

Projeto de Pesquisa

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

Proponente: Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco

[rodrmagn@fei.edu.br](mailto:rodrmagn@fei.edu.br)

Departamento de Engenharia de Materiais

Centro Universitário FEI

Fundação Educacional Inaciana Pe. Sabóia de Medeiros

*Proposta submetida ao CNPq, chamada 09/2020*

*22 de junho de 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, como são os aços inoxidáveis dúplex, os supermartensíticos e os superausteníticos, 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, impõe ciclos térmicos que podem gerar a formação de fases deletérias, comprometendo seu desempenho. Assim, o projeto aqui proposto visa o estudo das transformações de fase controladas por difusão possíveis em aços inoxidáveis, através da simulação computacional destas transformações, buscando-se o controle das variáveis de processo que levam a formação de microestruturas específicas, e sua influência no comportamento eletroquímico. Os objetivos específicos podem ser descritos em 4 grandes frentes de trabalho: i. Solubilização de aços inoxidáveis dúplex, buscando o entendimento da cinética de formação de fases ferrita e austenita durante os tratamentos térmicos de solubilização e formação da estrutura dúplex ferrita-austenita, durante não só tratamento isotérmico, como também nas etapas de aquecimento e resfriamento típicas de processos de conformação termomecânica, ou pós-solubilização. ii. Envelhecimento de aços inoxidáveis dúplex, já que nos resfriamentos pós-solubilização ou pós-processos de conformação a quente, ou ainda em zonas termicamente afetadas de processos de soldagem, existe a possibilidade de formação de fases deletérias a corrosão localizada, como sigma, chi e nitretos de cromo. iii. Revenimento de aços inoxidáveis supermartensíticos, verificando a possibilidade de simulação das transformações de fases durante revenimento de aços supermartensíticos, que pode gerar a formação de austenita revertida, ou de fases sigma, chi, nitretos e carbonetos de Cr, buscando a descrição dos gradientes de composição nas interfaces, e sua relação entre empobrecimento em Cr e Mo e comportamento a corrosão localizada desta classe de materiais. iv. Resfriamento de aços inoxidáveis superausteníticos de altos teores de Cr, Mo e N, a partir das temperaturas usuais de solubilização, avaliando a possibilidade de formação de fases deletérias como sigma, chi, nitretos e carbonetos de Cr, e relacionando as taxas de resfriamento impostas com a possível formação destas fases e a extensão do empobrecimento em Cr e Mo. Pretende-se como resultados: i. o desenvolvimento de metodologias de simulação das transformações de fase em DICTRA<sup>®</sup> para estes aços, e sua validação experimental; ii. o desenvolvimento da ferramenta de simulação computacional para o projeto de novas ligas, nas quais a adição de elementos de ligas no modelo virtual pode, por exemplo, retardar transformações por difusão indesejadas; iii. facilitar o projeto de ciclos térmicos durante o processamento que otimizem as microestruturas e propriedades a estas associadas, e iv. a formação de recursos humanos, e a geração e disseminação de conhecimento em área estratégica a nação.

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

## 1. METAS E RESULTADOS ATINGIDOS – PROJETO 2017-2019

As atividades de pesquisa do proponente no triênio 2017-2019, durante vigência da bolsa de produtividade em pesquisa nível 2 (PQ2), processo 301458/2016-2, 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, e sua influência no comportamento a corrosão. Foram abordados quatro temas específicos, e as produções <sup>(1-33)</sup> a eles associadas podem ser encontradas na Tabela 1.

Nota-se que o foco dos resultados mais relevantes se concentrou no binômio dos trabalhos que relacionam transformações de fases controladas por difusão e relação com comportamento a corrosão. A utilização da simulação computacional em DICTRA<sup>®</sup> na compreensão das transformações de fase <sup>(4,6, 14)</sup> e na previsão de comportamento a corrosão <sup>(4)</sup> de aços inoxidáveis tem se mostrado um promissor campo de desenvolvimento inédito, que pode facilitar o entendimento da formação das microestruturas durante o processamento de aços inoxidáveis, e o projeto otimizado destes processos com o auxílio da simulação computacional, e este será o tema central desta nova proposta, como será abordado na sequência.

Tabela 1. Resultados alcançados na vigência da bolsa PQ2, triênio 2017-2019.

