

Relatório Final

**TRANSFORMAÇÕES DE FASES EM AÇOS INOXIDÁVEIS
E SUA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

Proponente: Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco

rodrmagn@fei.edu.br

Departamento de Engenharia de Materiais

Centro Universitário FEI

Fundação Educacional Inaciana Pe. Sabóia de Medeiros

Processo 302891/2020-0, da chamada CNPq 09/2020

RESUMO

Materiais de alto desempenho como os aços inoxidáveis, e particularmente os de aplicações que requerem a combinação de elevadas resistência mecânica, tenacidade e resistência a corrosão, precisam de grande controle microestrutural para garantir as propriedades desejadas. Além disso, sua utilização em produtos de variados formatos, que precisam ser conformados a quente e serem soldados, ou serem produzidos por processos de manufatura aditiva, impõe ciclos térmicos que podem gerar a formação de fases deletérias, comprometendo seu desempenho. Desse modo, a simulação computacional das transformações de fase controladas por difusão, como as trabalhadas nesta proposta de pesquisa, é ferramenta essencial para o projeto destes processos buscando a otimização de microestruturas e propriedades associadas. Por isso, o desenvolvimento de metodologias de simulação das transformações de fase em DICTRA[®] para estes aços, e sua validação experimental, foi um dos resultados buscados deste projeto. Foco principal esteve centrado nas transformações sob resfriamentos contínuos, desafio importante para entendimento dos ciclos térmicos que diferentes geometrias das peças produzidas com estes materiais podem sofrer. Com o domínio destas simulações, a compreensão dos fenômenos associados a estas transformações foi facilitada, e a ferramenta de simulação computacional possibilita, na continuidade dos trabalhos, o projeto de novas ligas, nas quais a adição de elementos de ligas no modelo virtual pode retardar transformações por difusão indesejadas. Além disso, a previsão das transformações de fase permite o projeto de ciclos térmicos durante o processamento que otimizam as microestruturas e propriedades a estas associadas. Sem a necessidade de experimentos com muitas variáveis de processo envolvidas, o custo de desenvolvimento de novas ligas e novos processos é reduzido, e isto tem grande impacto econômico e tecnológico na cadeia produtiva que depende dos aços inoxidáveis de alto desempenho. Reforça-se o compromisso do proponente na formação de recursos humanos de qualidade na área de interesse desta proposta, sendo o impacto na sociedade desta proposta o maior legado de pesquisa: a formação de recursos humanos e a geração e disseminação de conhecimento em área estratégica a indústria brasileira.

Palavras-chave: aços inoxidáveis, transformação de fases, modelamento computacional, DICTRA.

COMPILAÇÃO DE METAS E RESULTADOS ATINGIDOS – PROJETO 2021-2024

As atividades de pesquisa do proponente no triênio 2021-2024, durante vigência da bolsa de produtividade em pesquisa nível 2 (PQ2), processo 302891/2020-0, e em continuidade das atividades de pesquisa que se desenvolvem desde a primeira concessão de bolsa PQ, em 2011, buscaram o estudo das transformações de fase passíveis de ocorrer em aços inoxidáveis, permitindo o controle e a simulação computacional destas transformações, buscando-se o controle das variáveis de processo que levam a formação de microestruturas específicas. Além de aços inoxidáveis, o estudo das simulações computacionais usando os softwares ThermoCalc[®] e DICTRA[®], permitiram contribuições para outros sistemas metalúrgicos importantes, gerando no período 2020-2023, apesar das dificuldades impostas pelo período de pandemia da COVID-19, 10 publicações em periódicos de seletiva política editorial ⁽¹⁻¹⁰⁾, 9 trabalhos em congressos ⁽¹¹⁻¹⁹⁾, 5 orientações de mestrado ⁽²⁰⁻²⁴⁾, duas iniciações científicas ^(25,26) e 4 trabalhos de conclusão de curso de engenharia de materiais ⁽²⁷⁻³⁰⁾. O conhecimento acumulado pelo grupo de pesquisa coordenado pelo proponente desta proposta inclusive permitiu a nucleação de novos temas de importância tecnológica, como trabalhos em manufatura aditiva ^(20, 27, 30), em que a gênese do material manufaturado depende fortemente das transformações de fase durante o processo produtivo.

Trabalhos iniciados no triênio 2021-2023 continuarão em desenvolvimento no próximo quadriênio (2024-2027) como dissertações de mestrado orientadas pelo proponente desta proposta, explorando as transformações de fase em aços inoxidáveis, particularmente sob resfriamento a partir das temperaturas usuais de processamento termomecânico ⁽³¹⁻³⁴⁾, já que pode ocorrer a formação de fases deletérias aos comportamentos mecânico e eletroquímico durante os resfriamentos de processo. Com o objetivo de utilizar os conhecimentos acumulados e abrir novas fronteiras de pesquisa, continuando linhas de pesquisas desenvolvidas de forma incipiente em anos anteriores ⁽³⁵⁻³⁷⁾, trabalhos envolvendo comportamento mecânico de compósitos de matriz termoplástica ⁽³⁸⁾, manufatura aditiva ⁽³⁹⁾, e transformação de fase em outros sistemas metálicos ⁽⁴⁰⁾ seguirão em desenvolvimento paralelamente à linha principal, de simulação computacional de transformação de fases em aços inoxidáveis.

A formação de fases ricas em Cr e Mo em aços inoxidáveis é deletéria principalmente à resistência a corrosão. Destaca-se a formação de carbonetos de Cr do tipo $M_{23}C_6$ e nitretos de Cr do tipo Cr_2N em aços com teores significativos dos intersticiais C e N. Outra preocupação é com a formação de fases sigma e chi em aços inoxidáveis de altos teores de Cr e Mo, especialmente os dúplex. Como consequência da formação destas fases deletérias, há a formação de regiões em suas adjacências empobrecidas em Cr e Mo, que se tornam susceptíveis a corrosão localizada ^(41, 42).

