. 1960;5(1):119-35.
10. Investment Casting vs. Die Casting: 7 Considerations When Choosing a Process: East West Manufacturing; 2018 [Disponível em: <https://news.ewmfg.com/blog/investment-casting-vs.-die-casting-considerations-when-choosing-process>].
11. Taşcıoğlu S, Akar N. A novel alternative to the additives in investment casting pattern wax compositions. *Materials & Design*. 2003;24(8):693-8.

12. Kumar S, Karunakar DB. Characterization and Properties of Ceramic Shells in Investment Casting Process. *International Journal of Metalcasting*. 2021;15(1):98-107.
13. Committee ASMIH. 75. Investment Casting. *ASM Handbook, Volume 15 - Casting*: ASM International.
14. Everhart W, Lekakh S, Richards V, Chen J, Li H, Chandrashekhara K. Corner Strength of Investment Casting Shells. *International Journal of Metalcasting*. 2013;7(1):21-7.
15. Jones S, Yuan C. Advances in shell moulding for investment casting. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003;135(2):258-65.
16. Xu M, Lekakh SN, Richards VL. Thermal Property Database for Investment Casting Shells. *International Journal of Metalcasting*. 2016;10(3):329-37.
17. Konrad CH, Brunner M, Kyrgyzbaev K, Völkl R, Glatzel U. Determination of heat transfer coefficient and ceramic mold material parameters for alloy IN738LC investment castings. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011;211(2):181-6.
18. Chapman L, Morrell R, Quested PN, Brooks RF, Chen LH, Ford DA, editors. *PAMRIC: Properties of Alloys and Moulds Relevant to Investment Casting* 2008.
19. 1. The Advantages & Disadvantages of Using Investment Casting In Your Next Production Run: The Ferederal Group USA; 2020 [Disponível em: <https://www.tfgusa.com/the-advantages-disadvantages-of-using-investment-casting/>].
20. When to Choose Investment Casting. *MODERN CASTING*. 2018 Julho/Agosto 2018.
21. Rajkumar I, Rajini N. Metal casting modeling software for small scale enterprises to improve efficacy and accuracy. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 46:7866-70.
22. Anglada E, Meléndez A, L.Maestro, Domiguez I. Adjustment of Numerical Simulation Model to the Investment Casting Process. *Procedia Engineering*. 2013; 63:75-83.

23. Muenprasertdee P, editor Solidification modeling of iron castings using SOLIDCast2007.
24. Furrer DU, Semiatin SL. ASM Handbook, Volume 22B - Metals Process Simulation. ASM Handbook, Volume 22B - Metals Process Simulation. 22B: ASM International; 2010. p. 187-91.
25. Dick E. Introduction to Finite Element Methods in Computational Fluid Dynamics. In: Wendt JF, editor. Computational Fluid Dynamics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2009. p. 235-74.
26. MAGMASOFT: MAGMA GmBH; [Disponível em: <https://www.magmasoft.de/en/>].
27. MAGMA APPROACH: MAGMA GmBH; [Disponível em: <https://www.magmasoft.de/en/solutions/the-magma-approach/>].
28. CASTING SIMULATION SUITE. ESI.
29. Flow 3D: Flow Science; [Available from: <https://www.flow3d.com/>].
30. SOLIDCAST: THE WORLD'S MOST POPULAR PC-BASED CASTING SIMULATION SYSTEM. Finite Solutions.
31. SOLIDCast - CASTING SIMULATION SOFTWARE [Disponível em: <https://www.castingsimulation.com/index.php>].
32. Schmidt D, Smiley L. SOLIDCast. Finite Solutions.
33. ASTM. C20 - 00: Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water.
34. ASTM. ASTM 1461 - 01: Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method.
35. ASTM. ASTM E1269 - 11: Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry.
36. Investment Castings: FERESPE; [Disponível em: <https://ferespe.com/solutions/investment-castings/>].

37. Steel Plate 4140: Kloeckner Metals; [Disponível em: <https://www.kloecknermetals.com/products/plate/grades/4140-steel/>].
38. 10 Common Applications for 4140 Steel: Winsconsin Metal Tech; [Disponível em: <https://wisconsinmetaltech.com/4140-steel-applications-top-10/>].
39. AISI 4140 Alloy Steel (UNS G41400): AZO Materials; [Disponível em: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6769>].
40. 15 Common Applications for Versatile 4140 Steel: Otai Steel; Disponível em: <https://www.astmsteel.com/steel-knowledge/15-application-4140-steel/>.
41. Tokova O, Doroshenko V, Mul O. Inductive Technology for Creating an Electronic Reference Database for Foundry Production. *Boundary Field Problems and Computer Simulation*. 2017; 56:53-7.
42. Behera MM, Pattnaik S, Sutar MK. Thermo-mechanical analysis of investment casting ceramic shell: A case study. *Measurement*. 2019; 147:106805.
43. Differential Scanning Calorimetry (DSC): A Beginner's Guide. Perkin Elmer.

Anexo

Propriedades de Liga

CF8M

Cond. T. (W/m*K)	Calor Esp. (J/Kg*K)	Densidade (Kg/m ³)	Temp. sol. (°C)	Intervalo Sol. (°C)	Calor de fusão lat. (J/Kg)
21,5	502,08	8025,018	1335	92	302172

AISI 4140

Cond. T. (W/m*K)	Calor Esp. (J/Kg*K)	Densidade (Kg/m ³)	Temp. Sol. (°C)	Intervalo Sol. (°C)	Calor de fusão lat. (J/Kg)
42,721	472,792	7848,82	1518,333	22,222	274279,2

Material das Carapaças e Mantas

Fused Mullite Shell

Cond. Térmica (W/m*K)	Calor Específico (J/Kg*K)	Densidade (Kg/m ³)
1,628	711,28	3203,6

Kaowool

Cond. Térmica (W/m*K)	Calor Específico (J/Kg*K)	Densidade (Kg/m ³)
0,259	1087,84	96,108

Parâmetros de Simulação

Peça	Liga de vaz.	Temp. de vaz.	Tempo de vaz.	Esp. carapaça	CFS %/ <i>Niyama</i>	% Encolhimento	Tamanho <i>Mesh</i>	Manta	Cobertura
C	ST 4140	1620	13	7,5	60/65	8	2 mm	×	✓
D	CF-8M	1650	8,5	7,5	60/65	8	3 mm	×	×
V	CF-8M	1620	15	13	60/65	8	3 mm	✓	×
F	CF-8M	1620	3	7,5	60/65	8	3 mm	×	×
T	CF-8M	1620	7	10	60/65	8	3 mm	×	×
A	CF-8M	1620	10	10	60/65	8	3 mm	×	×
M	WF502	1620	10	7,5	60/65	8	2 mm	×	×