



Análise integrada do uso de resfriadores na fundição de placa em ferro fundido alto cromo: efeitos em rechupe, dureza e microestrutura via simulação computacional e DOE

Ricardo Eichelberger Jungblut¹

Gabriel Borges Cechinel²

Rafael Bernaldo³

Renan Copetti Menegaro⁴

Resumo: Peças fundidas em ferro fundido alto cromo são amplamente empregadas em ambientes de desgaste severo, como na indústria de mineração, cimenteira e siderúrgica, devido à sua elevada dureza e excelente resistência à abrasão. Este trabalho investiga os efeitos do uso de resfriadores metálicos no molde sobre a microestrutura, a dureza e a formação de rechupes em peças fundidas conforme a norma ASTM A532 Classe III Tipo A. Para a definição da geometria dos resfriadores, foi adotada a metodologia estatística de planejamento de experimentos (DoE), permitindo a análise de 525 combinações geométricas distintas com suporte de simulação computacional. Foram fundidas quatro amostras, duas com e duas sem resfriadores, submetidas a ensaios metalográficos, de dureza e microdureza. Os resultados demonstraram que os resfriadores atuam como agentes de refino microestrutural, promovendo um aumento de dureza de até 100 HB, sem alteração significativa das fases predominantes, austenita e carbonetos do tipo M7C3, além de reduzir consideravelmente a presença de porosidades internas. A aplicação do DoE foi essencial para identificar, de forma sistemática e estatisticamente robusta, as dimensões mais eficazes dos resfriadores, destacando a largura como o parâmetro de maior influência na mitigação de defeitos. Como resultado, espera-se que as peças fundidas com resfriadores apresentem desempenho superior em aplicações abrasivas, com maior vida útil e menor necessidade de substituições em campo, contribuindo diretamente para a eficiência operacional e a confiabilidade dos equipamentos.

Palavras-chave: Ferro Fundido Alto Cromo. Microestrutura. Rechupe. Resfriador. DoE.

¹ Mestrando do PPG em Metalurgia UNISATC. E-mail: ricardo_jungblut@hotmail.com

² Mestrando do PPG em Metalurgia UNISATC. E-mail: eng.gabrielcechinel@gmail.com

³ Mestrando do PPG em Metalurgia UNISATC. E-mail: rafael.bernaldo@gmail.com

⁴ Mestrando do PPG em Metalurgia UNISATC. E-mail: eng.menegaro@gmail.com



1 INTRODUÇÃO

Peças em ferro fundido branco alto cromo são amplamente utilizadas em aplicações industriais de alta severidade, como revestimentos de moinhos, rotores de dragagem, cilindros de laminação e sistemas de moagem de carvão, devido à sua elevada dureza e excelente resistência ao desgaste abrasivo. Essas exigências operacionais normalmente requerem tratamentos térmicos, como a têmpera, para transformar a matriz austenítica bruta de fundição em martensita, fase que confere maior dureza mecânica ao material. Contudo, os avanços na engenharia de fundição têm promovido alternativas que buscam otimizar as propriedades mecânicas e metalúrgicas diretamente no estado bruto, reduzindo a necessidade de tratamentos térmicos. Dentre essas soluções, destacam-se o controle da taxa de resfriamento e o uso de resfriadores metálicos no molde, elementos que influenciam diretamente na formação microestrutural e na mitigação de defeitos internos, como os rechupes.

Neste contexto, este trabalho investiga os efeitos do uso de resfriadores metálicos sobre a microestrutura, dureza e presença de rechupes em peças fundidas em ferro branco alto cromo, por meio de uma abordagem integrada entre experimentação prática e simulação computacional com o software Magmasoft. Além da análise experimental, a metodologia estatística de planejamento de experimentos (DoE) foi aplicada em conjunto com a simulação, permitindo a avaliação sistemática da influência das variáveis geométricas dos resfriadores (largura, profundidade e altura) na formação de porosidades internas. A abordagem adotada possibilitou a identificação de geometrias otimizadas que resultaram em maior qualidade metalúrgica, redução de defeitos e ganho em eficiência produtiva, sem acréscimos significativos de tempo ou custo de fabricação.

2 FERRO FUNDIDO BRANCO ALTO CROMO E FUNDIÇÃO

Neste capítulo será abordado as características do ferro fundido branco alto cromo, como sua microestrutura e efeito de sua composição química, e, também, o conceito de desgaste. Ao final, também será abordado o uso da simulação computacional e ferramenta de estatística (DoE)



2.1 FERRO FUNDIDO BRANCO ALTO CROMO

Os ferros fundidos alto cromo são ligas do sistema ternário Fe-Cr-C, contendo entre 11 e 30% de cromo e de 1,8 a 3,6% de carbono, podendo também incluir elementos como molibdênio, cobre, níquel e manganês. Essas ligas são amplamente utilizadas em aplicações que exigem alta resistência ao desgaste abrasivo, devido à presença significativa de carbonetos que representam de 10 a 40% da microestrutura, enquanto a matriz, geralmente mais tenaz, compõe os 60 a 90% restantes. A localização do carbono na forma de carbonetos contribui diretamente para a excelente resistência ao desgaste dessas ligas (GHOMASHCHI et al., 1996).