Há indícios na literatura ⁽⁴³⁻⁴⁵⁾ de que a resistência à corrosão por pite diminui com o aumento da fração volumétrica da fase sigma, e a explicação comum para tal ocorrência está relacionada à formação de áreas empobrecidas em Cr e Mo nas interfaces entre fase sigma e fases que constituem a matriz do aço, reduzindo a oferta de elementos formadores da película passiva responsável pela resistência a corrosão ⁽⁴⁶⁾. Perfis de

concentração de Cr e Mo nos limites de fase são de difícil determinação por microscopia eletrônica de varredura associada a espectroscopia de energia dispersiva (MEV-EDS) devido à resolução lateral insuficiente desta técnica, sendo a análise EDS em microscopia eletrônica de transmissão (MET-EDS), apesar de se mostrar uma mais técnica demorada e mais laboriosa, uma das únicas a possibilitar a visualização do empobrecimento em Cr e Mo nas interfaces de sigma com a matriz ⁽⁴⁶⁾.

O uso de simulações computacionais em DICTRA[®], que agregam as hipóteses de equilíbrio local em interfaces durante transformações de fase controladas por difusão, é apontada ⁽⁴⁷⁻⁴⁹⁾ como um caminho viável para a descrição da cinética de formação de fase sigma. Nestas simulações, há a possibilidade de descrição dos gradientes de composição de Cr e Mo nas interfaces entre fases durante transformações de fase controladas por difusão, e portanto de previsão do comportamento eletroquímico decorrente das transformações de fases.

Trabalhos publicados pelo grupo de pesquisa do proponente ^(50, 51) discutem a formação de regiões empobrecidas em Cr e Mo na vizinhança de fase sigma formada durante envelhecimento isotérmico de aço inoxidável dúplex, quantificando o gradiente de composição química através de simulações computacionais em DICTRA[®], como exemplifica a Figura 1.

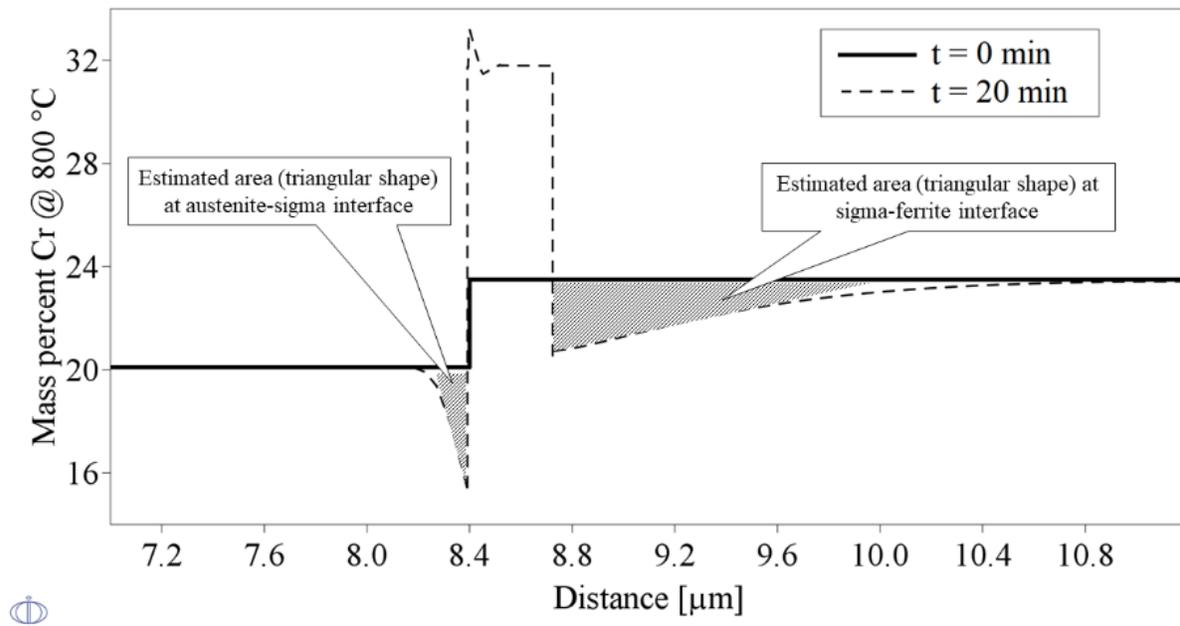


Figura 1. Simulação computacional do perfil de Cr nas interfaces entre austenita, sigma e ferrita de um aço inoxidável dúplex envelhecido a 800 °C por 20 min, e definição das áreas empobrecidas em Cr ⁽⁵⁰⁾.

No mesmo trabalho ⁽⁵⁰⁾, a somatória ponderada das áreas empobrecidas em Cr e Mo (usando a mesma ponderação entre Cr e Mo encontrada nas formulações usuais de cálculo de Pitting Resistant Equivalent Number

- PREN), chamada aqui de grau de empobrecimento, foi relacionada ao potencial de pite de diferentes amostras do mesmo aço, sujeitas a diferentes ciclos térmicos (Figura 2), mostrando que a previsão do comportamento eletroquímico deste aço quanto a corrosão localizada pode ser explicado, e previsto, através das simulações computacionais por DICTRA®.

