

Cadeia de processo virtual robusta e otimizada para fundição por cera perdida

A fundição por cera perdida tem beneficiado muitas indústrias como uma via econômica para a fundição de peças metálicas, com elevada complexidade geométrica e precisão dimensional, em forma quase acabada. No entanto, os custos e os tempos de espera durante a produção podem limitar rapidamente a competitividade da fundição por cera perdida como via de fabricação preferencial. A simulação de processos é a ferramenta mais avançada para eliminar os testes práticos e melhorar a qualidade da fundição, o que reduz significativamente os custos e o tempo de produção. Permite aos engenheiros avaliarem a viabilidade técnica de novos componentes e encontrar o melhor compromisso entre a qualidade do fundido e os custos de produção antes de criar protótipos físicos dispendiosos. Usando aplicações industriais reais como exemplos, este artigo fornecerá uma visão geral dos novos desenvolvimentos e demonstrará as capacidades atuais do software de simulação MAGMASOFT® em abordar virtualmente toda a cadeia do processo de fundição por cera perdida. Em particular, serão discutidos os benefícios da Engenharia Autônoma, uma nova metodologia para investigar sistematicamente as janelas do processo através do desenho virtual de experimentos (DoE virtual) ou da otimização autônoma.

Max Peymandar, Daniel Schmidt e Jörg C. Sturm, Aachen

1 Introdução

A fundição por cera perdida é um dos mais antigos processos de conformação de metais para produzir peças fundidas complexas com forma quase acabada e em vários materiais. A tecnologia tem sofrido uma grande evolução ao longo do tempo devido à necessidade de componentes de precisão com geometrias complexas, impulsionada por várias indústrias. Durante as últimas décadas, a indústria de fundição por cera perdida continuou a expandir-se não só devido às vantagens que oferece como processo de fundição, mas também na fabricação de uma variedade de produtos. O objetivo dos engenheiros de processos nas fundições por cera perdida é estabelecer um processo que satisfaça principalmente três objetivos:

- > produzir peças fundidas livres de defeitos de acordo com as especificações,
- > poupar custos através de rendimentos elevados, evitando desperdícios e retrabalho,
- > estabelecer uma janela de processo robusta desde o primeiro momento.

A liberdade de configurar um sistema de canais e de alimentação ótimos para o componente e material específicos é comprometida por vários processos e restrições econômicas, tais como a necessidade de manipular com segurança o aglomerado de cera, limitações relacionadas com o revestimento e a necessidade de ter o maior número possível de peças fundidas na árvore. Outro desafio refere-se às vantagens de o processo ser aplicável a quase todos os materiais fundidos, especialmente os materiais que têm temperaturas de fusão elevadas ou que são agressivos em atmosfera normal. Assim, peças cada vez mais complicadas são produzidas por fundição por cera perdida a partir de ligas que são mais difíceis de fundir. Para cumprir as especificações atuais na produção de componentes fundidos de alta integridade, é necessário um profundo conhecimento do comportamento do material e da robustez do processo em todo o percurso de fabrico. A

tecnologia de simulação do processo de fundição e a previsão das propriedades do material resultante tornaram-se a metodologia estado da arte para os fundidores. A simulação do processo demonstrou ser uma ferramenta eficaz para a concepção de modelos de fundição por cera perdida, permitindo modelar com precisão os defeitos e as propriedades resultantes para uma vasta gama de ligas de fundição. As fundições por cera perdida têm usado a simulação por muitos anos para receber uma confirmação (ou a necessidade de modificações) sobre suas decisões de projeto e configuração do processo antes do início da produção de um fundido de alta integridade [1]. O MAGMASOFT® [2] permite a simulação e otimização do processo de fundição por cera perdida, tendo em conta todas as etapas essenciais do processo e as condições térmicas de contorno. O software oferece uma funcionalidade dedicada para abordar as especificidades do processo, não apenas para o processo principal de enchimento e solidificação. A previsão das microestruturas e das propriedades mecânicas resultantes, bem como a previsão de tensões, trincas e distorção para a peça fundida ou mesmo após seu(s) tratamento(s) térmico(s) permitem-lhe tomar decisões de concepção confiáveis e estabelecer uma janela de processo robusta antes de realizar experiências reais (Figura 1).

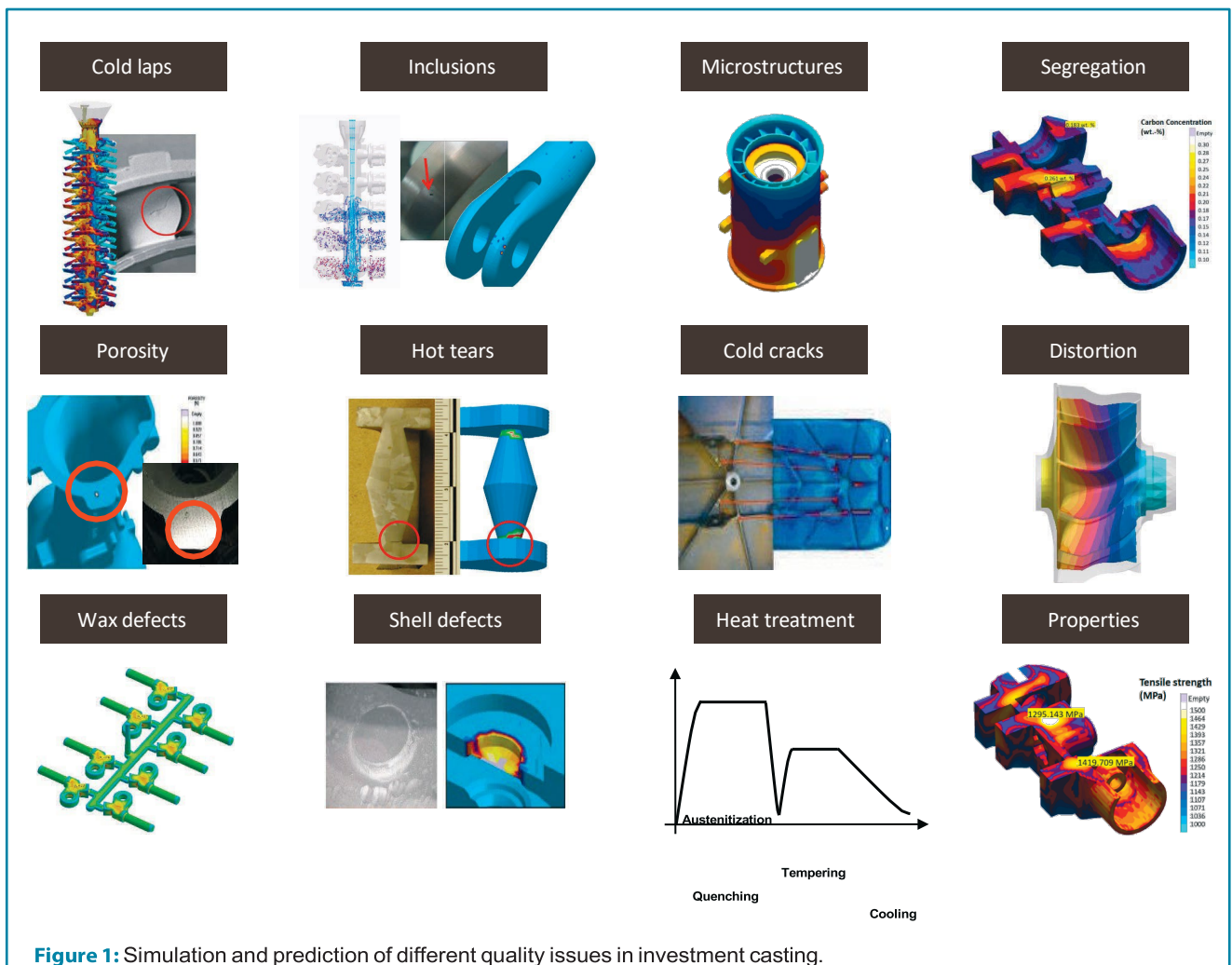


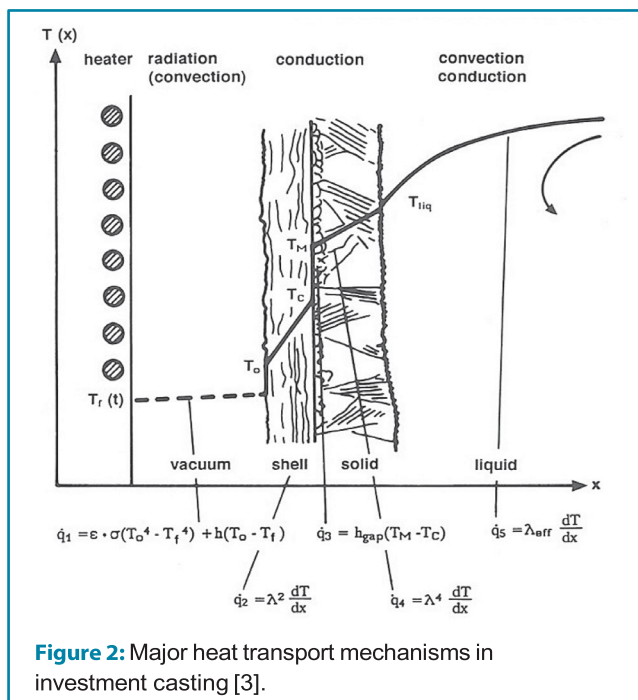
Figure 1: Simulation and prediction of different quality issues in investment casting.

Este artigo aborda os princípios básicos e os principais parâmetros que influenciam o fluxo de calor no processo de fundição por cera perdida. A metodologia inovadora da Engenharia Autónoma utiliza uma variação sistemática das condições de projeto e processo influentes através de um DoE virtual. Os seus benefícios para as fundições de cera perdida são apresentados para várias aplicações industriais. Isto permite

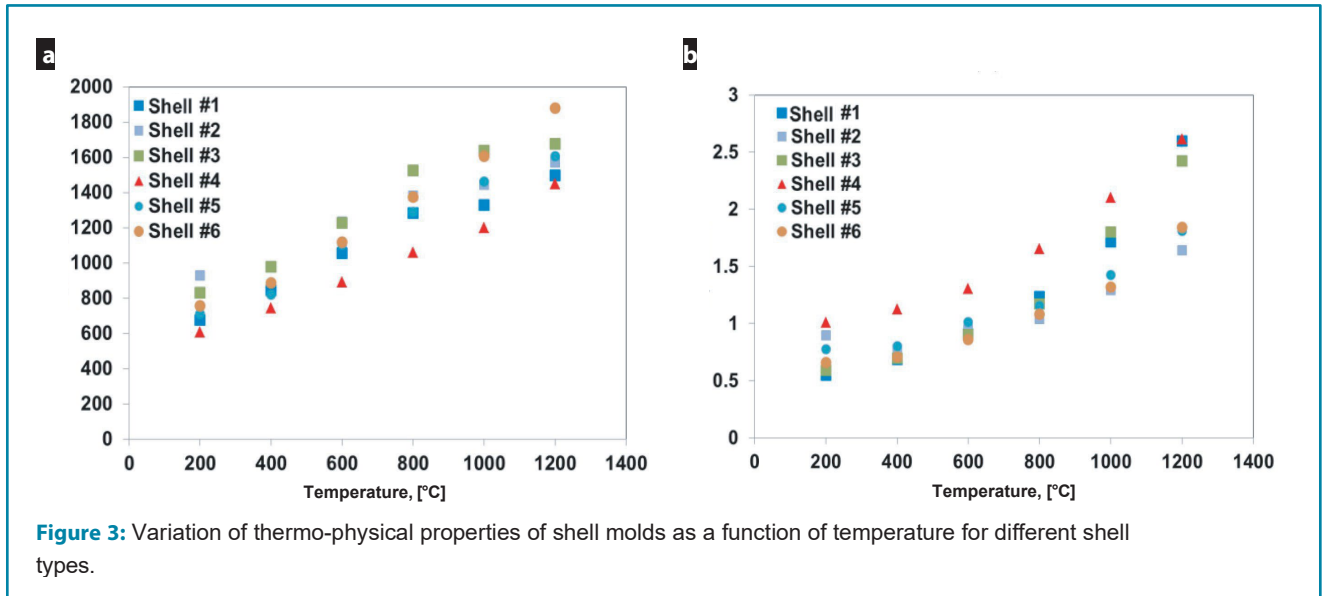
modelar o impacto de parâmetros críticos, tais como diferentes materiais de casca, modificações no desenho do molde ou no sistema de ataques ou variações do processo, tais como tempo e temperatura de vazamento. Os efeitos destas variações sistemáticas na flutuação resultante dos critérios de qualidade nos fundidos são avaliados. Aplicando estes desenvolvimentos, as fundições de cera perdida elevam a sua engenharia de fundição e a configuração do processo a um novo nível. Isto permite-lhes realizar soluções novas, robustas e otimizadas e rotas de fabricação confiáveis antes do início da produção de um produto de alta integridade.