A maioria das ligas comerciais classificadas pela norma ASTM A532 são hipoeutéticas, com teor de carbono inferior a 4,3%, e solidificam inicialmente pela formação de dendritas de austenita (fase γ). À medida que a solidificação avança, o líquido residual se enriquece em cromo e carbono até atingir o ponto eutético, promovendo a formação de colônias eutéticas compostas por austenita e carbonetos do tipo M_7C_3 (Chung et al., 2013). Assim, a microestrutura final apresenta uma rede de carbonetos entre as dendritas, sendo esses carbonetos metálicos formados principalmente por ferro e cromo (Laird II et al., 1997).

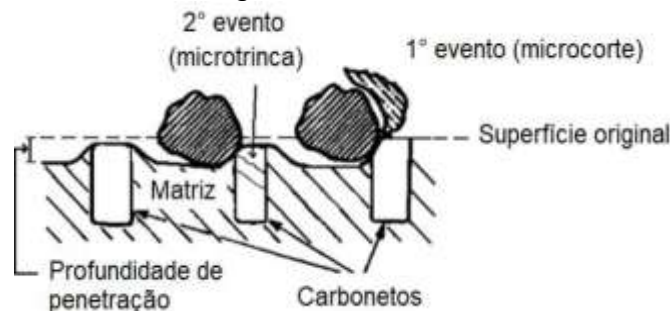
Após a solidificação, é comum a realização de tratamento térmico com o objetivo de transformar a matriz austenítica em martensítica, elevando significativamente a dureza da peça. Esse tratamento ocorre entre 800 e 1100 °C, promovendo a precipitação de carbonetos secundários no estado sólido. Esse processo reduz os teores de carbono e elementos de liga na matriz, aumentando a temperatura de início da transformação martensítica, o que melhora ainda mais as propriedades mecânicas da liga (Rohrig et al., 2018).

2.1. DESGASTE

O desgaste é a perda progressiva de material entre superfícies em movimento relativo, ocorrendo por deslizamento ou impacto de partículas duras (Shipway et al., 2017). O desgaste por deslizamento adesivo resulta da formação e ruptura de microjunções sob carga, removendo material da superfície mais fraca (Gregolin, 1990). Já o desgaste por partículas duras pode ser erosivo, causado por impacto direto, ou abrasivo, que ocorre em dois ou três corpos, conforme Zum Gahr

(1987). No desgaste abrasivo, a dureza e a tenacidade à fratura influenciam o mecanismo, que pode ser deformação plástica ou fratura frágil, sendo a severidade dependente da dureza relativa entre matriz, carbonetos e abrasivo, como observado em ferro fundido branco alto cromo, podendo ser visto na Figura 1 (Pitaude, 2009).

Figura 1: Mecanismo de desgaste em ferro fundido branco alto cromo.



Fonte: Pitaude (2009)

2.2. PROJETO DE MASSALOTES

Durante a solidificação de peças fundidas, ocorrem contrações volumétricas nas fases líquida, de solidificação e sólida, sendo as duas primeiras compensadas por massalotes. Esses elementos funcionam como reservatórios de metal líquido posicionados externamente à peça, alimentando-a durante o resfriamento para evitar defeitos, como o rechupe, e direcionando tais imperfeições para regiões posteriormente removidas (Baldam; Vieira, 2014). Em peças de geometria complexa, um único massalote pode não ser suficiente, sendo necessária a aplicação combinada de múltiplos massalotes e de técnicas auxiliares, como a solidificação dirigida, resfriadores e luvas exotérmicas, de modo a assegurar a integridade e a qualidade final do fundido. A eficiência do sistema de alimentação está diretamente relacionada ao controle do sentido de solidificação, devendo o massalote solidificar por último para cumprir adequadamente sua função. Para isso, ajusta-se o regime térmico do conjunto peça/massalote por meio de alterações geométricas, do uso de luvas exotérmicas e da aplicação de resfriadores metálicos — geralmente de aço, ferro fundido, alumínio ou, preferencialmente, cobre, devido à sua elevada difusividade térmica. A eficácia do resfriador depende de fatores como dimensões e área de contato, garantindo uma troca de calor contínua e eficiente (Baldam; Vieira, 2014).



2.3. DESIGN OF EXPERIMENTS (DoE)

O Design of Experiments (DoE) é uma metodologia estatística que permite analisar simultaneamente os efeitos de múltiplas variáveis e suas interações sobre um ou mais resultados, oferecendo uma compreensão mais abrangente dos fenômenos do que o método tradicional de um fator por vez (OFAT) (Montgomery, 2017). Na fundição, o DoE é amplamente empregado para otimizar parâmetros como composição química, geometria de massalotes e taxas de enchimento e resfriamento, reduzindo significativamente a necessidade de testes físicos e proporcionando modelos preditivos robustos que economizam tempo e recursos (Laird II et al., 2000).