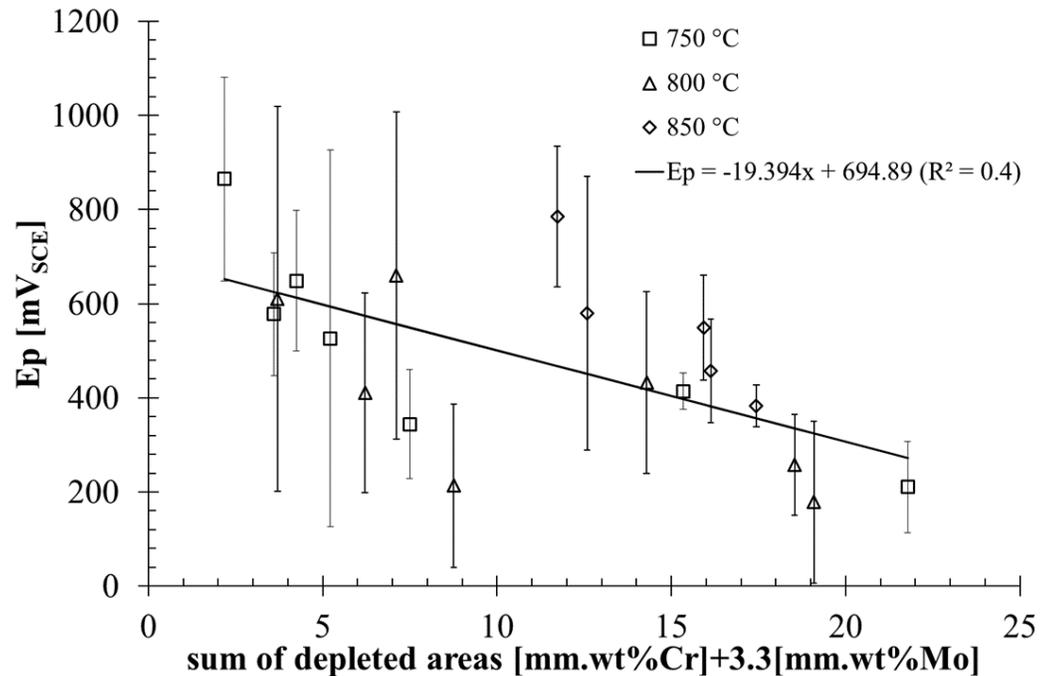


Figura 2. Potencial de pite (E_p) de um aço inoxidável dúplex envelhecido isotermicamente em diferentes condições em função do grau de empobrecimento em Cr e Mo das interfaces entre sigma, ferrita e austenita ⁽⁵⁰⁾.

Nota-se, portanto, que é possível estimar os gradientes de composição durante transformações de fases de aços inoxidáveis sujeitos a diferentes ciclos térmicos, e trabalho recente do grupo de pesquisa do proponente ⁽²¹⁾ avaliou a variação das frações volumétricas de ferrita e austenita, e a partição de elementos de liga entre estas fases, em aço inoxidável superdúplex submetido a ciclos térmicos semelhantes aos empregados em processamento termomecânico seguido de solubilização. Na Figura 3 apresenta-se a variação da fração de ferrita no ciclo proposto, e na Figura 4 nota-se a estimativa dos perfis de Cr nos diferentes tempos de tratamento simulados, mostrando que a partição de elementos de liga e a variação microestrutural se dá não apenas nos patamares isotérmicos de tratamento, mas também durante os ciclos de resfriamento impostos, além de mostrar a viabilidade de uso do DICTRA® neste tipo de simulação.

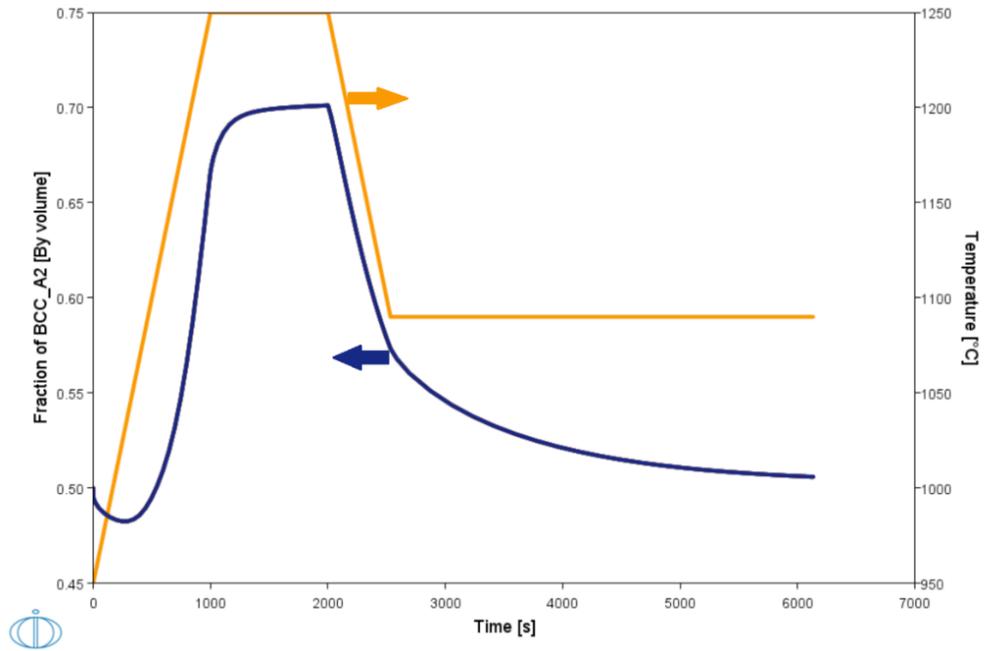


Figura 3. Evolução da fração volumétrica da ferrita (BCC_A2) durante o ciclo térmico apresentado num aço inoxidável superdúplex ⁽²¹⁾.