Temas		Caracterização microestrutural	Transformações martensíticas induzidas por deformação	Transformações controladas por difusão	Comportamento a corrosão
Artigos em periódicos	ocorrências	2	-	7	6
	referências	1, 2, 5	-	1-7	1-5, 8
Trabalhos em anais de congresso	ocorrências	-	1	2	-
	referências	-	9	10, 11	-
Resumos em congressos	ocorrências	-	-	2	-
	referências	-	-	12, 13	-
Orientações de mestrado concluídas	ocorrências	-	-	1	3
	referências	-	-	14	15-17
Orientações de Iniciação Científica concluídas	ocorrências	3	-	3	1
	referências	18-20	-	21-23	24
Orientações de trabalhos de conclusão de curso de graduação concluídas	ocorrências	1	-	1	-
	referências	25	-	26	-
Orientações de mestrado em andamento	ocorrências	-	1	2	-
	referências	-	27	28, 29	-
Orientações de Iniciação Científica em andamento	ocorrências	-	-	4	-
	referências	-	-	30-33	-

## 2. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

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 e os superausteníticos. 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.

A resistência à corrosão localizada, especialmente a resistência à corrosão por pite, é classificada empiricamente pelo número equivalente de resistência a pite (PREN, do inglês *Pitting Resistance Equivalent Number*), com a formulação mais aceita definida pela Eq. 1, e amplamente utilizado pelos fabricantes de aços inoxidáveis para classificar seus produtos quanto à resistência à corrosão por pite<sup>(34-37)</sup>. A base da proposição do PREN é a composição da película passiva, responsável pela resistência à corrosão dos aços inoxidáveis, que é composta principalmente por Cr, com características protetoras reforçadas pela presença de Mo e N<sup>(34,35)</sup>.

$$\text{PREN} = \%_m \text{Cr} + 3,3 \%_m \text{Mo} + 16 \%_m \text{N} \quad \text{Eq. 1}$$

Há indícios na literatura<sup>(38-40)</sup> 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 localmente os valores de PREN<sup>(41)</sup>. 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<sup>(41)</sup>.

O uso de simulações computacionais em DICTRA<sup>®</sup>, que agregam as hipóteses de equilíbrio local em interfaces durante transformações de fase controladas por difusão, é apontada por muitos autores<sup>(4, 6, 42-44)</sup> 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, como demonstrado em trabalhos do grupo de pesquisa liderado pelo proponente desta proposta<sup>(4,6)</sup>, e mostrou-se ser possível relacionar regiões empobrecidas em Cr e Mo, de baixo PREN local, com a redução da resistência a corrosão localizada<sup>(4)</sup>.

Trabalho recentemente publicado pelo grupo de pesquisa do proponente<sup>(4)</sup> discute 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<sup>®</sup>, como exemplifica a Figura 1.

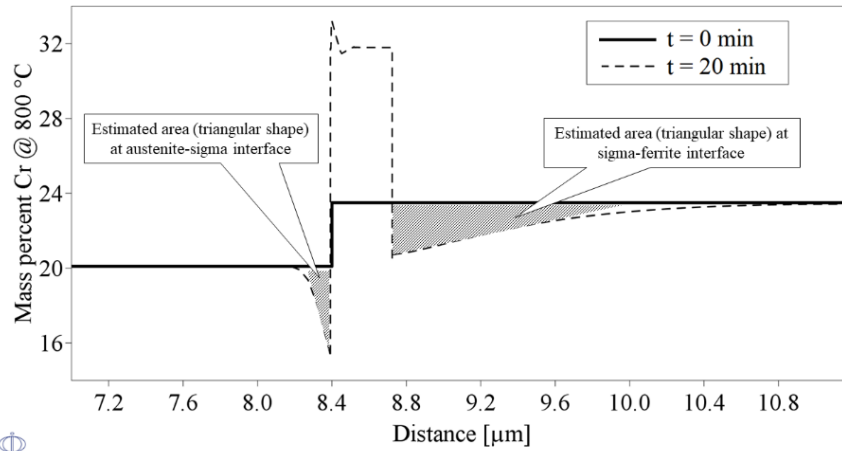


Figura 1. Simulação computacional do perfil de Cr nas interfaces entre austenita, sigma e ferrita de um aço inoxidável dúplex envelhecido a 800 °C por 20 min, e definição das áreas empobrecidas em Cr <sup>(4)</sup>.

No mesmo trabalho <sup>(4)</sup>, a somatória ponderada das áreas empobrecidas em Cr e Mo (usando a mesma ponderação entre Cr e Mo encontrada na formulação de PREN – Eq. 1), 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<sup>®</sup>.