2.4. SIMULADOR DE FUNDIÇÃO

O Magmasoft é um software de simulação que permite prever o comportamento do metal líquido durante o processo de fundição, modelando fenômenos como escoamento, transferência de calor e formação de defeitos por meio de métodos numéricos, como elementos finitos e diferenças finitas. Ele possibilita análises detalhadas do desempenho de moldes, dimensionamento de massalotes e posicionamento de resfriadores (Magma GmbH, 2022). Integrado ao Design of Experiments (DoE), o Magmasoft permite a realização de experimentos virtuais e a construção de modelos preditivos e superfícies de resposta, otimizando o projeto de fundição, reduzindo custos e evitando retrabalhos (Davis, 1996).

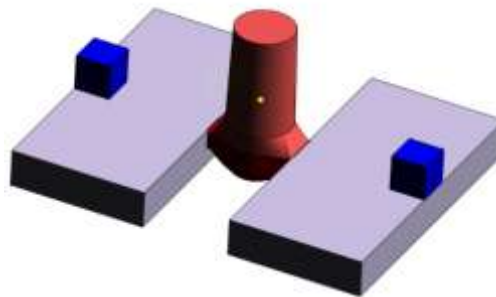
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL E ANÁLISE DE DADOS

Neste capítulo serão abordados os materiais e métodos que foram utilizados para se chegar à análise de dados. Os dois estão intercalados e serão discutidos de maneira conjunta a seguir, para facilitar o entendimento do processo desenvolvido.

3.1. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

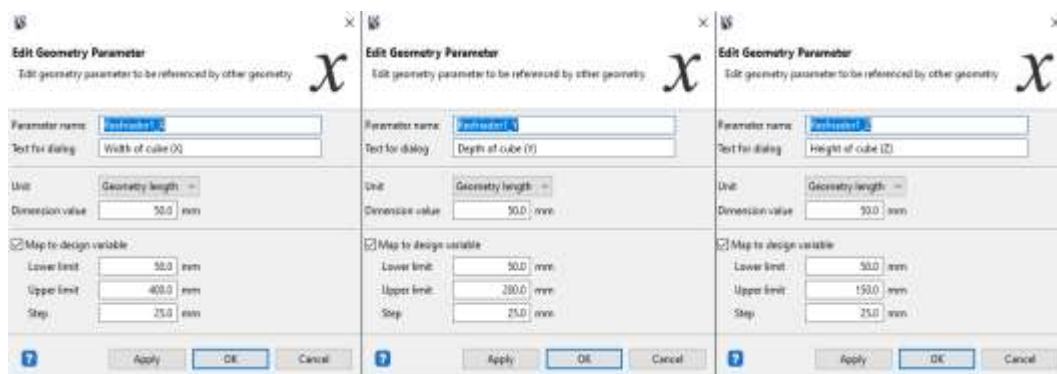
A partir da definição inicial do posicionamento de resfriadores, podendo ser visto na Figura 2, foi realizada uma matriz experimental com 525 combinações distintas de largura (X), profundidade (Y) e altura (Z) destes, conforme a Figura 3, e na sequência foi gerado dados de saída a partir de simulações térmicas realizadas no software Magmasoft, tendo como a variável de resposta a intensidade de rechupe (%). Também foi realizada uma simulação, para fim comparativo, sem a presença de resfriadores.

Figura 2: Geometria da placa com resfriadores.



Fonte: Do autor (2025)

Figura 3: Parametrização das dimensões dos resfriadores com seus passos de simulação.

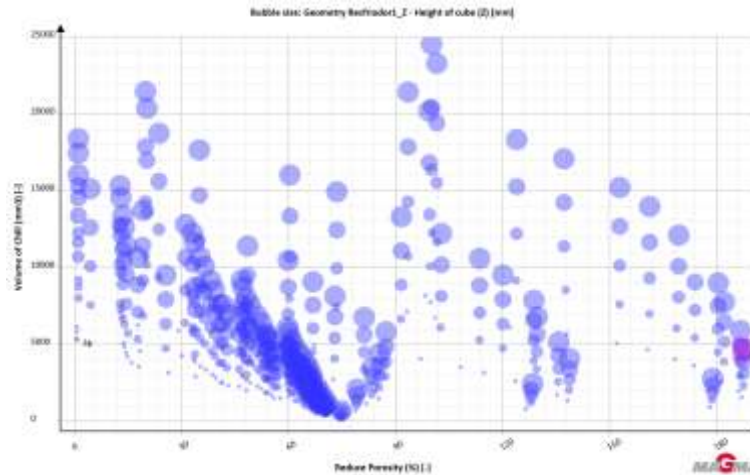


Fonte: Do Autor (2025)

Os dados obtidos revelaram que não existe uma relação linear entre o volume total do resfriador e a redução do rechupe, contrariando a hipótese inicial de que maiores volumes resultariam automaticamente em melhores resultados. A partir do cruzamento dos fatores no DoE, foi possível identificar zonas de ótimo desempenho em que o rechupe foi minimizado com geometrias relativamente

compactas, evitando o uso desnecessário de grandes volumes de material para os resfriadores. Essa visualização foi facilitada por meio do Gráfico 1, que permite observar tendências e identificar regiões críticas do espaço experimental.