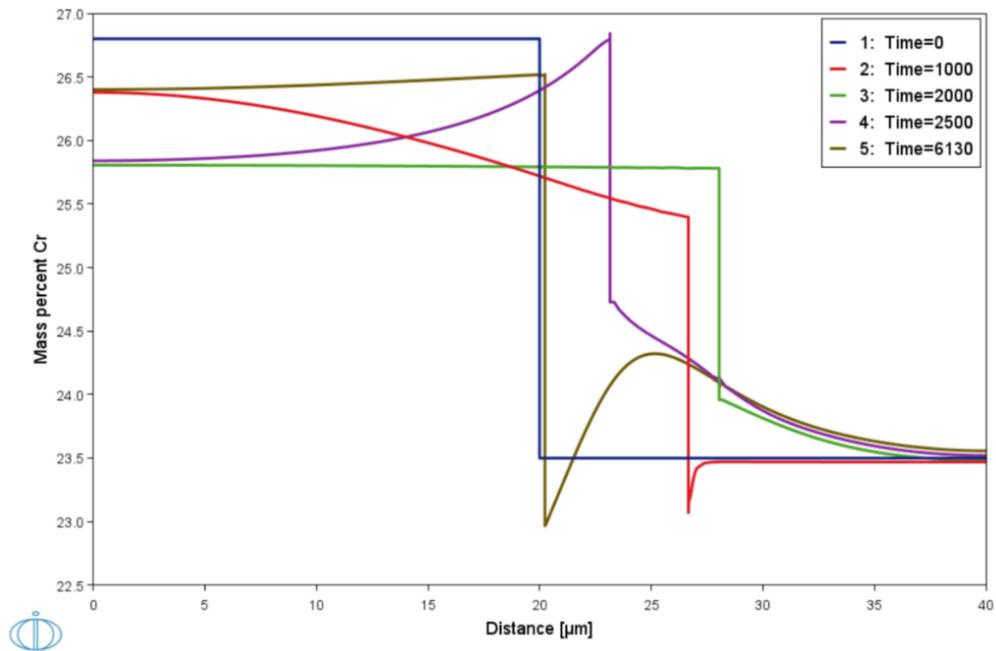


Figura 4. Perfis de cromo em diferentes momentos do ciclo térmico simulado para um aço superdúplex ⁽²¹⁾.

Além da partição de elementos de liga entre as fases ferrita e austenita ser determinante para o comportamento eletroquímico dos aços inoxidáveis dúplex, a possibilidade de formação de fases ricas em Cr e Mo, como a sigma, que levam ao empobrecimento nestes elementos das interfaces, diminuindo a resistência a corrosão, é outro fator possível de simulação por DICTRA[®], como demonstrado na Figura 2, e as simulações podem ajudar a prever as taxas de resfriamento críticas para evitar a formação destas fases deletérias, ou, na impossibilidade de evitar tal formação, de avaliar a extensão das regiões empobrecidas. Em trabalho de grande impacto decorrente das atividades do bolsista ⁽¹⁾, propôs-se metodologia de simulações computacionais de transformações de fase sob resfriamento contínuo, a partir da temperatura de solubilização de aço inoxidável dúplex, e validou-se tais simulações com dados de literatura. Além de ser possível estimar os gradientes de composição nas interfaces (como exemplifica a Figura 5), foi possível avaliar a influência de parâmetros de simulação (como o tamanho da célula computacional utilizada – Figura 6) e validar as simulações com dados de literatura (Figura 7).

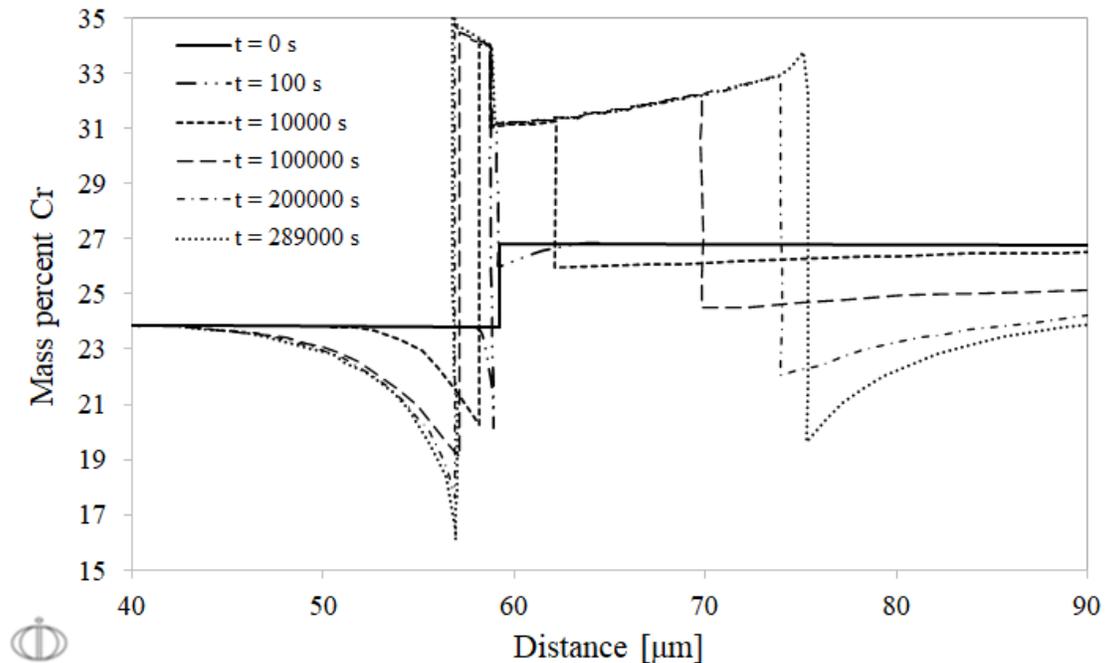


Figura 5. Perfis de cromo em diferentes momentos do resfriamento a partir da temperatura de solubilização de um aço dúplex a 0,001 °C/s ⁽¹⁾.