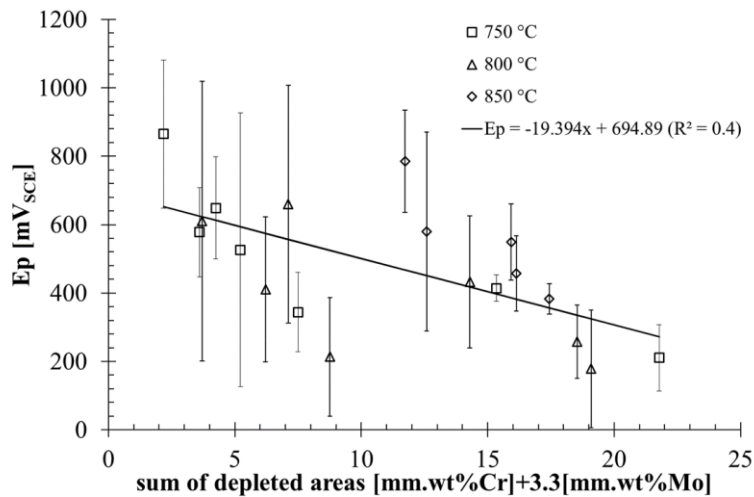


Figura 2. Potencial de pite (Ep) de um aço inoxidável dúplex envelhecido isotermicamente em diferentes condições em função do grau de empobrecimento em Cr e Mo das interfaces entre sigma, ferrita e austenita <sup>(4)</sup>.

A formação de áreas empobrecidas em Cr e Mo, e sua influência no comportamento a corrosão localizada, pode ocorrer também em outras classes de aços inoxidáveis. Por exemplo, no grupo de trabalho do proponente deste projeto há estudos <sup>(2,5)</sup> relacionando transformações de fase durante o revenimento de aços inoxidáveis supermartensíticos e valores de potencial de pite e grau de sensitização. Supõe-se que a formação de austenita revertida em temperaturas de revenimento superiores a 650 °C, e a possível formação de fase chi, prevista por simulações de equilíbrio termodinâmico em ThermoCalc<sup>®</sup> possam ser as causadoras de regiões empobrecidas em Cr e Mo na estrutura CCC da matriz revenida. Assim, o entendimento da cinética de transformações de fases durante o revenimento, estudadas com o auxílio de simulações computacionais em DICTRA<sup>®</sup>, podem constituir promissora linha de investigação.

Como exemplo, na Figura 3 é apresentada a fração de austenita presente após o revenimento de aço inoxidável supermartensítico em diferentes temperaturas, e os respectivos valores de potencial de pite e grau de sensitização (DOS). A queda nos valores de  $E_p$ , e o aumento do grau de sensitização (DOS), são coincidentes com o aumento da fração de austenita após revenimento a 650 °C, indicando que a formação desta fase no revenimento, provavelmente empobrecida em Cr e Mo (que são elementos que preferencialmente são particionados a matriz CCC), é a causadora da perda de resistência a corrosão localizada. Assim, prever os perfis de composição na interface entre austenita revertida e a matriz CCC através de simulação computacional em DICTRA<sup>®</sup> do revenimento pode ser uma útil ferramenta de entendimento e controle destas transformações de fase.

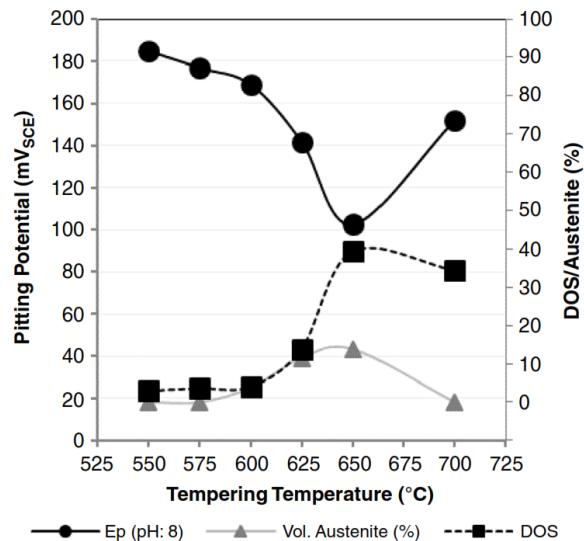


Figura 3. Potencial de pite ( $E_p$ ), grau de sensitização (DOS) e fração de austenita após revenimento de um aço inoxidável supermartensítico em diferentes temperaturas de revenimento <sup>(5)</sup>.