2 Requisitos do processo térmico

Quando o metal fundido é vertido numa casca cerâmica pré-aquecida, a solidificação ocorre já durante o enchimento. A sua extensão depende do sobreaquecimento aplicado ao metal fundido, da temperatura da casca e das propriedades termofísicas da liga. Uma vez completado o enchimento do molde, a distribuição de temperatura na massa fundida é conduzida por condução e convecção. O calor na massa fundida é transferido para o molde através do metal solidificado. Ao mesmo tempo, a contração da peça fundida resulta numa lacuna crescente entre ela e o molde e na associada resistência térmica. O contato térmico resultante e o respetivo coeficiente de transferência de calor (HTC) entre a peça fundida e o molde é uma função do tempo e da pressão (contração), da tensão superficial do metal líquido, dos gases precipitados na fenda, bem como da rugosidade da casca da peça fundida. Dependendo das condições ambientais e do nível de temperatura na superfície do molde, o calor é ainda transportado por convecção e radiação combinadas. Para a maioria dos processos de fundição por cera perdida, a troca radiativa entre as diferentes superfícies do molde e o ambiente deve ser considerada (Figura 2) [3].

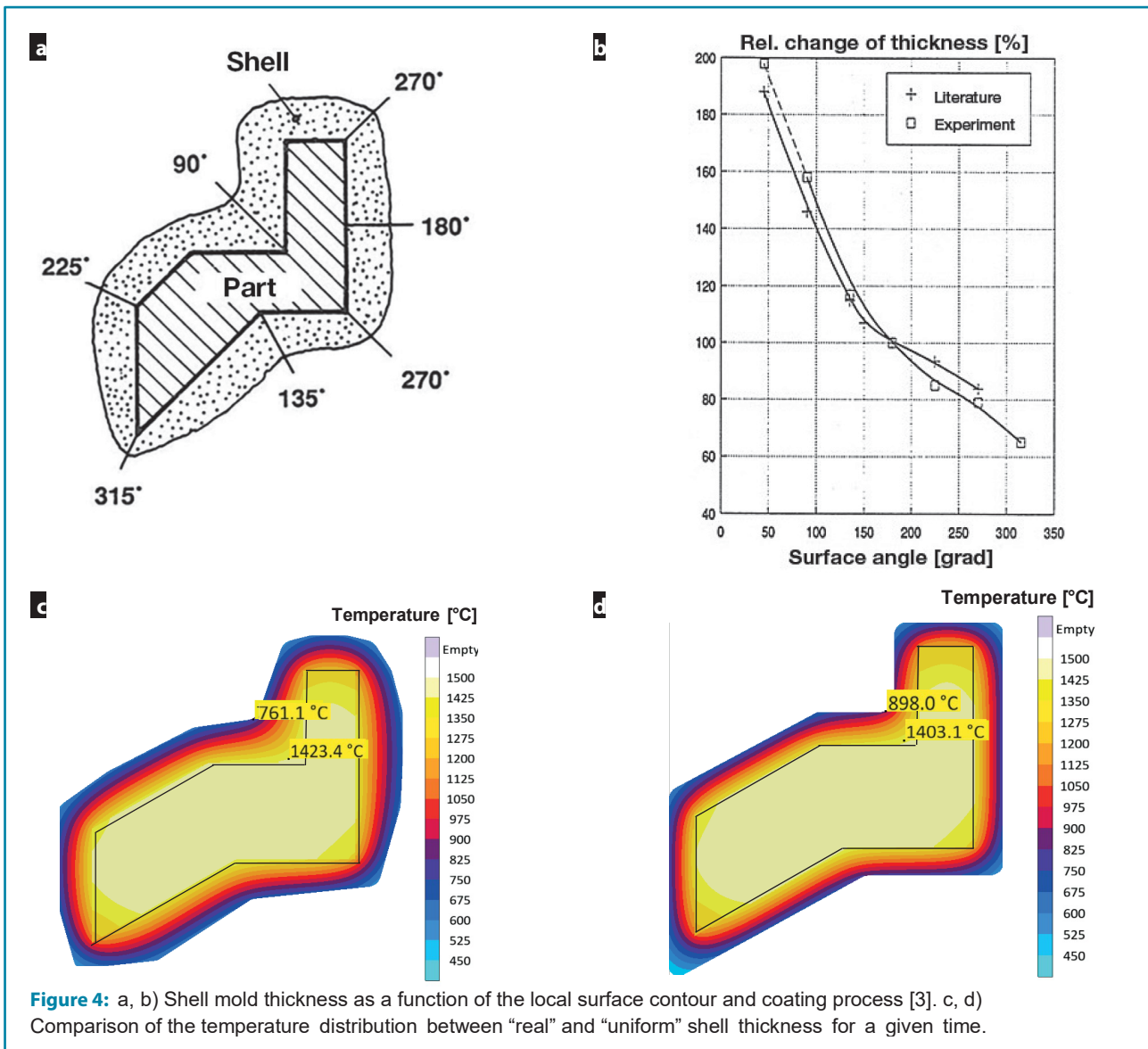


Para simular com precisão o processo de solidificação, são necessários dados confiáveis e realistas sobre as propriedades térmicas da casca (condutividade térmica, capacidade térmica específica, densidade e permeabilidade da casca) (Figura 3) [4]. Essa casca é uma mistura de vários constituintes cerâmicos que são expostos a vários processos térmicos (secagem, aquecimento para remover o padrão de cera, sinterização e pré-aquecimento antes do vazamento).



2.1 Impacto da casca no fluxo de calor

O pré-requisito para uma previsão quantitativa da solidificação e da qualidade da peça resultante utilizando a simulação do processo de fundição é a consideração adequada da casca cerâmica como o principal dissipador de calor e barreira térmica. Isto significa que, além de se ter dados termofísicos precisos para o material heterogêneo da casca, a espessura local da casca também deve ser conhecida. A espessura local da casca depende dos processos de revestimento e acabamento (número de camadas, tamanho do grão e reologia da suspensão), mas também está relacionada com a geometria da peça. Nos cantos interiores, a suspensão cerâmica e a areia acumulam-se, enquanto nas superfícies e cantos exteriores ambos tendem a se desprender. A espessura da casca resultante no modelo de simulação pode ser abordada como uma função do ângulo de superfície local, considerando 180 °C como uma superfície plana (Figura 4).



2.2 Consideração da radiação térmica da casca

Todo o calor que se move através do molde tem de ser transportado para o ambiente. A este respeito, o resfriamento é determinado pela emissão total de calor a partir do molde da casca, devido ao transporte radiativo, condutivo e convectivo. No entanto, para a fundição em condição ambiente, o transporte de calor no ar devido à condução e convecção é limitado devido à sua relação linear com as diferenças de temperatura. A irradiação é normalmente o mecanismo de transferência de calor dominante num processo de fundição por cera perdida. O fluxo de calor depende do coeficiente de emissão da superfície cerâmica e aumenta à potência de quatro com a diferença de temperatura entre as superfícies emissoras do molde pré-aquecido e o ambiente. No caso de uma fundição sob vácuo, a irradiação torna-se obviamente o único mecanismo de transporte. O grau de emissão de calor depende em grande medida das condições locais de irradiação. Isto significa que a emissão de calor é maior em superfícies com emissão livre para o ambiente do que em

superfícies onde a irradiação é limitada devido às superfícies que trocam calor com outras partes do molde. A quantidade de troca radiativa é definida por fatores visuais que descrevem a orientação das diferentes superfícies entre si [3]. Para resolver este problema computacionalmente intensivo de forma eficaz, foram desenvolvidos algoritmos modernos para traçar raios [5]. O exemplo mostrado na **Figura 5** ilustra a influência da troca radiativa e do sombreamento da casca para uma montagem de três cascas de fundição. As superfícies interiores da casca permanecem mais quentes do que as áreas exteriores devido ao calor refletido do canal central, que é o último a solidificar.

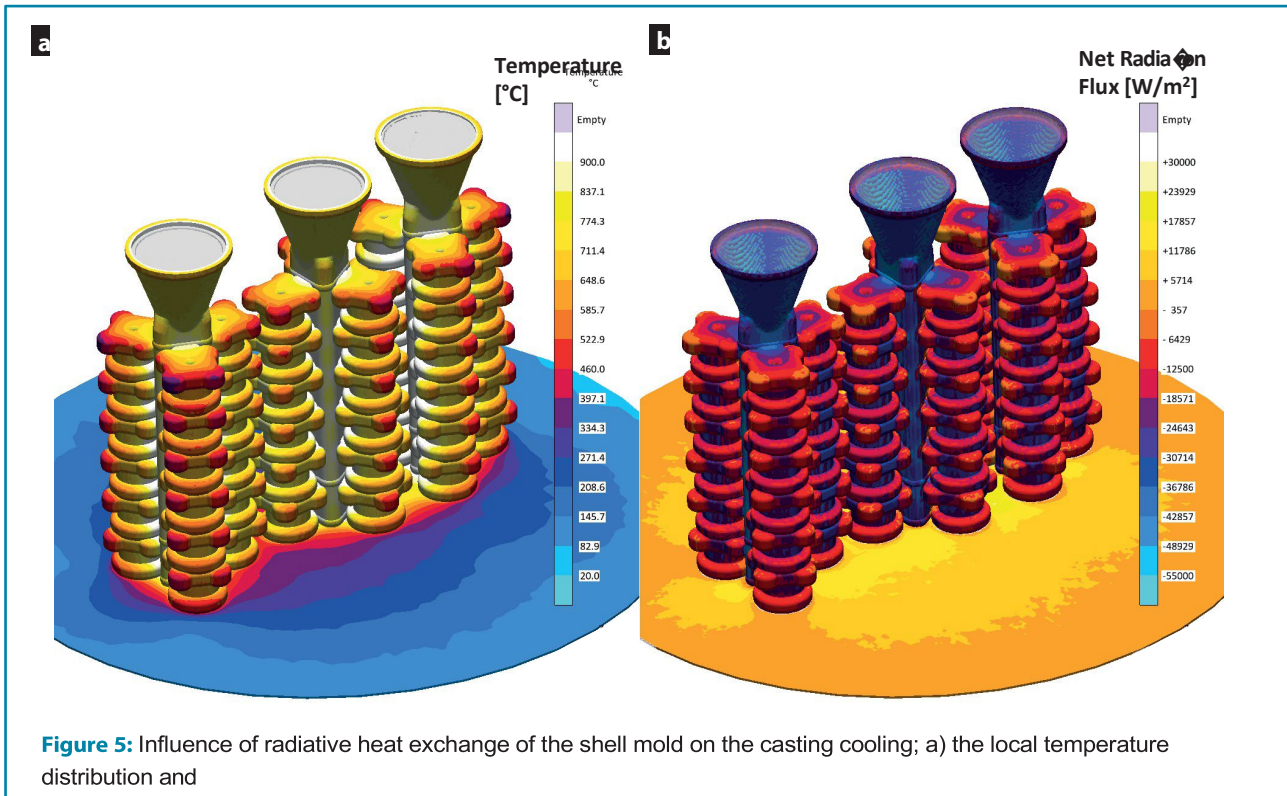
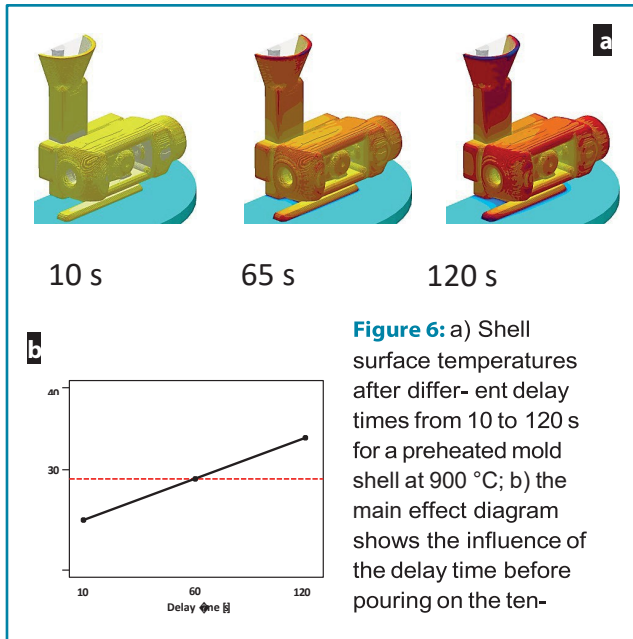