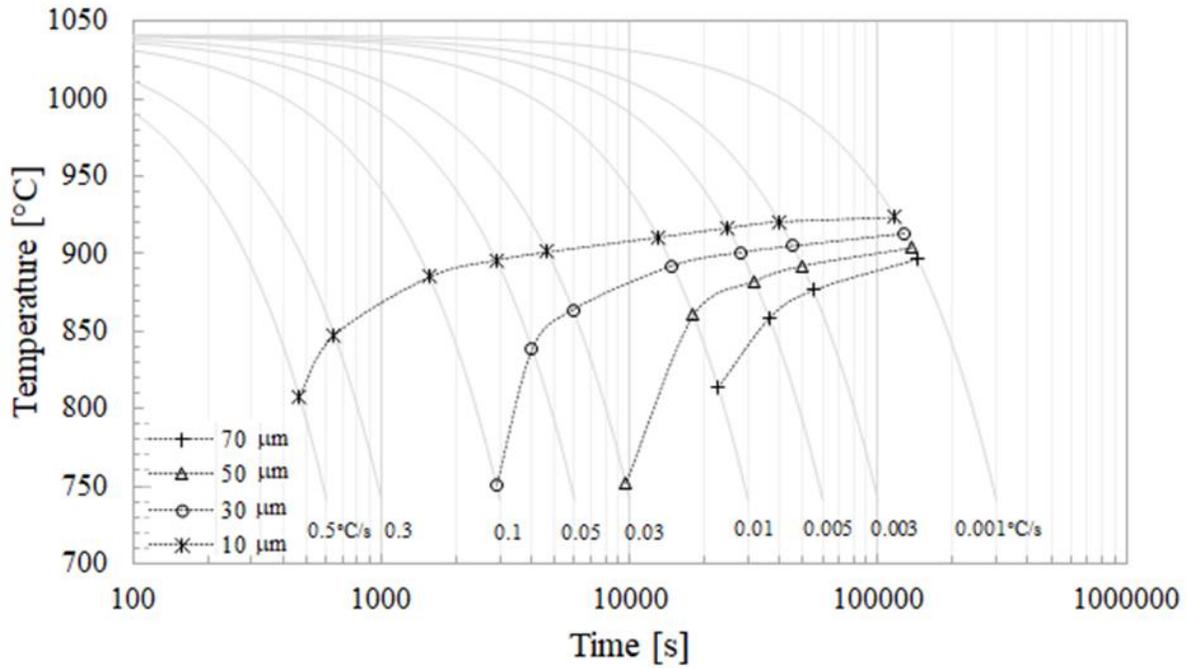


Figura 6. Curvas de transformação sob resfriamento contínuo de um aço inoxidável dúplex para 1% vol de fase sigma para diferentes tamanhos iniciais de ferrita ou austenita na célula computacional ⁽¹⁾.

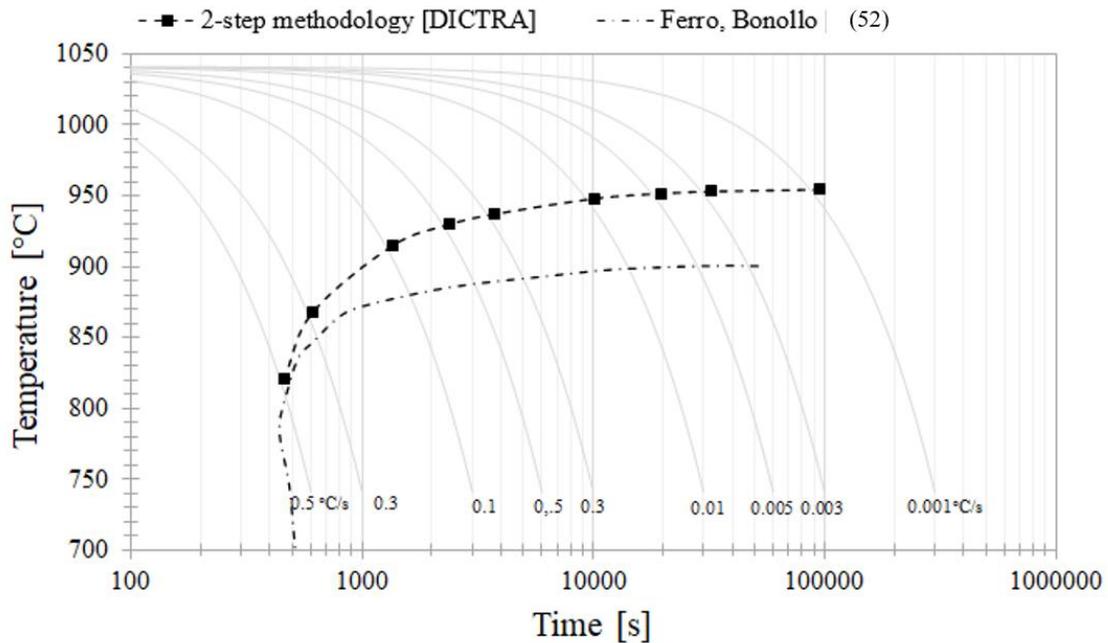


Figura 7. Curvas de transformação sob resfriamento contínuo de um aço inoxidável dúplex para 1% vol de fase sigma obtido experimentalmente ⁽⁵²⁾ em comparação com o simulado pela metodologia proposta ⁽¹⁾.