Dissertação de mestrado recentemente orientada pelo proponente <sup>(15)</sup>, cujos resultados brevemente serão publicados em periódico relevante da área, apresentou um valor inesperado de temperatura crítica de pite (CPT) para aço superaustenítico UNS S31254, uma vez que apesar de seu PREN ser equivalente ao de aço inoxidável superdúplex UNS S32750, o valor de CPT do aço superaustenítico é inferior ao do aço superdúplex. Atribuiu-se tal comportamento à rápida formação, relatada também na literatura <sup>(45)</sup>, de fases ricas em Cr e Mo, como sigma, chi ou nitretos de cromo, durante o resfriamento pós-solubilização deste aço. Assim, compreender a cinética das possíveis transformações de fase de aços superausteníticos no resfriamento pós-solubilização, usando simulação computacional, pode ajudar a compreender e prever o comportamento a corrosão localizada.

Com esta breve introdução, mostrando os promissores resultados do grupo de pesquisa do proponente, buscou-se demonstrar que o desenvolvimento dos parâmetros de simulação computacional em DICTRA<sup>®</sup>, visando a geração de resultados confiáveis e passíveis de validação experimental, é fundamental para o entendimento da formação das microestruturas durante o processamento de aços inoxidáveis, particularmente dos aços inoxidáveis dúplex, dos aços inoxidáveis supermartensíticos, e dos aços inoxidáveis superausteníticos, com potencial de se tornar ferramenta poderosa na configuração otimizada destes processos.

### 3. OBJETIVOS E DESAFIOS DESTE PROJETO

O projeto aqui proposto visa o estudo das transformações de fase controladas por difusão possíveis em aços inoxidáveis, através da simulação computacional destas transformações, buscando-se o controle das variáveis de processo que levam a formação de microestruturas específicas, e sua influência no comportamento eletroquímico. Este desafio será encarado em quatro frentes distintas de trabalho, e em todas busca-se o desenvolvimento de modelos e parâmetros de simulação que possam descrever a cinética das transformações de fases em cada sistema. As quatro frentes de trabalho têm seus objetivos específicos, todos descritos nos itens que seguem:

- i. **Solubilização de aços inoxidáveis dúplex:** buscar-se-á o entendimento da cinética de formação de fases ferrita e austenita durante os tratamentos térmicos de solubilização e formação da estrutura dúplex ferrita-austenita, durante não só tratamento isotérmico, como também nas etapas de aquecimento e resfriamento típicas de processos de conformação termomecânica, ou pós-solubilização. Isto é necessário pois a fração das fases ferrita e austenita formadas, e gradientes de Cr, Ni, Mo e N nestas fases, não podem ser descritos pelos cálculos de equilíbrio termodinâmico normalmente empregados nas previsões clássicas. Assim, o entendimento destas transformações, à luz dos resultados de simulação computacional com DICTRA<sup>®</sup>, podem melhor descrever as estruturas formadas e auxiliar na previsão do comportamento eletroquímico dos aços.

- ii. **Envelhecimento de aços inoxidáveis dúplex:** nos resfriamentos pós-solubilização ou pós-processos de conformação a quente, ou ainda em zonas termicamente afetadas de processos de soldagem, existe a possibilidade de formação de fases deletérias a corrosão localizada, como sigma, chi e nitretos de cromo. Assim, aprofundar os estudos já consagrados da linha de pesquisa do proponente trará maior confiabilidade às previsões microestruturais após determinados ciclos térmicos, auxiliando no projeto destes processos para evitar a formação destas fases deletérias.
- iii. **Revenimento de aços inoxidáveis supermartensíticos:** o objetivo aqui é verificar a possibilidade de simulação das transformações de fases durante revenimento de aços supermartensíticos, usando modelos em DICTRA de reduzidas dimensões, caracterizando a estrutura temperada dos aços com finas estruturas de martensita entremeada por austenita retida, que durante o revenimento possibilitariam a formação de austenita revertida, ou de fases sigma, chi, nitretos e carbonetos de Cr. Assim, com a descrição dos gradientes de composição nas interfaces, buscar-se-á a relação entre empobrecimento em Cr e Mo e comportamento a corrosão localizada desta classe de materiais.
- iv. **Resfriamento de aços inoxidáveis superausteníticos:** como esta classe de aços inoxidáveis possui altos teores de Cr, Mo e N, como os do aço UNS S31254, a partir das temperaturas usuais de solubilização, se buscará avaliar a possibilidade de formação de fases deletérias como sigma, chi, nitretos e carbonetos de Cr nessa classe de aços, relacionando as taxas de resfriamento impostas com a possível formação destas fases e a extensão do empobrecimento em Cr e Mo. A caracterização deste empobrecimento, como já mencionado, pode explicar as causas de comportamentos anômalos de resistência a corrosão localizada, se comparados por exemplo ao potencial de resistência a corrosão por pite garantido pelos elevados valores de PREN desta classe de materiais.