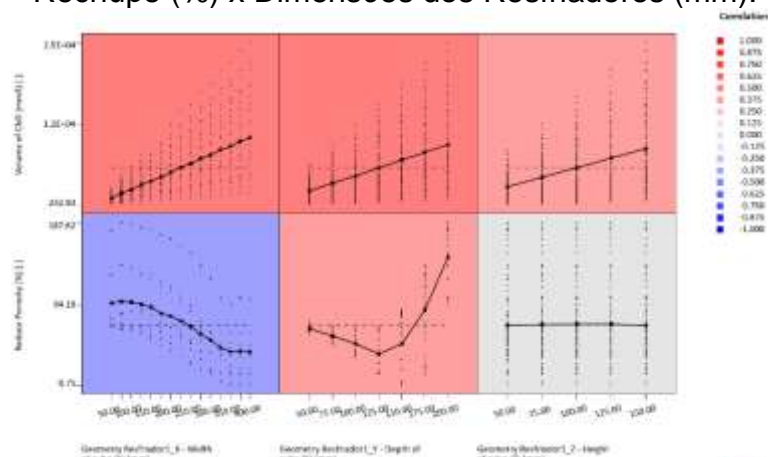
Gráfico1: Volume do Resfriador (mm³) x Rechupe (%) x Altura (Z) do resfriador.



Fonte: Do Autor (2025)

A análise do Gráfico 2 demonstra que a largura (X) do resfriador possui a maior influência na redução da porosidade, sendo diretamente proporcional ao desempenho térmico no combate ao defeito. Por outro lado, a altura (Z) mostrou-se praticamente neutra dentro da faixa analisada (50 a 150 mm), enquanto a profundidade (Y) apresentou um comportamento não linear, com valores extremos sendo menos eficazes.

Gráfico 2: Volume do Resfriador (mm³) x Dimensões dos Resfriadores (mm) e Rechupe (%) x Dimensões dos Resfriadores (mm).

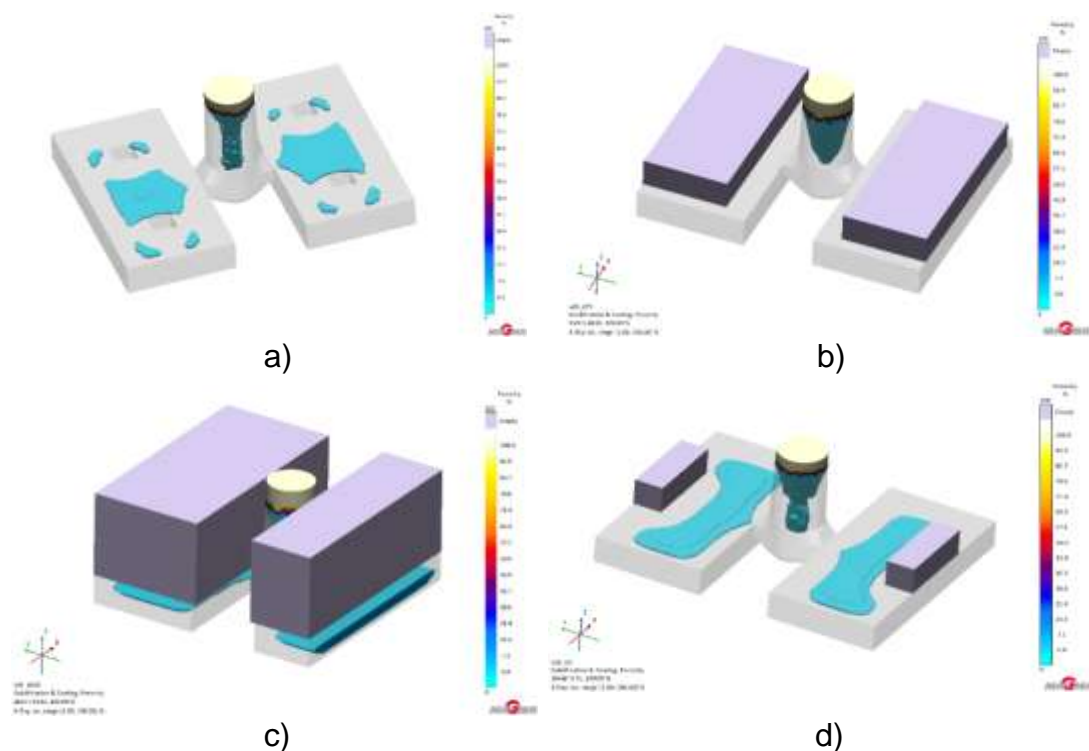


Fonte: Do Autor (2025)