Em suma, materiais de alto desempenho como os aços inoxidáveis, e particularmente os de aplicações que requerem a combinação de elevadas resistência mecânica, tenacidade e resistência a corrosão, como são os aços inoxidáveis dúplex e os supermartensíticos, precisam de grande controle microestrutural para garantir as propriedades desejadas. Além disso, sua utilização em produtos de variados formatos, que precisam ser conformados a quente e serem soldados, ou serem produzidos por processos de manufatura aditiva, impõe ciclos térmicos que podem gerar a formação de fases deletérias, comprometendo seu desempenho.

Desse modo, a simulação computacional das transformações de fase controladas por difusão, como as abordadas nesta pesquisa, é ferramenta essencial para o projeto destes processos buscando a otimização de microestruturas e propriedades associadas. Por isso, o desenvolvimento de metodologias de simulação das transformações de fase em DICTRA[®] para estes aços, e sua validação experimental, tem sido o foco principal das pesquisas conduzidas pelo proponente. Foco principal atualmente está nas transformações sob resfriamentos contínuos, desafio importante para entendimento dos ciclos térmicos que diferentes geometrias das peças produzidas com estes materiais podem sofrer.

Com o domínio destas simulações, a compreensão dos fenômenos associados a estas transformações é facilitada, e a ferramenta de simulação computacional facilita o projeto de novas ligas, nas quais a adição de elementos de ligas no modelo virtual pode retardar transformações por difusão indesejadas, como indicam as atuais dissertações de mestrado sob orientação do pesquisador-bolsista^(31, 33, 34) **(Diego, Luis, Renata)**.

Deve-se salientar que a linha de pesquisa do proponente tem gerado e divulgado conhecimento científico e tecnológico para a cadeia produtiva que utiliza aços inoxidáveis desde seu processo de doutoramento (entre 1996 e 2001), com produção associada a esta linha de pesquisa até esta data (declarada no currículo Lattes, <http://lattes.cnpq.br/0327037150655150>) de 67 artigos em periódicos de renome, 162 trabalhos completos em anais de eventos, e principalmente a conclusão de 24 orientações de mestrado, 4 coorientações de doutorado, 23 orientações de trabalhos de conclusão de curso de graduação em engenharia de materiais, e 97 orientações de iniciação científica, além das 3 orientações de mestrado^(31, 33, 34) e 1 coorientação de doutorado⁽³⁸⁾ em andamento. Assim, reforça-se o compromisso do proponente na formação de recursos humanos de qualidade na área de interesse desta proposta, sendo o impacto na sociedade desta proposta o maior legado de pesquisa: a formação de recursos humanos e a geração e disseminação de conhecimento em área estratégica a indústria brasileira.

REFERÊNCIAS

1. R. A. Andrade, R. Magnabosco. Computational Simulation of Duplex Stainless Steel Continuous Cooling Transformation Curves Using DICTRA[®]. MATERIALS RESEARCH, v. 25, p. e20210593, 2022.
2. W. Naville, R. Magnabosco, I. Costa. Uniaxial plastic strain effect on the corrosion-fatigue resistance of ISO 5832-1 stainless steel biomaterial. INTERNATIONAL JOURNAL OF FATIGUE, v. 173, p. 107701, 2023.
3. L. B. V. Jimenez, M. T. Umemura, J. W. Calderón-Hernandez, R. Magnabosco ; C. E. Pinedo, A. P. Tschiptschin. Plasma nitriding of 410S ferritic/martensitic stainless steel: microstructure, wear and corrosion properties. TECNOLOGIA EM METALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO, v. 20, p. e2809, 2023.
4. L. C. Morais, F. Beneduce, R. Magnabosco, A. L. N. Silva. Effect of TiC content on the carbide particle growth of NbC-Ni cemented carbide. INTERNATIONAL JOURNAL OF REFRACTORY METALS & HARD MATERIALS, v. 105, p. 105826, 2022.
5. J. W. Calderón-Hernandez, M. F. G. Ramirez, J. M. Sepulveda. J. D. Santos, J. M. QuispeR. Magnabosco, H. Goldenstein. Electrochemical characterization of 13Cr low-carbon martensitic stainless steel - corrosion study with a mini-cell setup. JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH AND TECHNOLOGY-JMR&T, v. 21, p. 2989-2998, 2022.
6. A. F. M. de Paula, D. F. L. Borges, F. C. Silva, L. S. Rossino, M. D. Manfrinato, V. Vikas, J. H. Luna-Domínguez, R. Magnabosco, C. G. Schön, R. C. Cozza. Synergism between tribological parameters - micro-abrasive concentration level-, -micro-abrasive particle type-, and -liquid type- of a micro-abrasive slurry composition on the micro-abrasive wear behaviour of Fe-30Al-6Cr (at.%) iron aluminide alloy. WEAR, v. 524-525, p. 204867, 2023.
7. I. FRAZÃO, R. Magnabosco, A. Delblanc. Comparison Between Stainless Steels and Nickel Alloys Through Pitting Corrosion Resistance Electrochemical Tests. MATERIALS RESEARCH, v. 24, p. e20200386, 2021.
8. L.H. Guilherme, A.V. Benedetti, C. S. Figivara, R. Magnabosco, M. F. Oliveira. Effect of MAG welding transfer mode on sigma phase precipitation and corrosion performance of 316L stainless steel multi-pass welds. Journal of Materials Research and Technology-JMR&T, v. 9, p. 10537-10549, 2020.
9. L. C. Morais, F. Beneduce, R. Magnabosco, T. R. Ribeiro. Use of DICTRA[®] simulations to support carbide particle growth study in NbC-Ni cemented carbide. INTERNATIONAL JOURNAL OF REFRACTORY METALS & HARD MATERIALS, v. 94, p. 105373, 2020.
10. L. N. García, R. Magnabosco, R. E. Boeri, A. J. Tolley, M. E. Saavedra. Formation of Cu-rich Nanoprecipitates in Cu Containing Pearlitic SGI. International Journal of Metalcasting, v. u, p. s40962-020-0054, 2020.
11. M. T. M. Fiorante, R. Magnabosco. DICTRA[®] study on the alloy element partition during heat treatment of a superduplex stainless steel. In: 76th annual Congress of ABM, 2023, São Paulo. v. u., 9 p.
12. P. H. P. Moreira, R. Magnabosco. Quantification of strain induced martensitic transformation in UNS S32100 stainless steel deformed in cryogenic temperatures. In: 76th annual Congress of ABM, 2023, São Paulo. v. u., 7 p.
13. E. C. Santos-Jr, R. Magnabosco. Desempenho em serviço de granalhas de aço alto carbono - influência da microestrutura e parâmetros de processo. In: 76th annual Congress of ABM, 2023, São Paulo. v. u., 10 p.
14. F. R. Pucci, R. Magnabosco. Temperature influence on the reverse strain-induced martensitic transformation (RSIMT) during rolling of a superduplex stainless steels. In: 75th annual Congress of ABM, 2022, São Paulo. 75th annual Congress of ABM. São Paulo: ABM, 2022. v. u., 8 p.
15. G. R. C. Spedo, R. Magnabosco. On the applied potential and chloride ion concentration for critical pitting temperature potentiostatic determination of a duplex stainless steel. In: 75th annual Congress of ABM, 2022, São Paulo. 75th annual Congress of ABM. São Paulo: ABM, 2022. v. u., 10 p.
16. R. M. Leandro, R. Magnabosco. Grain growth kinetics in a solution-treated duplex stainless steel. In: 75th annual Congress of ABM, 2022, São Paulo. 75th annual Congress of ABM. São Paulo: ABM, 2022. v. u., 10 p.
17. L. C. Morais, R. Magnabosco, F. Beneduce. Study of TiC influence in particle growth of NbC-Ni cemented carbide using DICTRA[®] simulations. In: Calphad Global 2021, 2021, online. <https://calphad.org/calphad-global-home>, 2021. v. u.
18. R. C. M. Santos, R. Magnabosco. DICTRA[®] phase transformation study in AISI 442 used in steel mills heat exchangers. In: Calphad Global 2021, 2021, online. <https://calphad.org/calphad-global-home>, 2021. v. u.
19. R. A. Andrade, R. Magnabosco. Sigma Phase CCT Diagrams for Duplex Stainless Steel obtained using DICTRA[®]. In: Calphad Global 2021, 2021, online. <https://calphad.org/calphad-global-home>, 2021. v. u.