#### 4. METODOLOGIA

Pode se dividir as atividades necessárias ao cumprimento dos objetivos propostos em quatro grupos principais, diretamente relacionados aos objetivos específicos descritos no item anterior. Na sequência, os quatro grupos de trabalho são tratados de forma resumida, com breve descrição dos subprojetos a executar. Os cronogramas previstos para quatro anos, divididos em trimestres e para cada subprojeto, são apresentados na Tabela 2.

Na frente de trabalho sobre **solubilização** de aços inoxidáveis dúplex, um trabalho de mestrado em andamento <sup>(29)</sup> versa sobre o modelamento computacional dos ciclos térmicos comumente encontrados no forjamento de um aço inoxidável superdúplex, que são o aquecimento até a temperatura de forjamento, por



vezes superior a ideal de formação da estrutura dúplex, resfriamento até a temperatura de solubilização e formação da estrutura dúplex, manutenção nesta temperatura, e resfriamento subsequente. Durante estas etapas, além das transformações isotérmicas, e transformações durante os resfriamentos/aquecimentos, pode ocorrer partição de elementos de liga entre as fases e alteração das suas frações volumétricas. Assim, pretende-se desenvolver as metodologias de simulação em DICTRA<sup>®</sup>, a validação experimental das simulações, e a avaliação dos possíveis gradientes de composição formados, que podem afetar outras transformações de fase subsequentes, e também o comportamento eletroquímico. Outro trabalho de mestrado em andamento <sup>(27)</sup> poderá fazer uso destas metodologias de simulação para compreender como estas formações microestruturais podem afetar a transformação martensítica reversa induzida por deformação (TMRID) de ferrita em austenita, tema que dá continuidade a trabalho do grupo de pesquisa do proponente <sup>(46)</sup>. Dentro deste mesmo grupo de trabalho, em continuidade e aprofundamento dos resultados que se vem obtendo, pretende-se a inserção de mais dois projetos de iniciação científica de graduandos em engenharia de materiais no Centro Universitário FEI, e de mais uma dissertação de mestrado.

Utilizando também como condição inicial os resultados da frente de trabalho “solubilização”, a frente de trabalho **envelhecimento** de aços inoxidáveis dúplex deve ter continuidade no quadriênio 2021-2024 com duas novas dissertações de mestrado, que avaliarão a influência dos gradientes de composição nas interfaces ferrita-austenita, obtidos na frente de trabalho “solubilização” descrita anteriormente, na formação de fase sigma e nitretos de cromo. Pretende-se com estes dois novos trabalhos de mestrado formar profissionais não só nas simulações envolvendo tratamentos isotérmicos, mas também e principalmente nos ciclos de resfriamento a partir de temperaturas de processamento, avaliando a possibilidade de determinação, por simulação em DICTRA<sup>®</sup>, das taxas de resfriamento críticas para evitar a formação das fases deletérias em aços inoxidáveis dúplex sob diferentes situações iniciais, possibilitando o projeto de ciclos térmicos que garantam comportamento eletroquímico esperado destes aços.

Estudos da frente de trabalho de **revenimento** de aços inoxidáveis supermartensíticos serão conduzidos como continuidade das explorações de simulações conduzidas pelo proponente até o momento, em trabalho conjunto com a Escola Politécnica da USP, elucidando as transformações de fases de revenimento e suas consequências no comportamento eletroquímico destes aços, complementando e aprofundando trabalhos que vem sendo desenvolvidos <sup>(1,2,5,13)</sup>. Será proposto ao menos um trabalho de iniciação científica e uma dissertação de mestrado no tema, formando pessoal nesta área de simulação, hoje explorada apenas pelo proponente deste projeto, com resultados iniciais a publicar em 2020.

Por fim, a frente de trabalho de **resfriamento** de aços inoxidáveis superausteníticos, que tem 3 trabalhos de iniciação científica em andamento com conclusão no final de 2019 <sup>(30-32)</sup>, versará sobre a possibilidade de levantamento de diagramas de transformação isotérmica – IT (ou TTT, tempo-temperatura-transformação) e diagramas de transformação sob resfriamento contínuo (TRC) de aços superausteníticos, especialmente o UNS S31254, tentando determinar por simulação computacional em DICTRA<sup>®</sup> as taxas de resfriamento críticas para evitar a formação indesejada de fases que comprometem a utilização destes aços.