3.2. RECHUPE

A Figura 4 (a) representa a condição de rechupe da peça sem o uso de resfriador e a Figura 4 (b), (c) e (d) carrega os resultados de rechupe gerados pela combinação de número 73 (400x150x50mm), 5 (150x50x50mm) e 525 (400x200x150mm), respectivamente. Na simulação sem a utilização de resfriadores, observa-se regiões críticas com porosidades internas concentradas, predominantemente, no núcleo da peça. A introdução de resfriadores otimizados, por sua vez, possibilitou a eliminação de tais defeitos na peça, deslocando os defeitos para somente o interior do massalote, como resultado de um gradiente térmico mais favorável à solidificação direcional. No entanto, observou-se também que o uso de resfriadores mal dimensionados, principalmente com geometrias excessivas ou mal posicionadas, pode agravar a formação de porosidades, promovendo intensidades de rechupe superiores às verificadas nas condições sem resfriador.

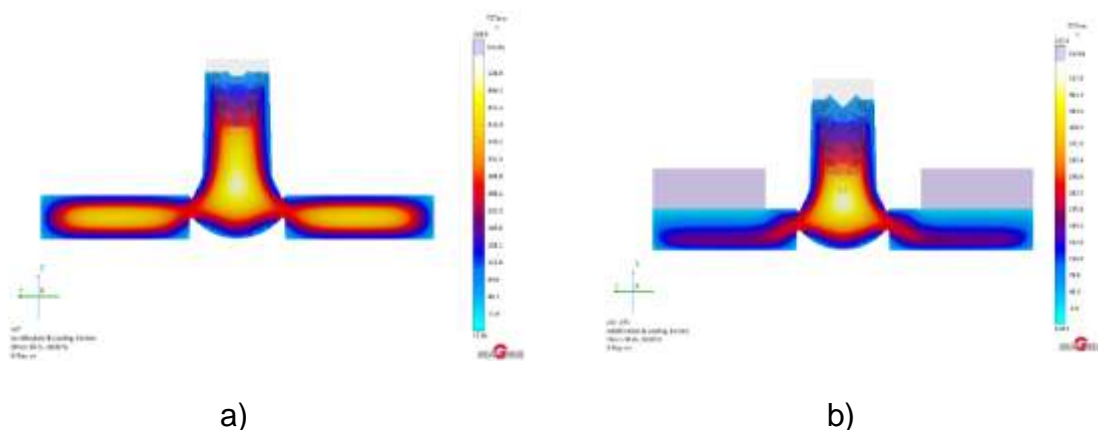
Figura 4: Tendência a formação de rechupe: a) Sem resfriador b) Resfriador 400x150x50mm; c) 150x50x50mm; e d) 400x200x150mm



Fonte: Do Autor (2025)

O gradiente térmico direcional pode ser visto através das linhas de solidificação observadas na Figura 5, as quais exibem o resultado do FSTime da simulação, que corresponde as linhas de solidificação análogas ao tempo. Enquanto que a solidificação da placa sem o resfriador fica concentrada e direcionada, em grande parte, no centro da peça e sem o massalote conseguir suprir essa contração de volume, o resfriador adotado acelera o início da solidificação da chapa pelas extremidades e direciona toda solidificação em direção ao massalote, ou seja, toda contração de volume está situada no massalote e não na peça.

Figura 5: Linhas de solidificação: a) Placa sem resfriador; b) Placa com resfriador 400x150x50mm.



Fonte: Do Autor (2025)

3.3. FUNDIÇÃO DAS AMOSTRAS

Foi realizada a fabricação de 2 placas sem resfriadores e outras 2 com o resfriador da combinação 73, pois apresentou máximo resultado via simulação, menor intensidade de rechupe com menor tamanho de resfriador. Como pode ser visto na Tabela 1, a composição química da fornada de fundição, analisada com auxílio de um espectrômetro de emissão óptica do fabricante BSW, se enquadrava dentro da faixa solicitada na norma ASTM A532 Classe III Tipo A. Após o preenchimento do molde, foi aguardado 28 horas para desmoldagem das peças, tempo estimado via software de simulação, sendo esse tempo necessário para atingir a temperatura ambiente de 25°C.



Tabela 1: Composição química (% em massa) analisada do banho líquido de metal.

C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	P	S
2,70	0,80	0,89	0,50	26,5	0,08	0,03	0,02	0,02

Fonte: Do Autor (2025)

3.4. DUREZA

Após a fundição e desmoldagem das peças, com auxílio do durômetro de bancada DK-3000 da empresa Duroking com esfera de metal duro, foi realizado ensaio de dureza em todas peças e os resultados evidenciados abaixo na Tabela 2.