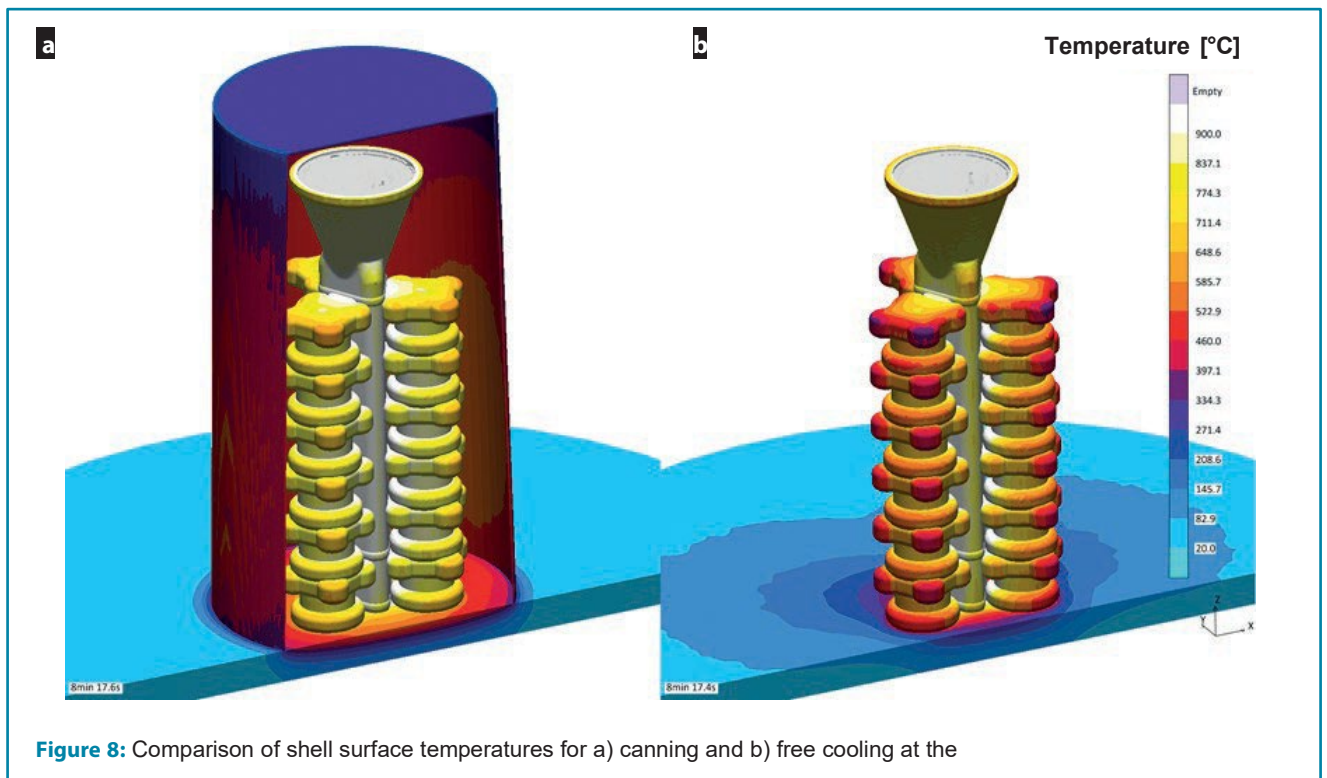
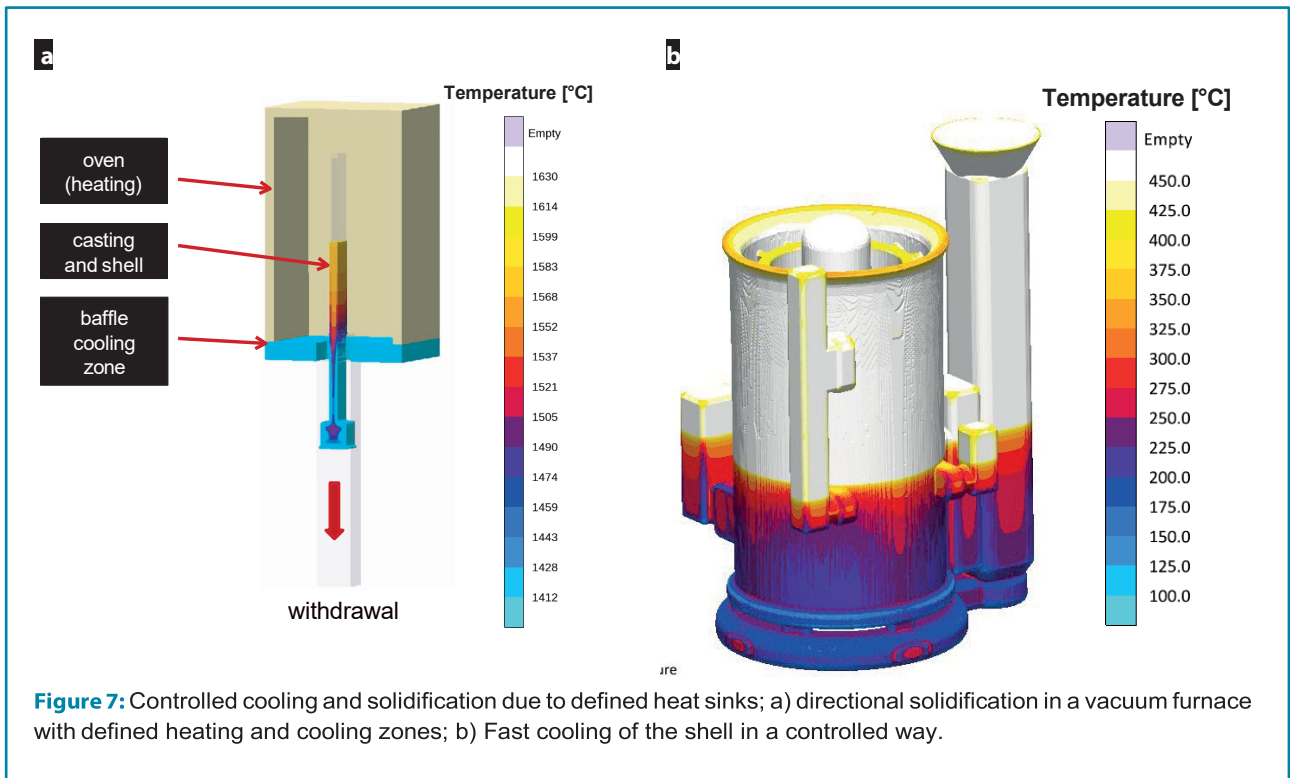
Figure 5: Influence of radiative heat exchange of the shell mold on the casting cooling; a) the local temperature distribution and

2.3 Influenciar o resfriamento da casca antes e durante a fundição

Os atrasos devidos ao transporte da casca do forno de aquecimento e às preparações posteriores podem levar a um resfriamento significativo da casca no momento do vazamento e podem, conseqüentemente, influenciar a solidificação. **A Figura 6** mostra as temperaturas da superfície da casca para diferentes tempos de atraso de 10 a 120 segundos. A temperatura inicial da casca é de 900 °C. Na fundição por cera perdida, foram desenvolvidas várias vias para controlar o fluxo de calor durante o processo de fundição. O conhecido processo Bridgman é utilizado para realizar a solidificação direcional dentro da peça, movendo-a num forno de vácuo de uma zona aquecida para uma zona resfriada.



Este processo é utilizado principalmente para realizar lâminas de turbina monocristalinas (**Figura 7 a**). Para peças fundidas complexas de alumínio, foram desenvolvidos diferentes processos para controlar a potência a direção de resfriamento (por exemplo, processos Sophia e Elite). Um processo controlado por computador faz descer toda a casca para um meio de resfriamento após a fundição. As condições de resfriamento são adaptadas à geometria do componente e conduzem a uma solidificação controlada e mais rápida e, finalmente, à microestruturas melhoradas (**Figura 7 b**). Na fundição por cera perdida, é comum cobrir as cascas após o vazamento (“canning”). Isto permite influenciar a transferência de calor da casca para o meio ambiente e, conseqüentemente, afetar a taxa de resfriamento das peças fundidas. **A Figura 8** compara as temperaturas da superfície das cascas no caso de utilização de “canning” e de resfriamento livre.



3. Investigação de tensões, trincas e distorções

A peça fundida encolhe durante o resfriamento. Dependendo do resfriamento não homogêneo, das diferentes propriedades de expansão térmica e da restrição devido à resistência mecânica da casca, ocorre deformação plástica, resultando em tensões residuais no fundido. A distorção da fundição e, em casos extremos, as trincas de fundição são uma consequência prejudicial [6]. As trincas à frio podem ocorrer se as tensões de von-Mises excederem a resistência à tração local a uma determinada temperatura (Figura 9).