20. R. C. Araújo. Anisotropia de propriedades mecânicas de poliamida 12 processada por manufatura aditiva em tecnologia MJF. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - FUNDACAO EDUCACIONAL INACIANA PADRE SABOIA DE MEDEIROS. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
21. M. T. M. Fiorante. Modelamento computacional dos ciclos térmicos de forjamento de um aço inoxidável superdúplex e sua validação experimental. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - FUNDACAO EDUCACIONAL INACIANA PADRE SABOIA DE MEDEIROS, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
22. F. R. Pucci. Efeito de laminação criogênica na transformação de ferrita em austenita induzida por deformação em aço inoxidável superdúplex. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - FUNDACAO EDUCACIONAL INACIANA PADRE SABOIA DE MEDEIROS, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
23. P. H. P. Moreira. Transformação martensítica induzida por deformação em aços inoxidáveis austeníticos UNS S30100 e UNS S32100. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - FUNDACAO EDUCACIONAL INACIANA PADRE SABOIA DE MEDEIROS. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
24. E. C. Santos Junior. Desempenho em serviço de granalhas de aço alto carbono - influência da microestrutura e parâmetros de processo. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - FUNDACAO EDUCACIONAL INACIANA PADRE SABOIA DE MEDEIROS. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
25. R. C. M. Santos. Previsão de fases presentes em microestrutura bruta de fusão de ferros fundidos usando o DICTRA®. 2021. Iniciação Científica. (Graduando em Engenharia) - FUNDACAO EDUCACIONAL INACIANA PADRE SABOIA DE MEDEIROS. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
26. R. A. Andrade. Simulação computacional da formação de fase sigma em aço inoxidável dúplex durante resfriamento contínuo. 2021. Iniciação Científica. (Graduando em Engenharia) - FUNDACAO EDUCACIONAL INACIANA PADRE SABOIA DE MEDEIROS. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
27. M. K. Rodrigues. Estratégias para o aumento de resistência e rigidez do PLA em manufatura aditiva. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia) - FUNDACAO EDUCACIONAL INACIANA PADRE SABOIA DE MEDEIROS. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
28. R. A. Andrade. Simulação de curvas TRC de aços inoxidáveis dúplex utilizando o DICTRA®. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia) - FUNDACAO EDUCACIONAL INACIANA PADRE SABOIA DE MEDEIROS. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
29. R. C. M. Santos. Previsão de transformação de fase em aços inoxidáveis usando DICTRA®. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia) - FUNDACAO EDUCACIONAL INACIANA PADRE SABOIA DE MEDEIROS. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
30. A. L. A. Silva, P. A. Fracasso, M. B. Silverio. Estudo para Produção de Fechamento de Prótese para Membro Inferior por Manufatura Aditiva. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia) - FUNDACAO EDUCACIONAL INACIANA PADRE SABOIA DE MEDEIROS. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
31. R. C. M. Santos. Estudo de transformações de fases envolvendo formação de fase sigma em aço inoxidável superdúplex UNS S83071 através de modelamento computacional e sua validação experimental. Início: 2023. Dissertação em andamento (Mestrado em Engenharia Mecânica) - FUNDACAO EDUCACIONAL INACIANA PADRE SABOIA DE MEDEIROS. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
32. Rayanne Araujo Andrade. Validação Experimental da Simulação via DICTRA de curvas TRC de aços inoxidáveis dúplex. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - FUNDACAO EDUCACIONAL INACIANA PADRE SABOIA DE MEDEIROS, Fundação Educacional Inaciana Pe Sabóia de Medeiros. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
33. D. Bassani. Análise da variação da composição química na microestrutura e propriedades mecânicas de uma liga super-martensítica 13%Cr depositada pelo processo de soldagem “selfshielded”. Início: 2023. ... Dissertação em andamento (Mestrado em Engenharia Mecânica) - FUNDACAO EDUCACIONAL INACIANA PADRE SABOIA DE MEDEIROS. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
34. L. C. A. Barbosa. Estudo da influência da espessura do depósito de uma liga inoxidável supermartensítica na microestrutura de revestimento de rolos de lingotamento contínuo. Início: 2023. Dissertação em andamento (Mestrado em Engenharia Mecânica) - FUNDACAO EDUCACIONAL INACIANA PADRE SABOIA DE MEDEIROS. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
35. D. V. O. Moraes, R. Magnabosco, G. H. B. Donato, S. H. P. Bettini, M. C. Antunes. Influence of loading frequency on the fatigue behaviour of coir fibre reinforced PP composite. Polymer Testing, v. 41, p. 184-190, 2015.