Tabela 2: Durezas medidas nas peças (amostras).

	Indentação 1	Indentação 2	Indentação 3
Peça 1 sem resfriador	444 HB	461 HB	461 HB
Peça 2 sem resfriador	429 HB	444 HB	444 HB
Peça 1 com resfriador	578 HB	555 HB	555 HB
Peça 2 com resfriador	555 HB	534 HB	555 HB

Fonte: Do Autor (2025)

Os ensaios de dureza evidenciaram um aumento de dureza de até 100 HB entre a superfície das peças com e sem resfriador. O entendimento deste aumento de dureza somente poderá ser interpretado analisando as microestruturas de ambas amostras.

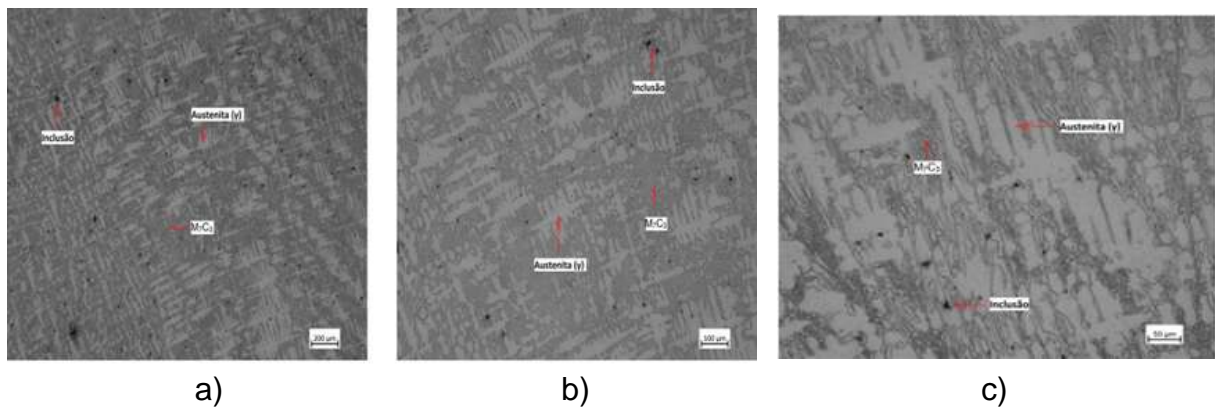
3.5. MICROESTRUTURA:

Para realização de análise metalográfica, foi retirado pedaços de 20x20x20mm de cada chapa de amostra, sendo das amostras que foram fundidas com resfriador, as partes removidas foram da superfície de contato entre peça e resfriador.

Observando as microestruturas da Figura 6, percebe-se a fase da austenita em forma de dendritas (fase clara), onde essa é a primeira a se formar durante o início de sua solidificação. Ao decorrer do decréscimo de temperatura e

ao passar da solidificação, o líquido começa a enriquecer em carbono até atingir a composição eutética, onde, neste ponto, ocorre o crescimento cooperativo de austenita e carbonetos do tipo M_7C_3 (fase escura). Observando a Figura 6 (c), nota-se que a fase eutética (ledeburita) apresenta-se em forma de bastões e as dendritas de austenita se apresentam totalmente orientadas segundo uma determinada orientação cristalina, implicando em baixa intensidade de sítios para precipitação de carbonetos.

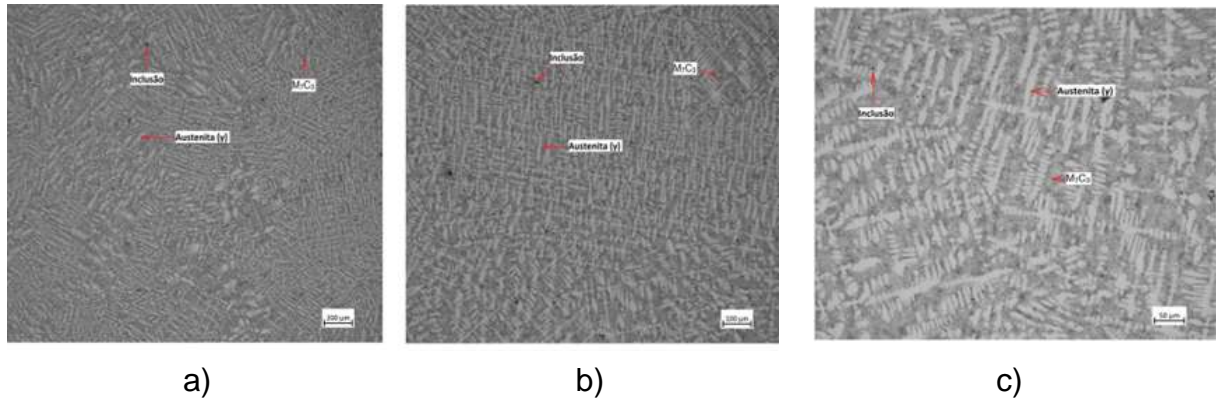
Figura 6: Microestruturas da chapa sem uso de resfriador: a) Aumento de 20 vezes; Aumento de 100 vezes; c) Aumento de 200 vezes.