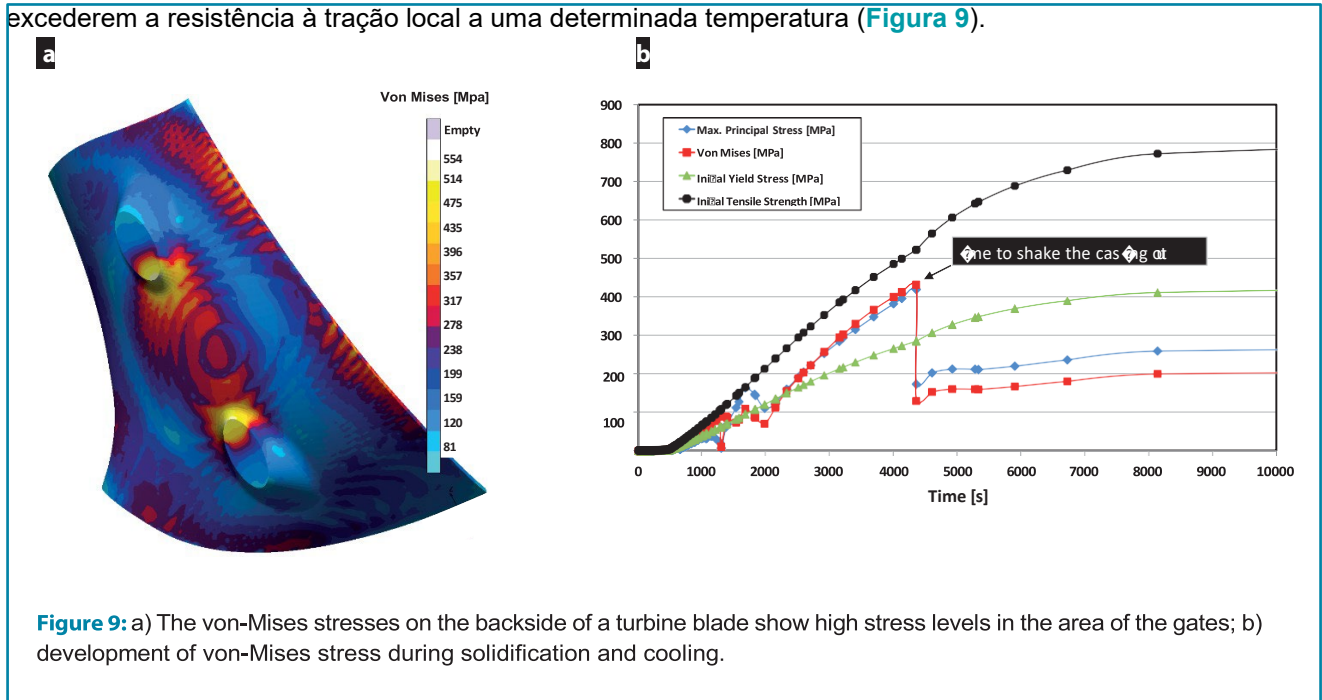
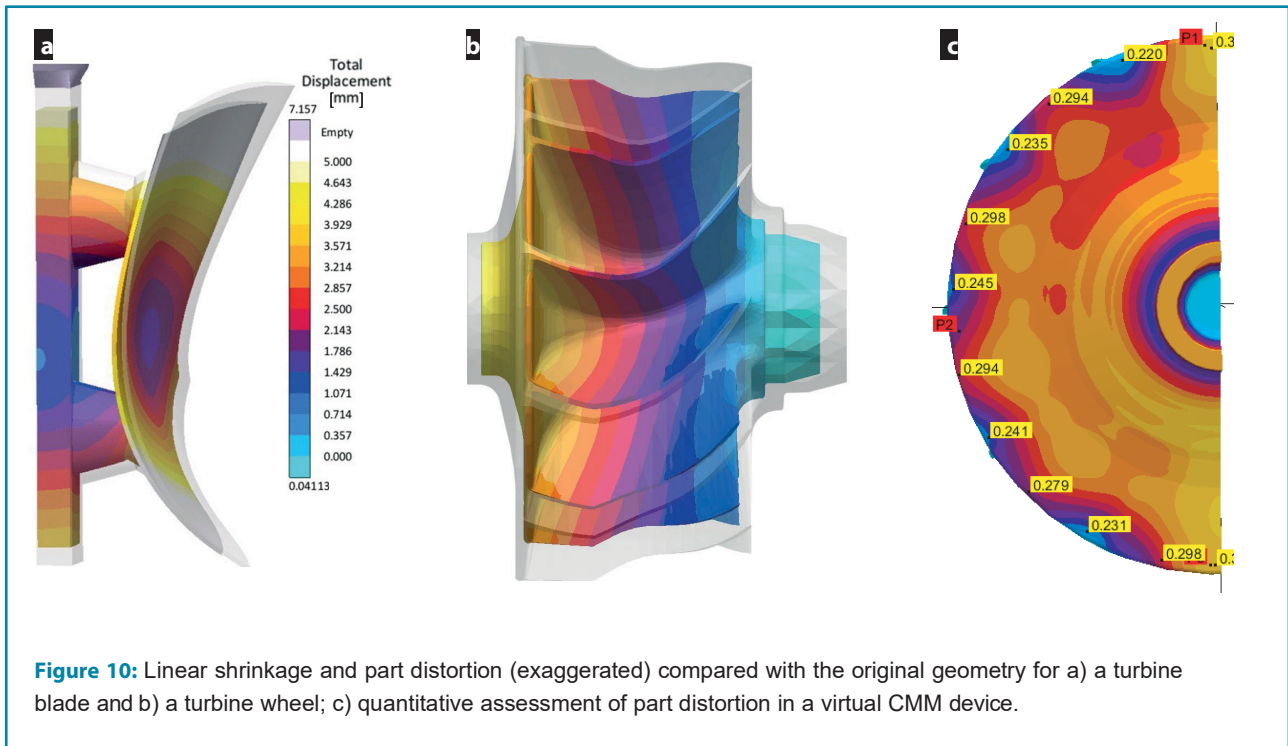
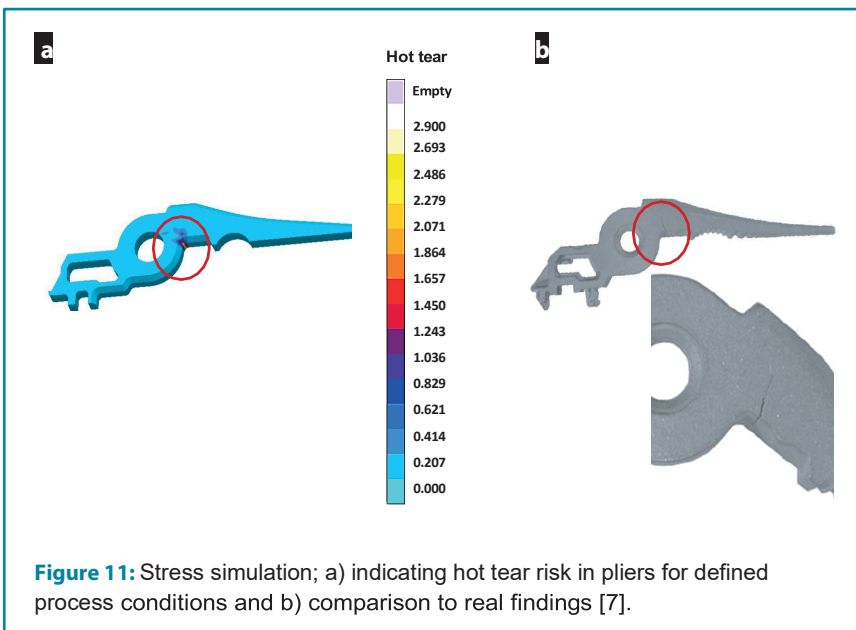


Figure 9: a) The von-Mises stresses on the backside of a turbine blade show high stress levels in the area of the gates; b) development of von-Mises stress during solidification and cooling.

O nível de tensão de von-Mises a 400 °C é mostrado na parte de trás de uma pá de turbina. O resultado de von-Mises mostrou alguns níveis de tensão elevados perto dos ataques na parte de trás da pá de turbina. É de esperar uma deformação plástica, uma vez que a tensão de von-Mises (linha vermelha) excede o Limite de escoamento antes da desmoldagem. Em nenhum caso são previstas trincas, uma vez que as tensões não atingem o Limite de Resistência à Tração (linha preta) em nenhum momento. Quando as tensões evoluem durante a fundição e resfriamento, isto deve levar à distorção da peça. Devido à rigidez da casca, a deformação plástica do fundido resulta em distorção da peça, especialmente após a desmoldagem. A Figura 10 mostra dois exemplos de contração volumétrica e distorção da peça para uma pá de turbina e de um rotor fundidos após solidificação e resfriamento. As capacidades de medição por coordenadas virtuais (CMM) permitem a quantificação e comparação da distorção local para diferentes projetos. A formação de Trincas à Quente é um dos principais defeitos relacionados com o tensionamento nas fundições por cera perdida, causando retrabalhos custosos por solda ou mesmo refugo. As causas principais das trincas são os gradientes térmicos e as contrações restritas devido à casca rígida que resulta em deformação durante a solidificação, alimentação insuficiente e o estado metalúrgico do metal fundido. A solidificação integrada com o modelamento das tensões permite investigar possíveis medidas para evitar a formação de trincas à quente.



O exemplo da **Figura 11** mostra a comparação do risco de trincas à quente previsto com os resultados reais da fundição.



4 Abordagem de toda a cadeia de processos

4.1 Injeção de cera

As empresas de fundição por cera perdida procuram sempre otimizar os tempos e custos de produção ao longo de todo o processo de fundição. Por conseguinte, tem crescido o interesse na simulação de outros processos nessas fundições. Olhando as fases que antecedem a fundição na cadeia geral do processo por cera perdida, a utilização da simulação para investigar a produção de modelos de cera é muito interessante [8]. Muitos defeitos criados durante a injeção da cera serão encontrados na peça fundida final se não forem detectados mais cedo. Uma percentagem significativa de refugo é o resultado direto de modelos de cera deficientes, por exemplo, defeitos de superfície, gás aprisionado e quebra de macho. Entender o comportamento da cera e ser capaz de modelar o seu enchimento em geometrias complexas é o primeiro passo para a compreensão desta importante fase do processo de fundição por cera perdida. O SIGMASOFT® [9] é um pacote de simulação de injeção de polímeros que permite abordar a natureza de fluxo não-Newtoniano das ceras utilizadas no processo de fundição. A **Figura 12** mostra a simulação de uma injeção de cera. Com uma temperatura inicial de injeção de 56 °C, a cera resfria até 19 °C durante o enchimento. No final da injeção, as temperaturas da cera variam até 25 °C. Isto leva a um enchimento desequilibrado, resultando em distorções e defeitos de depressão.

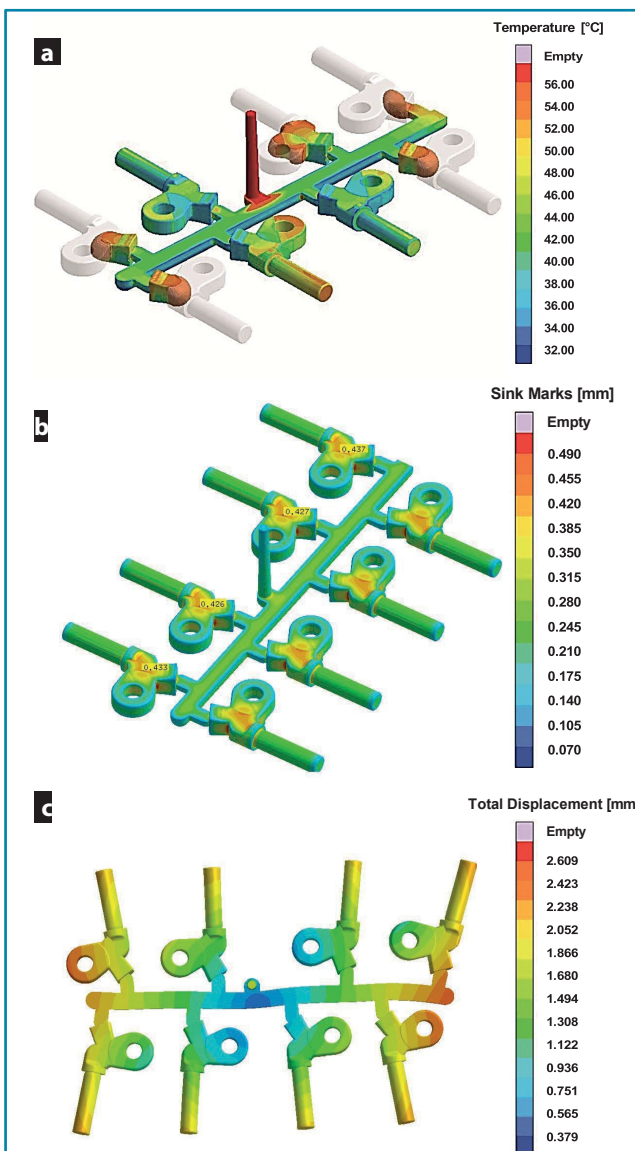


Figure 12: Simulation of the wax injection, indicating a) unbalanced filling, b) sink marks due to insufficient

4.2 Tratamento térmico, microestrutura e propriedades do material

Olhando agora as fases posteriores da cadeia do processo, muitas peças de fundição de aço e de não-ferrosos requerem um tratamento térmico posterior à fundição. Os objetivos vão desde obter as microestruturas bem como as propriedades mecânicas desejadas, até a redução das tensões residuais existentes e a distorção da peça. A simulação do processo pode prever as microestruturas e as propriedades mecânicas resultantes em função das condições de processo do tratamento térmico escolhido. O MAGMASOFT® prevê a segregação local de elementos de liga durante a solidificação. Usando esta informação em simulações subsequentes de tratamento térmico, é possível considerar a influência das diferenças de concentração local na distribuição da microestrutura, bem como as propriedades do material após o tratamento térmico. **A Figura 13** mostra o impacto da segregação de carbono na formação local de martensita após a têmpera para duas regiões de um aço fundido (geometria – ver Figura 17) com taxas de resfriamento semelhantes durante o processo de têmpera. Durante o tratamento térmico, o estado de tensão da peça fundida muda completamente. Durante o recozimento (normalização ou tratamento de solução), o alívio de tensões na peça fundida é regido pelos efeitos de plasticidade e de fluência. Durante a têmpera, as tensões são fortemente acumuladas, impulsionadas por gradientes de temperatura elevados. A densidade também se altera na peça fundida, o que aumenta o risco de trincas durante a têmpera. À medida que a taxa de resfriamento aumenta, a fração de martensita na microestrutura também aumenta, resultando numa alteração da densidade local, o que significa uma contração volumétrica não uniforme na microestrutura. Para minimizar a distorção da peça e os riscos de trincas, é necessário estabelecer um bom compromisso entre as características do material e os níveis de tensão toleráveis.