36. S. H. P. Bettini, M. C. Antunes, Marcela C. ; D. V. O. Moraes, B. C. Bonse, R. Magnabosco. Fatigue life of coir fiber reinforced PP composites: Effect of compatibilizer and coir fiber contents. *Polymer Engineering and Science*, p. n/a-n/a, 2013.
37. D. V. O. Moraes, R. Magnabosco, M. C. Antunes, S. H. P. Bettini. Estudo da variação da frequência do carregamento na fadiga do compósito de polipropileno com fibra de coco. In: 68° Congresso Anual da ABM, 2013, Belo Horizonte. anais do 68° Congresso Anual da ABM. São Paulo: ABM, 2013. p. 46-55.
38. D. V. O. Moraes. Estudo da influência de diferentes matrizes termoplásticas (PPS, PEEK E PAEK) nas propriedades de fadiga de compósitos reforçados com fibra de carbono. Início: 2020. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Universidade Federal de São Paulo. (Coorientador: Rodrigo Magnabosco).
39. B. N. Souza. Estratégias de processamento por manufatura aditiva de órtese dinâmica passiva para reabilitação de membros superiores usando tecnologia MJP. Início: 2023. Dissertação em andamento (Mestrado em Engenharia Mecânica) - FUNDACAO EDUCACIONAL INACIANA PADRE SABOIA DE MEDEIROS. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
40. G. A. Basso. Estudo do efeito dos parâmetros do tratamento térmico de austêmpera em um aço bainítico isento de carbonetos. Início: 2022. Dissertação em andamento (Mestrado em Engenharia Mecânica) - FUNDACAO EDUCACIONAL INACIANA PADRE SABOIA DE MEDEIROS. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
41. W. D. Binder, C. M. Brown. Atmospheric corrosion tests on high-chromium steels. *Proceedings of the American Society for Testing and Materials*, 1946, p. 593-609.
42. A. J. Sedriks. *Corrosion of stainless steels*. John Wiley : NY, 1996, 2. ed., 464 p.
43. R. Magnabosco, N. Alonso-Falleiros. Pit morphology and its relation to microstructure of 850 °C aged duplex stainless steel, *Corrosion* (2005), v. 61, n. 2, p. 130.
44. D. C. Santos et al. Influence of sigma phase formation on pitting corrosion of an aged UNS S31803 duplex stainless steel, *Corrosion* (2013), v. 69, n. 9, p. 900.
45. N. Ebrahimi et al. Correlation between critical pitting temperature and degree of sensitisation on alloy 2205 duplex stainless steel, *Corrosion Science* (2011), v. 53, p. 637.
46. N. Sathirachinda et al. Depletion effects at phase boundaries in 2205 duplex stainless steel characterized with SKPFM and TEM/EDS, *Corrosion Science* (2009), v. 51, p. 1850.
47. S. Wessman, R. Pettersson. Application of computational thermodynamics to predict growth of intermetallic phase in superduplex stainless steel. *Steel Research International* (2015), v. 86, p. 1.
48. Y. He, N. Zhu, X. Lu, L. Lin. Experimental and computational study on microstructural evolution in 2205 duplex stainless steel during high temperature aging. *Materials Science and Engineering A* (2010), 528, p. 721.
49. L. Xiong, D. Xiu-Ping, H. Lin, S. Hong-Mei, H. Cheng. Experimental study and kinect calculation on migration of α/γ interface boundary during high temperature aging for 2205 duplex stainless steel. *Journal of iron and steel research* (2010) v, 17, p. 45.
50. R. Magnabosco, L. C. Morais, D. C. dos Santos. Use of composition profiles near sigma phase for assessment of localized corrosion resistance in a duplex stainless steel. *Calphad-Computer Coupling Of Phase Diagrams And Thermochemistry*, v. 64, p. 126-130, 2019.
51. L. C. Morais, R. Magnabosco. Experimental investigations and DICTRA[®] simulation of sigma phase formation in a duplex stainless steel. *CALPHAD-COMPUTER COUPLING OF PHASE DIAGRAMS AND THERMOCHEMISTRY*, v. 58, p. 214-218, 2017.
52. P. Ferro, F. Bonollo. A semiempirical model for sigma-phase precipitation in duplex and superduplex stainless steels. *Metall. Mater. Trans. A*. 2012; 43A: 1109-1116.