Fonte: Do Autor (2025)

Igualmente encontrado na microestrutura da placa desgaste sem o uso de resfriador, podemos ver por meio da Figura 7, as fases presentes de dendritas de austenita e carbonetos do tipo M_7C_3 ; contudo, as diferenças entre as duas micrografias se encontram em relação ao espaçamento interdendrítico menor, e nestes espaços a fase M_7C_3 apresenta-se em forma de placas e não mais bastões. Esse refinamento da microestrutura se dá exclusivamente pela maior taxa de resfriamento, o que favorece a nucleação e não mais o crescimento.

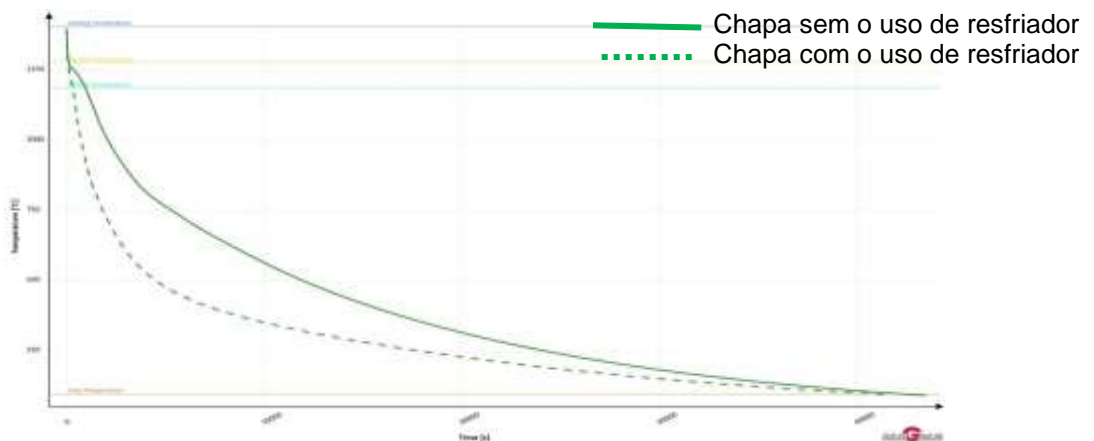
Figura 7: Microestruturas da chapa sem uso de resfriador: a) Aumento de 20 vezes; b) Aumento de 100 vezes; c) Aumento de 200 vezes.



Fonte: Do Autor (2025)

Apesar das duas amostras sofrerem taxas de resfriamento distintas, podendo ser vista no Gráfico 3, obtida através de simulação computacional, as fases presentes são as mesmas, fato que se dá aos elevados teores de elementos de liga nela dissolvidos.

Gráfico 3: Taxa de resfriamento das amostras (Temperatura (°C) x Tempo (s)).



Fonte: Do Autor (2025)

3.6. MICRODUREZA

Para caracterização da dureza das fases presentes nas amostras fundidas, com e sem resfriador, foi utilizado um microdurômetro HMV da fabricante Shimadzu. Na tabela 3 comparando as durezas da fase austenítica de ambas amostras, não se percebe uma diferença significativa entre elas, o que é facilmente explicado, visto que estamos analisando a mesma fase com composição química semelhante, somente

diferenciando entre elas o seu tamanho.

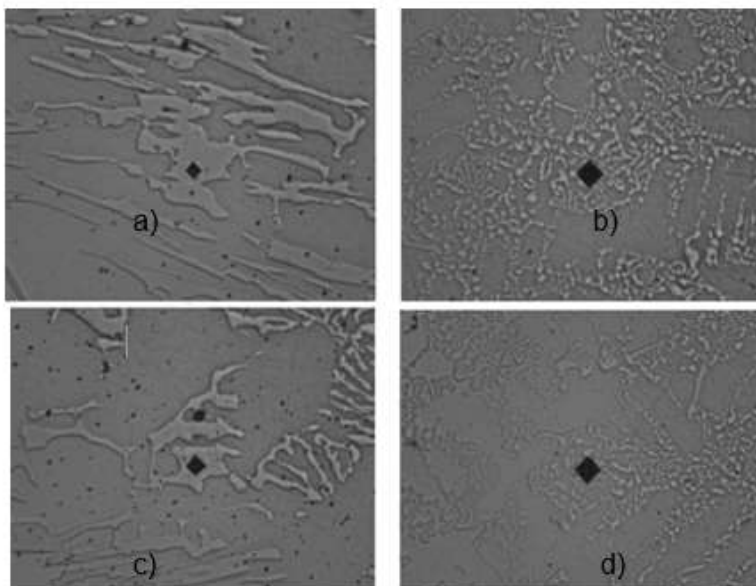
Ao analisar as durezas encontradas na fase M_7C_3 se nota uma discrepância grande entre as duas amostras, visto que a dureza medida com durômetro das chapas de desgaste com uso de resfriador apresentou uma dureza mais elevada quando contrastada a chapa sem resfriador. Essa diferença entre as durezas das fases é facilmente demonstrada com auxílio da Figura 8, dado que a medição com a esfera na amostra sem o resfriador, devido ao tamanho desta fase, consegue coincidir 100% sobre a superfície deste, enquanto que na amostra sem o resfriador, devido ao refinamento, a indentação abrange não somente a fase M_7C_3 , mas também a austenita adjacente.