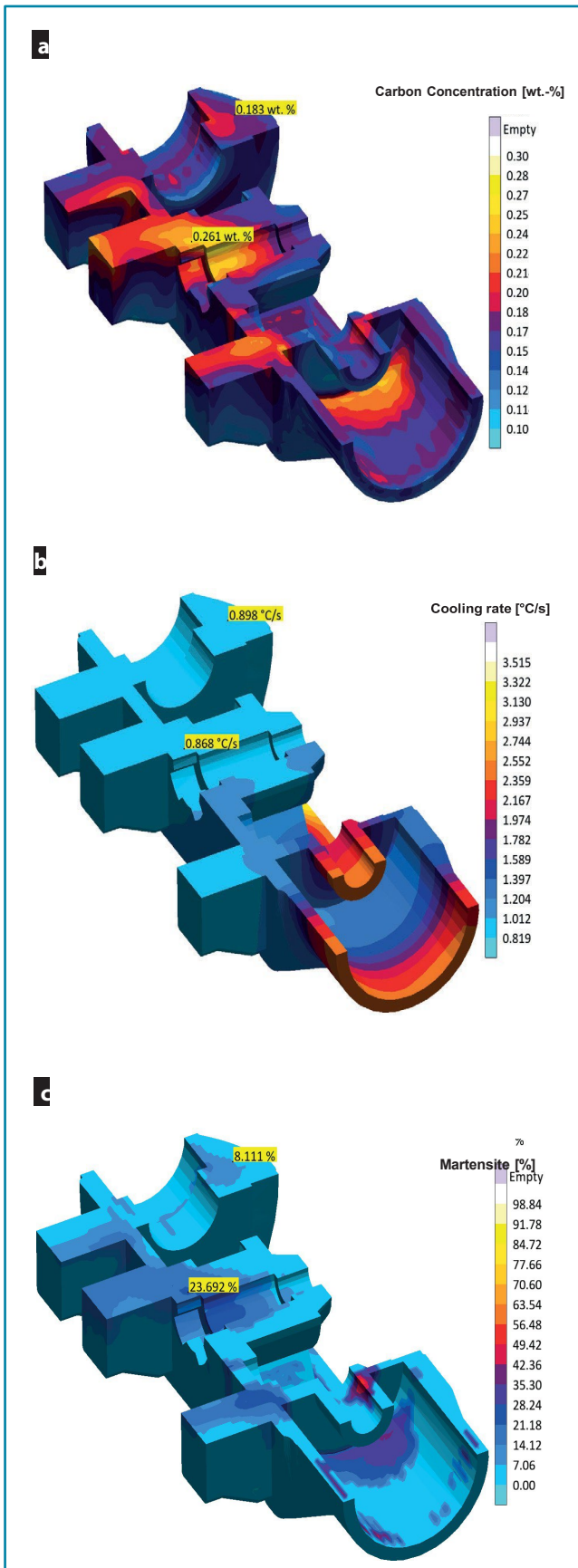
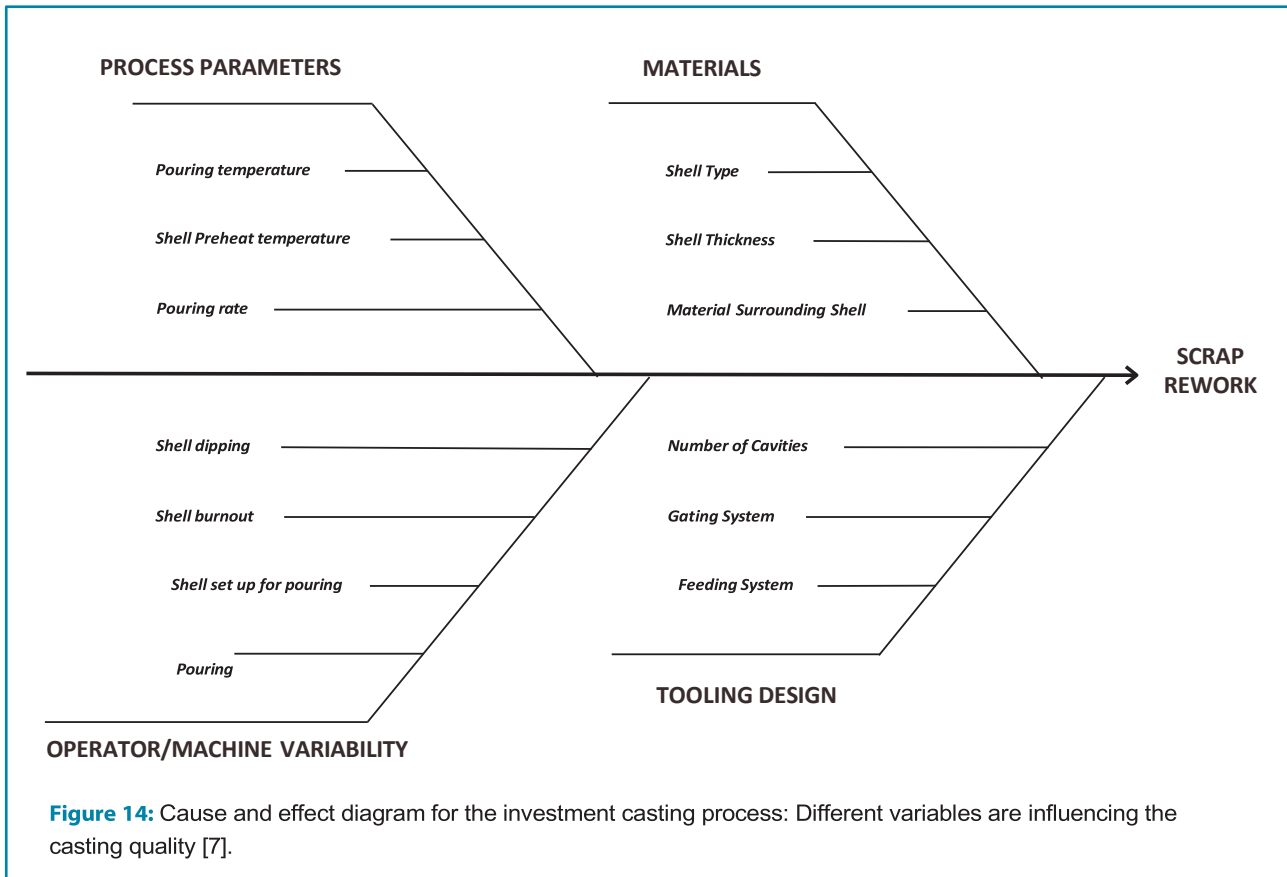


Figure 13: Effect of carbon segregation on martensite formation during quenching. a) Differences in carbon content due to segregation in the casting process, b) local cooling rates during the quenching process, c) differences in martensite content in two regions after quenching despite equal cooling rates.

5 Da simulação à engenharia autônoma

Nos processos de fundição, tudo acontece ao mesmo tempo e está intimamente ligado. Embora isto possa ser considerado como uma vantagem chave da fundição em comparação com outros processos de fabricação de metais, também torna complexa a tomada de decisões relativamente a um layout de processo ótimo. A alteração de apenas um parâmetro do processo pode influenciar a qualidade final do fundido de muitas maneiras. Isto faz com que seja difícil otimizar manualmente o processo no mundo real, buscando simultaneamente objetivos de qualidade e de custos [9, 10]. As interações complexas relacionadas com o número de variáveis que existem no processo de fundição são a causa principal de vários defeitos de qualidade. **A Figura 14** apresenta um diagrama simples de causa e efeito para o processo de fundição por cera perdida, mostrando a diversidade de variáveis que influenciam a qualidade dos fundidos. Devido à diversidade de fatores que afetam a qualidade das peças e às complexas interações entre a física, a metalurgia e a geometria do fundido, mesmo os peritos não conhecem nem o ponto ótimo possível nem a robustez da janela de processo escolhida antes da realização de múltiplos ensaios. Uma nova abordagem ultrapassa estas limitações. Esta metodologia, chamada de Engenharia Autônoma, utiliza múltiplas simulações com o MAGMASOFT® como um conjunto de experiências virtuais, a fim de alcançar as melhores soluções possíveis. A Engenharia Autônoma utiliza a ferramenta de simulação como um campo virtual de experimentação ou teste. Ao alterar a tecnologia de fundição por cera perdida, por exemplo, o design do sistema de canais ou alimentação, ou os parâmetros de processo, o software tem como objetivo encontrar um ponto de funcionamento ótimo dentro dos limites especificados. Vários parâmetros podem ser sistematicamente modificados ao mesmo tempo e podem ser avaliados independentemente uns dos outros. Além disso, a robustez do processo pode ser avaliada antes de se efetuar a primeira produção. O software utiliza abordagens estatísticas (DoEs) para atingir vários objetivos em simultâneo e encontra o melhor compromisso com base nos primeiros princípios [9]. A avaliação automatizada de todos os critérios de qualidade simulados pode ser utilizada para encontrar rápida e facilmente a rota ótima para atingir os objetivos desejados. Além disso, o número de ensaios reais pode ser reduzido e o impacto de vários parâmetros do processo na obtenção de uma janela de processo robusta pode ser avaliado nas fases iniciais do desenvolvimento do fundido, do modelo e do processo. A metodologia da Engenharia Autônoma não substitui o conhecimento do processo e a experiência do fundidor. Com base nas condições técnicas e económicas do seu processo, os engenheiros de fundição precisam especificar quais os parâmetros que podem ser alterados e em que medida. Isto é feito em combinação com os requisitos impostos à peça fundida e os objetivos a serem alcançados. Para responder a estas questões, são necessárias descrições quantitativas dos fatores de influência importantes, indicadores mensuráveis de qualidade e de custos, e os objetivos. Aplicando estes desenvolvimentos como parte integrante da Engenharia Autônoma, esta é uma oportunidade única para as fundições de cera perdida alcançarem aplicações novas e otimizadas, bem como rotas de fabrico confiáveis antes do início de produção de alto requisito.



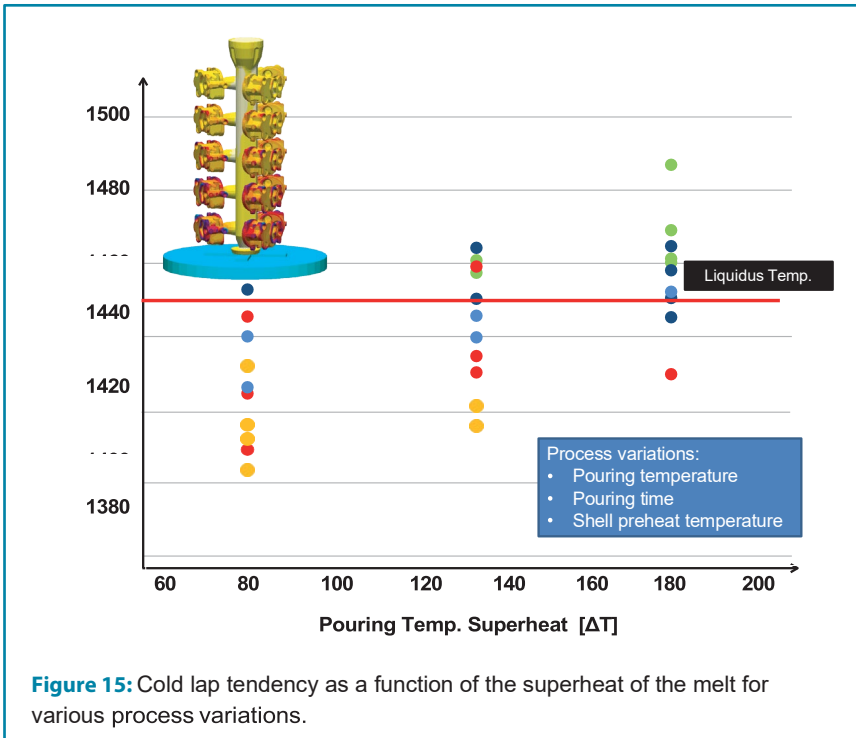
5.1 Condições de processo robustas - efeitos dos parâmetros do processo

O termo "robusto" significa capaz de funcionar sem falhas sob uma vasta gama de condições de processo flutuantes que não podem ser controladas. A variabilidade do processo na fundição por cera perdida é um problema significativo. As principais variáveis que afetam a fundibilidade são a temperatura de vazamento, a taxa de vazamento, a temperatura da casca e a espessura da casca. A temperatura de vazamento depende da liga, da geometria e das condições do processo. Temperaturas de vazamento elevadas podem causar a absorção de gás pelo metal ou reações indesejáveis metal-molde. Por outro lado, baixas temperaturas de vazamento podem levar a juntas frias ou mesmo a áreas não preenchidas em peças de paredes finas. No exemplo seguinte, foi efetuada uma DoE virtual para as seguintes variações de processo:

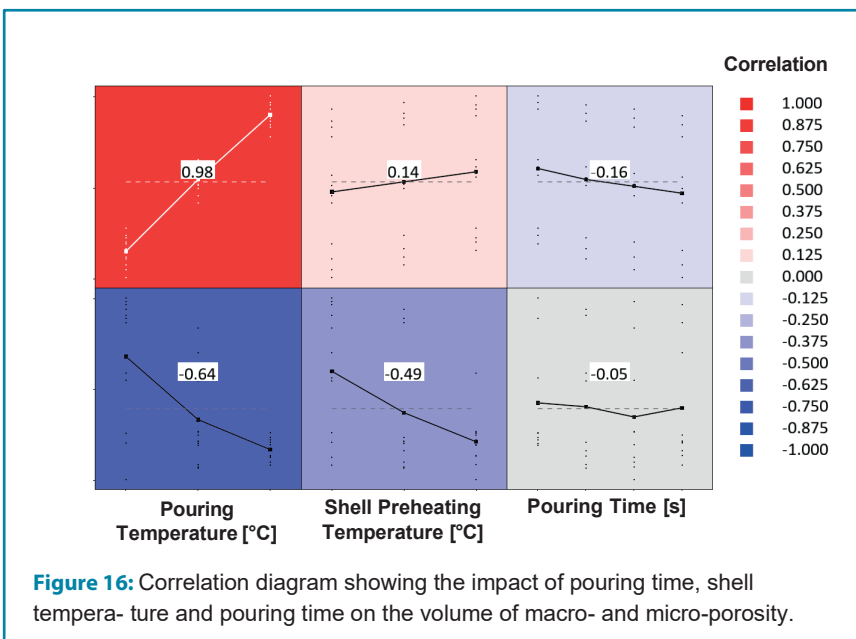
- > Temperaturas da casca (900 a 1100 °C)
- > Temperaturas de vazamento (1530 a 1630 °C)
- > Tempos de vazamento (7 s, 10 s, 13 s, 16 s)

No total, foi realizada um DoE "full factorial" com 36 experiências virtuais (enchimento e solidificação). **A Figura 15** apresenta os resultados de todas as experiências virtuais num diagrama de dispersão. Os resultados relativos à tendência à formação de juntas frias são exibidos em função da variável superaquecimento. A tendência às juntas frias obviamente cresce com a diminuição da temperatura de vazamento. Devido ao impacto das outras variáveis (temperaturas da casca, tempos de vazamento), a figura mostra uma dispersão

de resultados para cada temperatura de vazamento escolhida. Isto indica que a robustez do processo diminui com um superaquecimento mais baixo.



A Figura 16 mostra a correlação dos três parâmetros importantes do processo com a qualidade da fundição, nesse caso com o volume dos rechupes e dos microrechupes no fundido. Como mencionado anteriormente, não é apenas importante visualizar a variação de um parâmetro de forma isolada, mas sim mostrar a sua interação com outros parâmetros do processo. Enquanto o tempo de vazamento tem apenas um impacto marginal no resultado final de rechupes, os aumentos das temperaturas de casca e principalmente de vazamento têm uma influência significativa nos macro e microrechupes.



5.2 Engenharia de fundição robusta

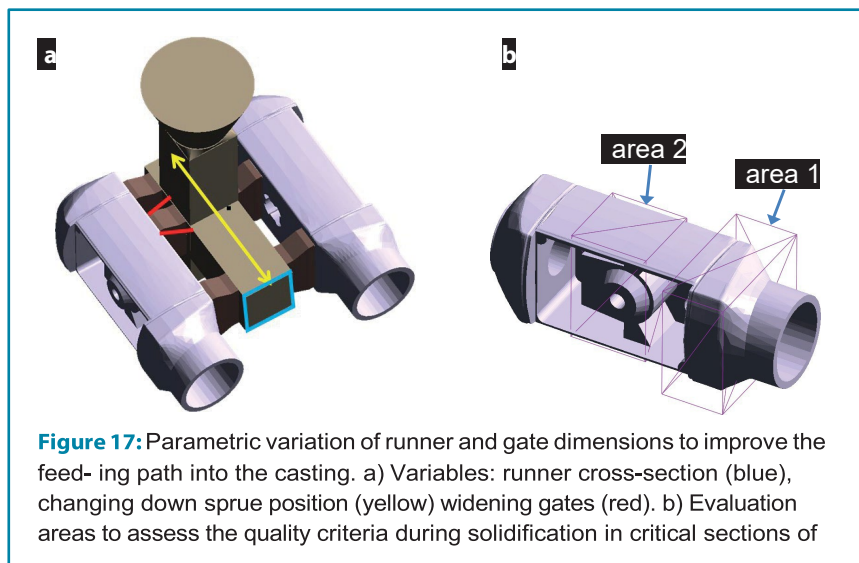
Um fundido de qualidade dependerá muito da metodologia aplicada. Durante o planejamento, a disposição e o dimensionamento dos ataques e canais têm um impacto direto na qualidade da peça fundida. A maioria dos defeitos de fundição pode ser evitada com um sistema otimizado de canais e ataques, na maioria dos casos pagando o preço com a redução do rendimento ou aumento dos custos de fabricação.

5.2.1 Melhorar a alimentação através do ajuste do canal e ataques

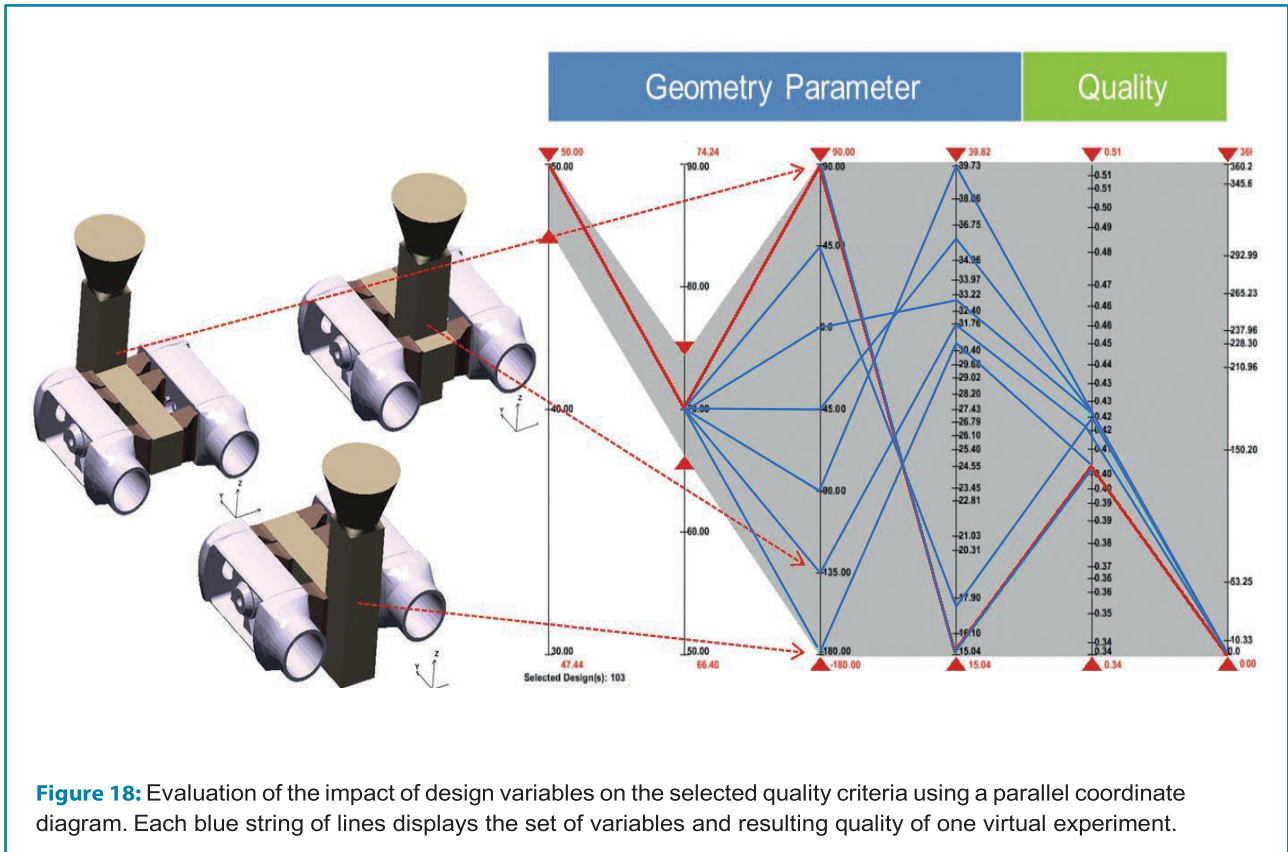
A concepção de sistemas eficientes de canais/alimentação para peças fundidas por cera perdida sempre foi difícil devido a uma série de fatores limitantes, resultantes das geometrias complexas e das necessidades do processo. No caso que se segue, foram investigados vários conceitos de canais com DoE virtual, utilizando geometrias paramétricas para as seguintes variações de canal de descida/ataque:

- > Secção transversal do canal de descida (linha azul, 5 variantes),
- > Posição do canal de descida (linha amarela, 7 variantes),
- > Largura do ataque na junção com o canal (linha vermelha, 3 variantes).

O software avalia autonomamente um DoE *full factorial* com 105 desenhos diferentes e simula o enchimento e a solidificação para todas as combinações possíveis. Sem qualquer ação do usuário, cada simulação na DoE autônoma é configurada, calculada e avaliada automaticamente com base nos critérios de qualidade escolhidos. O usuário define aqui os principais objetivos para encontrar o melhor compromisso entre todas as variantes para realizar um caminho de alimentação ótimo no fundido. A influência do design dos ataques na redução do volume do ponto quente para uma dada fração sólida é investigada em certas áreas críticas ([Figura 17](#)).

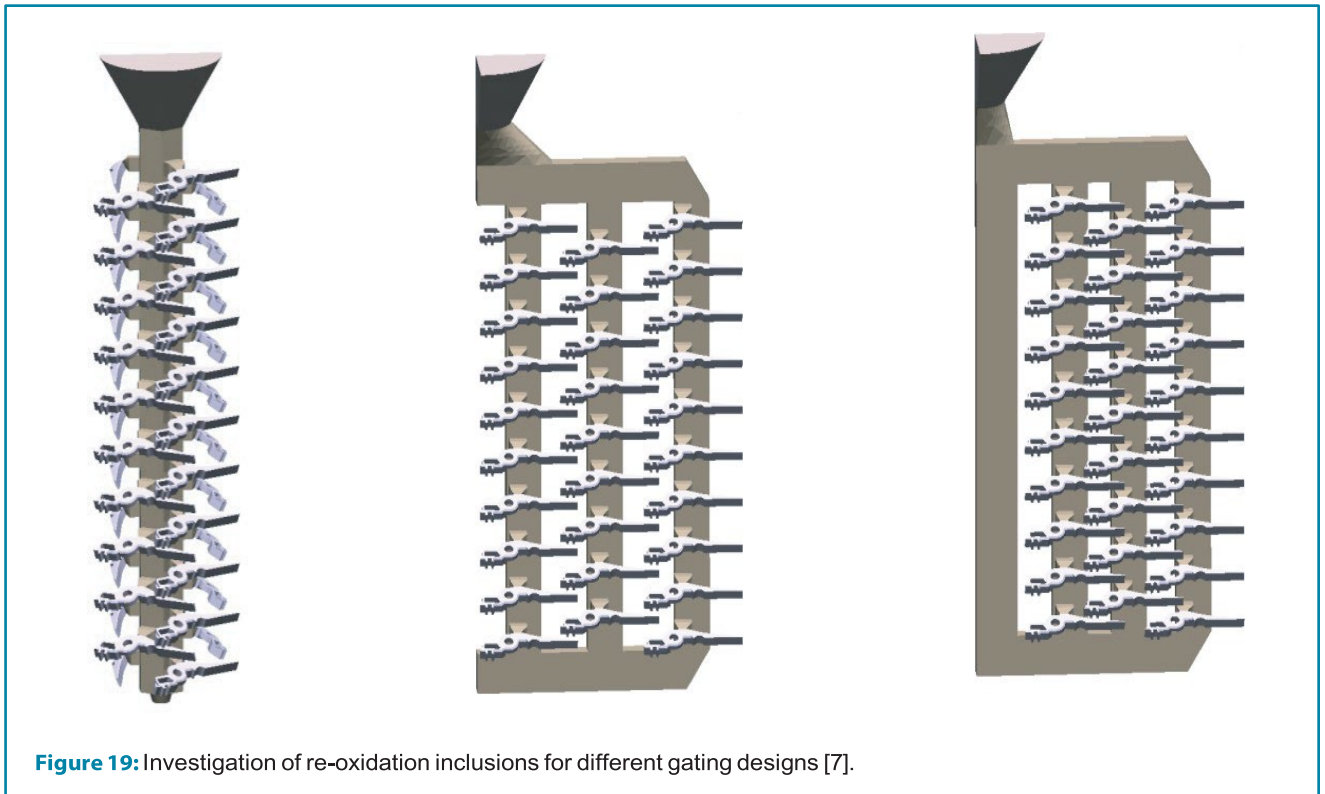


A **Figura 18** mostra os resultados da DoE virtual para avaliar o impacto de diferentes conceitos de canais nos pontos quentes e defeitos de rechupes. O diagrama de coordenadas paralelas ajuda a obter uma melhor compreensão do impacto das alterações de parâmetros num caminho de alimentação melhorado no fundido para os critérios de qualidade seleccionados.

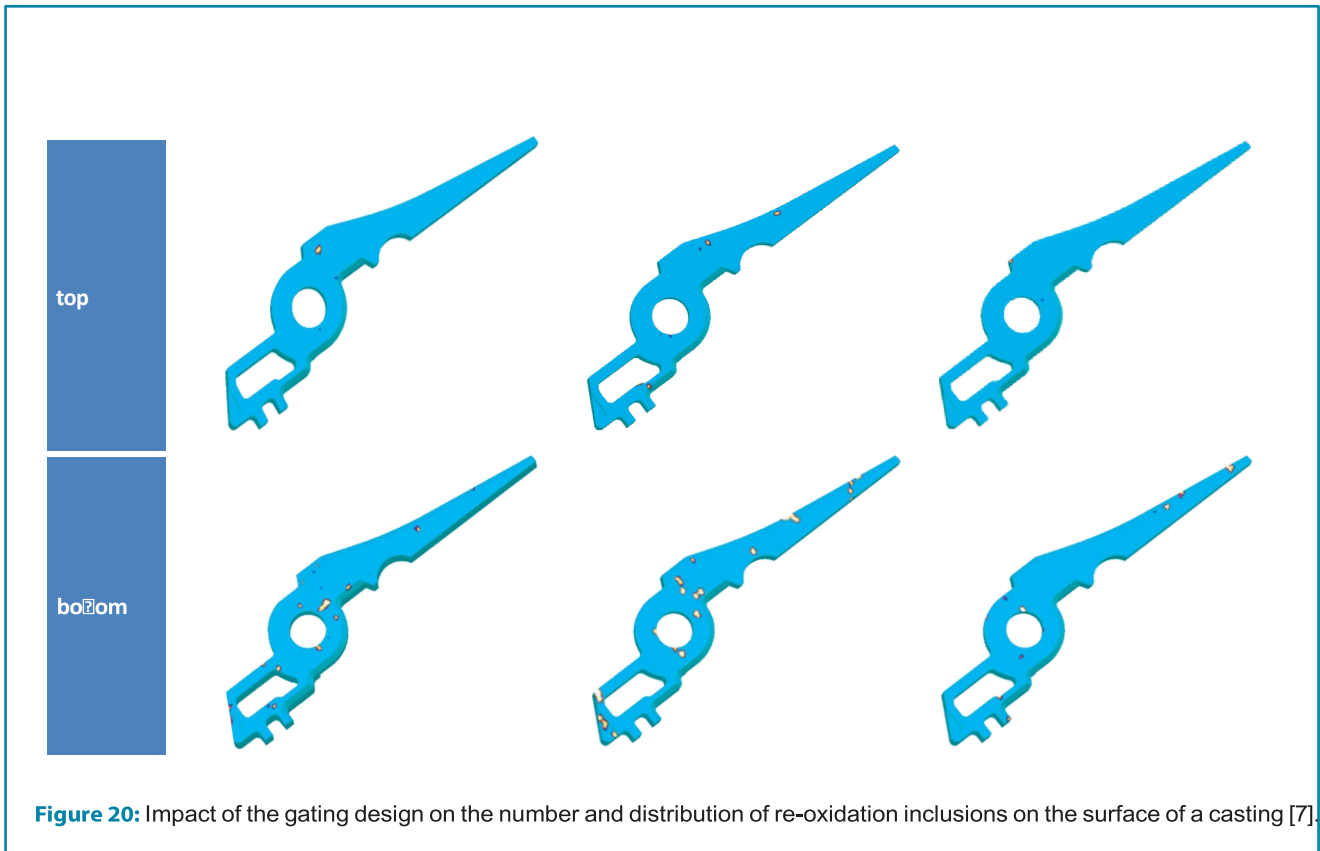


5.2.2 Configuração do canal para otimizar a pureza do metal líquido

Para evitar a dispersão da qualidade, uma questão importante na concepção de um sistema de ataques para peças fundidas por cera perdida é garantir que todas as cavidades sejam preenchidas e solidifiquem de maneira uniforme. Do ponto de vista do processo, o objetivo é minimizar a turbulência e o aprisionamento de gás durante o enchimento e garantir uma alimentação suficiente durante a solidificação. Estes objetivos são frequentemente comprometidos pela necessidade de conceber a árvore para suportar a manipulação e as cargas mecânicas durante o revestimento. Para muitas peças fundidas de aço, as inclusões de reoxidação são uma das principais causas de retrabalho ou mesmo de refugo. A formação de inclusões está intimamente ligada à turbulência durante o enchimento. Simulando a turbulência do fluxo durante o enchimento, o arraste de gás resultante, a probabilidade e o tamanho das inclusões podem ser modelados quantitativamente (**Figura 19**). Neste caso, foram investigados diferentes conceitos de ataques com relação à sua sensibilidade à criação de inclusões de reoxidação na peça fundida.



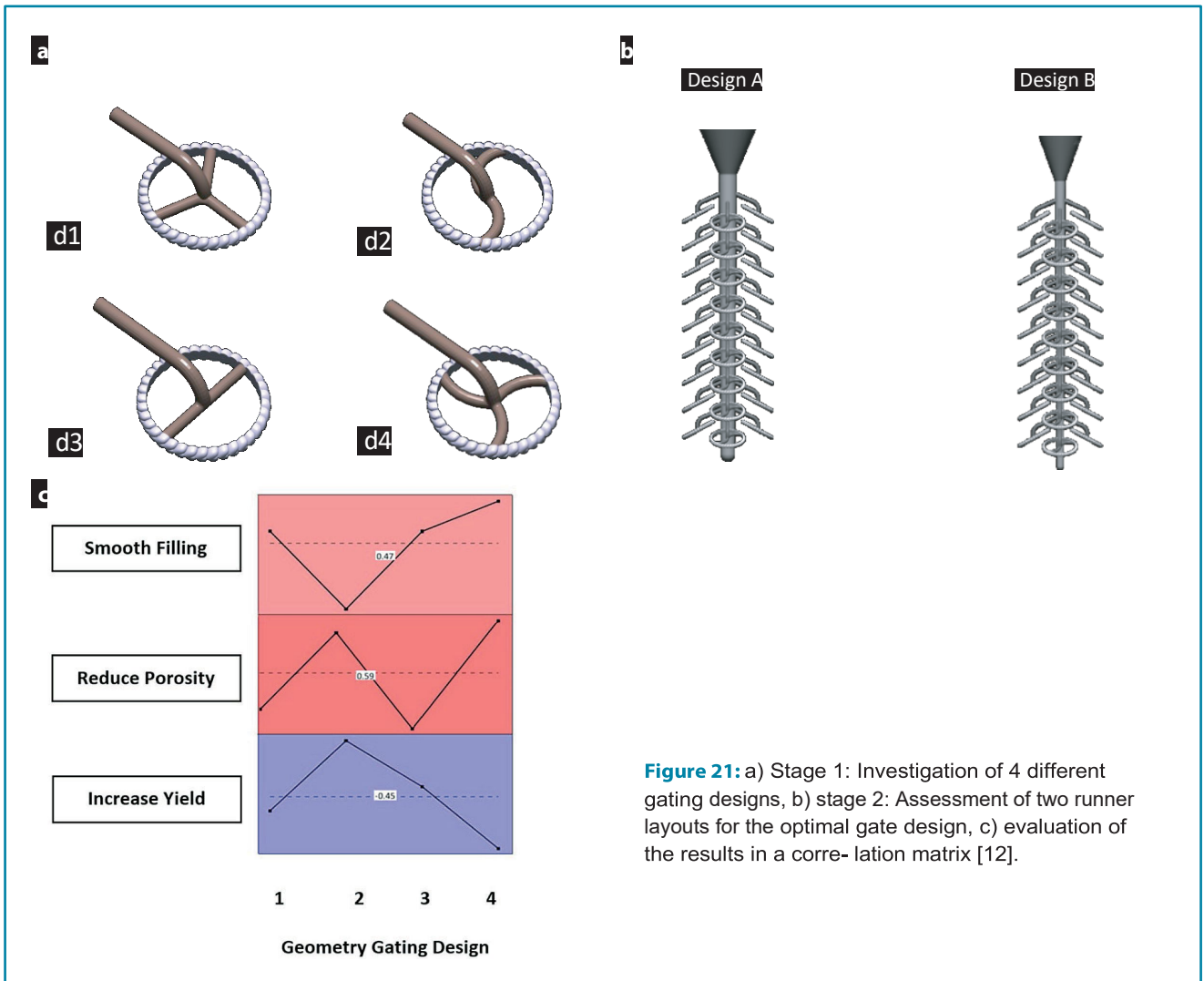
A **Figura 20** ilustra a distribuição prevista e as quantidades de inclusões para as peças fundidas localizadas no topo e na base da árvore. Pode observar-se uma clara diferença nas inclusões previstas entre os três diferentes designs de árvore, bem como entre as partes superiores e inferiores.



5.2.3. Procurar a melhor forma

Muitas peças de metais preciosos são fundidas por cera perdida. Portanto, é um dos maiores desafios para os fabricantes de joias encontrar um bom equilíbrio entre a qualidade da fundição e a eficiência de custos. A **Figura 21** ilustra a possibilidade de fornecer soluções abrangentes sobre a otimização do processo na indústria da joalheria, utilizando o exemplo de um anel. O anel deve ser feito da liga de prata AgCu7. Foi efetuado um processo de seleção de design em 2 fases, sendo o objetivo na fase 1 de encontrar o melhor sistema de ataques para a fundição individual do anel (d1 a d4). A fase 2 foi utilizada para otimizar a configuração da montagem (design A e B) [12]. Para medir o resultado, foram investigados dois critérios de qualidade diferentes (enchimento suave e rechupes) e comparados com o respetivo rendimento. A matriz de correlação (Figura 21) revela que o design d2 apresenta o melhor compromisso entre o enchimento suave (menor turbulência durante o enchimento), ao mesmo tempo que atinge o rendimento mais elevado entre todas os outros designs. Na fase 2, foram escolhidos dois possíveis designs de árvores com diferentes diâmetros de canais, utilizando o desenho selecionado (d2). Posteriormente, foi realizada uma outra avaliação de desempenho virtual para os dois modelos de árvores com um objetivo adicional de evitar ou minimizar as falhas de enchimento. A avaliação das duas concepções para todos os critérios indicou claramente que o

design B era a melhor escolha, devido à menor turbulência durante o enchimento, bem como à menor tendência à rechupes, ao maior rendimento e à tendência mínima para falhas de enchimento.