Tabela 3: Durezas medidas das fases através de microdurômetro.

	Indentação 1 (Austenita)	Indentação 2 (Austenita)	Indentação 3 (Austenita)	Indentação 1 (M_7C_3)	Indentação 2 (M_7C_3)	Indentação 3 (M_7C_3)
Sem resfriador	459 HV	418 HV	364 HV	1361 HV	1317 HV	1095 HV
Com resfriador	475 HV	329 HV	434 HV	750 HV	731 HV	834 HV

Fonte: Autor (2025)

Figura 8: Indentações realizadas com microdurômetro: a) e c) Medição da dureza dos carbonetos do tipo M_7C_3 na amostra da chapa sem o uso de resfriador; b) e d) Medição da dureza da ledeburita na amostra da chapa sem o uso de resfriador.



Fonte: Do Autor (2025)



4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração da simulação computacional via Magmasoft com a metodologia estatística DoE (Design of Experiments) demonstrou alta eficiência na otimização da fundição de ferro fundido alto cromo. A análise de 525 combinações geométricas de resfriadores identificou a largura (X) como variável mais significativa na redução de rechupes, com a profundidade (Y) apresentando comportamento não linear e a altura (Z) efeito marginal. O uso do DoE reduziu substancialmente o número de simulações e ensaios físicos, além de proporcionar melhor compreensão das interações entre variáveis, permitindo decisões mais precisas no projeto de alimentação.

Embora a variação na taxa de resfriamento, promovida por resfriadores metálicos, não tenha alterado significativamente as fases constituintes devido à estabilidade térmica da matriz austenítica, conferida pelos teores elevados de cromo e carbono, houve impacto direto no refino microestrutural. O aumento da extração térmica favoreceu a nucleação sobre o crescimento das fases, resultando em menor espaçamento interdendrítico e carbonetos M7C3 mais finos, elevando a dureza média de 450 HB para 550 HB. Essa melhoria está associada à maior densidade e melhor distribuição dos carbonetos, que atuam como barreiras à deformação plástica, potencializando o desempenho em desgaste abrasivo.

Os resultados evidenciam o potencial dos resfriadores como ferramenta de otimização metalúrgica e geométrica, com benefícios diretos na integridade do fundido e na vida útil de componentes. Recomenda-se que estudos futuros incluam ensaios de desgaste abrasivo conforme a norma ASTM G65, comparando peças brutas de fusão com e sem resfriadores, além da avaliação de tratamentos térmicos para obtenção de matriz martensítica, visando maximizar a resistência ao desgaste e reduzir custos de manutenção e paradas não programadas.

REFERÊNCIAS

BALDAM, R.; VIEIRA, L. C. **Fundição: Tecnologia e Projetos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2014.

CHUNG, Y. W.; XIE, Z. **Abrasive wear of high chromium cast irons**. Materials



Science and Engineering: A, v. 574, p. 112-119, 2013.

DAVIS, J. R. **Cast Irons**. 2. ed. Ohio: ASM International, 1996.

GHOMASHCHI, M. R.; JARRETT, N. **Wear resistance of high chromium white cast irons**. Wear, v. 192, p. 25-33, 1996.

GREGOLIN, W. R. **Desgaste por abrasão em aços ferramenta**. Metalurgia e Materiais, v. 46, n. 392, p. 777-781, 1990.

LAIRD II, G.; GUNDLACH, R. B. **The microstructure and properties of high-chromium cast irons**. AFS Transactions, v. 105, p. 1-12, 1997.

MAGMA GmbH. **MAGMASOFT® User Manual**. Aachen, Germany: MAGMA GmbH, 2022.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 9. ed. New York: Wiley, 2017.

PITAÚDE, H. L. **Estudo do desgaste abrasivo de ferros fundidos brancos alto cromo**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 2009.

ROHRIG, K. et al. **High Chromium Cast Irons**. In: ASM Handbook, Volume 1: Castings. Ohio: ASM International, 2018.

SHIPWAY, P. H.; STACEY, D. A. **Wear of Materials**. In: Tribology: A Treatise on Friction, Lubrication, and Wear. v. 1, p. 23-45. Ohio: ASM International, 2017.

ZUM GAHR, K. H. **Microstructure and wear of materials**. Amsterdam: Elsevier, 1987.