5.3 Associar as decisões tecnológicas a uma qualidade robusta e a um custo otimizado

As fundições por cera perdida têm sempre como objetivo estabelecer uma janela de processo que garanta uma qualidade robusta de acordo com as especificações e custos otimizados ao longo de todo o processo de fundição. Conhecer o impacto das decisões técnicas nos custos resultantes dos retrabalhos ou mesmo do refugo é fundamental para tomar decisões confiáveis. Este estudo de caso simplificado de uma carcaça de turbina demonstra como a alteração de um parâmetro do processo (temperatura de pré-aquecimento da casca) afeta a qualidade da peça fundida (risco de falhas de enchimento, rechupes e microestrutura (espaçamento dendrítico secundário)), (Figura 22). A peça fundida estrutural de alumínio (A356) tem um peso de 64 kg e uma altura de 90 cm. As simulações foram efetuadas para três temperaturas diferentes de pré-aquecimento da casca (200 °C, 400 °C e 600 °C). O objetivo principal era encontrar o melhor compromisso entre a quantidade mínima de rechupes e o risco mínimo de juntas frias para um nível aceitável de DAS. A temperatura de pré-aquecimento da casca tem uma influência considerável para evitar juntas frias. À medida que a temperatura da casca é reduzida, o risco de juntas frias no fundido obviamente aumenta, enquanto o nível DAS é reduzido. Por outro lado, a quantidade de rechupes aumenta tanto a baixas como a altas temperaturas de pré-aquecimento e tem um mínimo a 400 °C. A avaliação sistemática da janela de processo dada permite a avaliação da qualidade da fundição e do impacto dos custos, bem como a robustez ou margem de segurança do ponto nominal de funcionamento ao mesmo tempo.

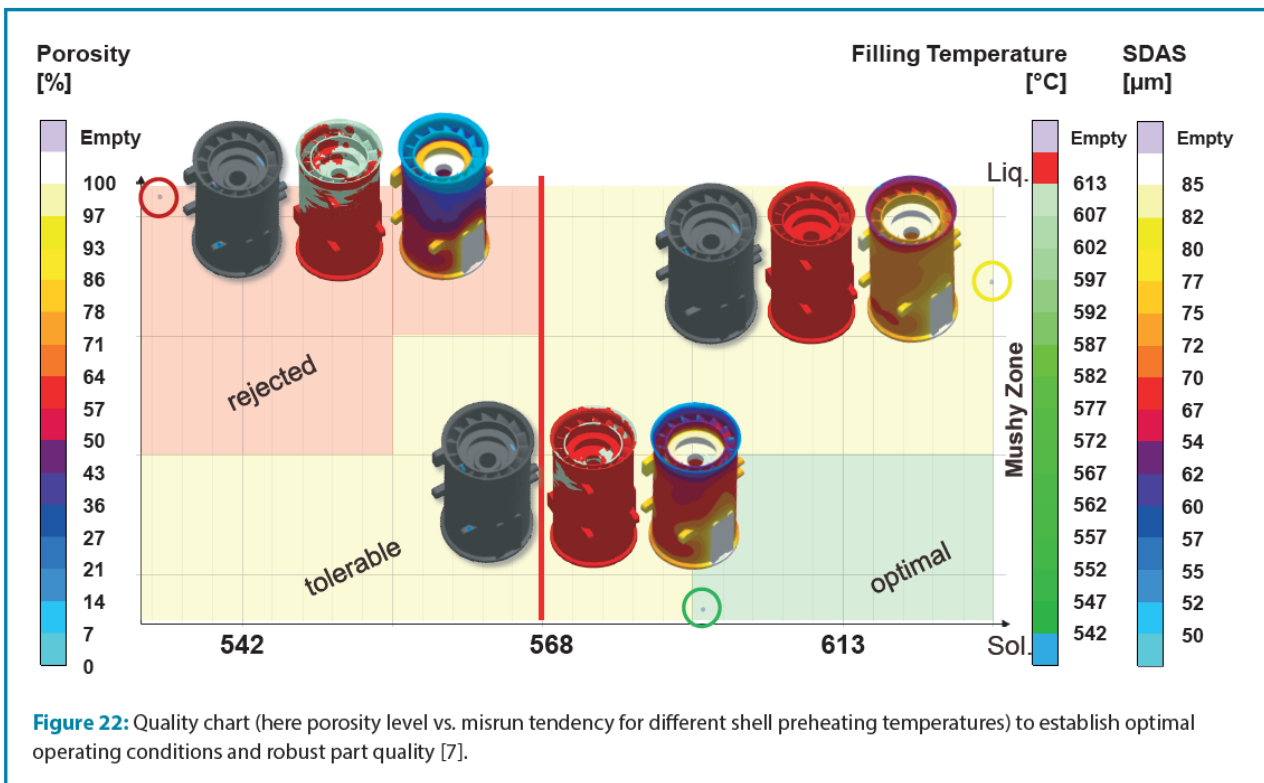


Figure 22: Quality chart (here porosity level vs. misrun tendency for different shell preheating temperatures) to establish optimal operating conditions and robust part quality [7].

5.4 Condições robustas e otimizadas do processo de tratamento térmico

Um processo industrial robusto para produtos fundidos de alta qualidade por cera perdida requer a redução da influência das flutuações do processo na qualidade da peça após o tratamento térmico, bem como condições de processo robustas e otimizadas. A Engenharia Autônoma permite avaliar a influência das variáveis do processo de tratamento térmico na microestrutura e nas propriedades mecânicas resultantes, realizando virtualmente o DoE. Os objetivos da otimização são a obtenção do melhor compromisso entre a microestrutura e as propriedades do material, bem como a utilização eficiente dos recursos, por exemplo, energia, tempo de tratamento e capacidade de produção. Todas as variáveis significativas do processo, tais como o histórico térmico e a composição química da liga, podem ser ter sua influência investigadas sistematicamente na qualidade da peça resultante. **A Figura 23** mostra os resultados de uma DoE virtual que investiga o efeito de diferentes meios de refrigeração durante a têmpera de um fundido de aço no tempo de resfriamento, bem como na dureza resultante. A dispersão da dureza na peça fundida é fortemente dependente do meio de refrigeração. A figura também mostra como a composição química, neste exemplo o carbono e o manganês, afetam a microestrutura (austenita retida) e as propriedades resultantes do material (dureza) após o tratamento térmico. O exemplo demonstra como as experiências virtuais sistemáticas fornecem informações quantitativas para estabelecer condições de processo otimizadas.

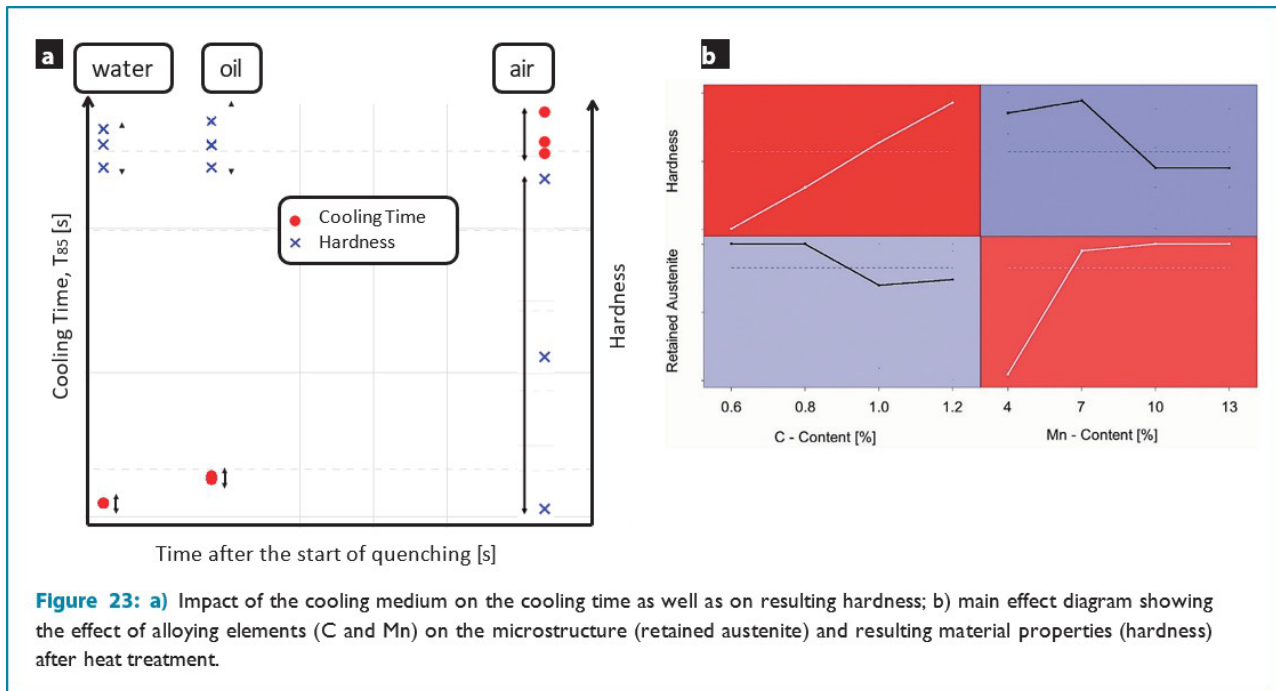


Figure 23: a) Impact of the cooling medium on the cooling time as well as on resulting hardness; b) main effect diagram showing the effect of alloying elements (C and Mn) on the microstructure (retained austenite) and resulting material properties (hardness) after heat treatment.

6 Conclusões

Tendo começado nos primórdios principalmente para produzir obras de arte, a fundição por cera perdida desenvolveu-se ao longo dos anos num processo de fabricação confiável que serve várias indústrias com peças fundidas de elevada integridade. Os desafios atuais que o processo enfrenta, como ameaças de substituição pela manufatura aditiva, a globalização e a concorrência de preços associada, bem como as necessidades inerentes ao processo e à produção, tornam vital a utilização de ferramentas de simulação para apoiar decisões relacionadas com o design de projeto e o processo. A utilização sistemática da experimentação e otimização virtuais altera a metodologia de simulação, que passa de uma ferramenta de confirmação de decisões já tomadas para uma ferramenta de previsão que permite ao fundidor definir pontos de funcionamento ótimos e janelas de processo robustas para todo o percurso de manufatura antes de ser feita a primeira amostra.

Dr.-Ing. Max Peymandar, Diretor de Produto, B. Eng. Daniel Schmidt, Engenheiro de Aplicação, MAGMA Gießereitechnologie e Dr.-Ing. Jörg C. Sturm, Dr. E. Flender Holding, Aachen

Referências:

- [1] *Giesserei Special (2020), [Nr. 01], pp. 60-73.*
- [2] *MAGMASOFT® é um produto da MAGMA GmbH, Aachen, Alemanha. MAGMASOFT® e Autonomous Engineering são marcas registadas da MAGMA GmbH e da MAGMA Inc., Schaumburg, IL. Schaumburg, IL. EUA, respetivamente.*
- [3] *Sturm, J.C., Optimierung des Feingussverfahrens durch den Einsatz moderner Simulationstechniken, Dissertação, VDI Verlag, 1990.*
- [4] *Xu, Mingzhi, Characterization of investment shell thermal properties (2015). Dissertações de Doutorado. 2423. https://scholarsmine.mst.edu/doctoral_dissertations/2423.*
- [5] *Fainberg, J, Schaefer; W.: Um modelo rápido e eficiente de traçado de raios paralelo adaptativo, baseado em radiação de superfície termicamente acoplada em processos de fundição e tratamento térmico, em Proceedings of MCWASP 2015 (21.-26. junho 2015, Hyogo, Japão).*
- [6] *Giesserei Special (2018), [Nr. 02], S. 56-71.*
- [7] *Série de webinars sobre fundição por cera perdida, 4 keys to unlocking a more robust investment casting process, MAGMA Foundry Technologies, Inc., Episódio 1-4, 09 & 10/2020. <https://www.magmasoft.com/en/>.*
- [8] *Mansfeld, T., Simulation von Feingusswachsen, 22-23. Okt. 2015, Bad Dürkheim, Alemanha.*
- [9] *SIGMASOFT® é um produto da SIGMA Engineering GmbH, Aachen, Alemanha. SIGMASOFT® é uma marca registada da MAGMA GmbH.*
- [10] *Schneider, M., Meeting future challenges in shape casting process simulation, Modeling of Casting, Welding, and Advanced Solidification Processes, TMS 2009.*
- [11] *Giesserei 102 (2015), [N. 6], S. 86-100.*
- [12] *Cortesia da ProTech, Tailândia.*