Duas novas iniciações científicas e um novo trabalho de mestrado estão previstos para o quadriênio 2020-2023, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2. Cronograma previsto para os quatro grupos de trabalho deste projeto.

Grupo de trabalho	Subprojeto	2021	2022	2023	2024
solubilização	Mestrado em andamento <sup>(27)</sup>				
	Mestrado em andamento <sup>(29)</sup>				
	Nova IC				
	Nova IC				
	Novo Mestrado				
envelhecimento	Novo Mestrado				
	Novo Mestrado				
revenimento	Nova IC				
	Novo Mestrado				
resfriamento	Nova IC				
	Nova IC				
	Novo Mestrado				

## 5. RESULTADOS ESPERADOS E IMPACTOS DO PROJETO

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, os supermartensíticos e os superausteníticos, 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, 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 por esta 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<sup>®</sup> para estes aços, e sua validação experimental, tem sido o foco principal das pesquisas conduzidas pelo proponente, e é um dos resultados esperados deste projeto.

Com o domínio destas simulações, a compreensão dos fenômenos associados a estas transformações será facilitada, e a ferramenta de simulação computacional facilitará 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 otimizem 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 será reduzido, e isto tem grande impacto econômico e tecnológico na cadeia produtiva que depende dos aços inoxidáveis de alto

desempenho.

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), e se considerado o período em que o proponente foi agraciado com bolsas de produtividade em pesquisa pelo CNPq, desde 2011, tem-se a produção até a data (declarada no currículo Lattes, <http://lattes.cnpq.br/0327037150655150>) de 31 artigos em periódicos de renome, 58 trabalhos completos em anais de eventos, e principalmente a conclusão de 11 orientações de mestrado, 3 coorientações de doutorado, 17 orientações de trabalhos de conclusão de curso de graduação em engenharia de materiais, e 11 orientações de iniciação científica, além das 3 orientações de mestrado <sup>(27-29)</sup> e 4 orientação de iniciação científica <sup>(30-33)</sup> 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 destas produções o maior legado de pesquisa: a formação de recursos humanos e a geração e disseminação de conhecimento em área estratégica a nação.

## 6. CONTRAPARTIDA

O Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Universitário FEI dispõe de ampla estrutura laboratorial para execução das linhas de pesquisa a que se propõe, propiciada quase em sua totalidade pela FEI. Os itens descritos na sequência são os mais relevantes na execução desta proposta:

- Software ThermoCalc<sup>®</sup> e bases de dados dedicadas (como a TCFE9).
- Software DICTRA<sup>®</sup> e bases de dados dedicadas (como a MOBFE4).
- Difratorômetro de raios-X Shimadzu XRD-7000, com possibilidade de trabalho em simetria convencional Bragg-Brentano ou de ângulo de incidência rasante, com tubos de radiação Cu-K $\alpha$  ou Cr-K $\alpha$  e banco de dados ICDD.
- Forno tubular Combustol (1100°C) com relê de estado sólido e retorta preparada para tratamentos sob vácuo ou atmosfera de N<sub>2</sub>.
- Dois fornos tubulares Grion (1000°C) com relê de estado sólido e retorta preparada para tratamentos sob vácuo ou atmosfera de N<sub>2</sub>.
- Forno poço Combustol (1100°C) com relê de estado sólido e retorta preparada para tratamentos sob vácuo ou atmosfera de N<sub>2</sub>.
- Duas muflas Jung (1400°C) com relê de estado sólido.
- Forno Combustol (1000°C) com convecção forçada.
- Microscópio LEICA DMLM e sistema de aquisição e análise de imagens.

- Microscópio ZEISS e sistema de aquisição e análise de imagens.
- Microscópios OLYMPUS BY-50 e sistema de análise e aquisição de imagens.
- Politriz semiautomática ABRAMIN-Struers.
- 1 sistema para polimento e ataque eletrolítico LECTROPOL-Struers.
- 1 cortadeira com disco diamantado MINITON-Struers.
- 3 cortadeiras metalográficas com discos abrasivos.
- 2 embutidoras metalográficas semiautomáticas.
- 15 lixadeiras/politrizes metalográficas manuais com discos de 200 mm.
- 1 lixadeira de desbaste de 300 mm de disco, 1500 RPM.
- Potenciostato AUTOLAB 20, eletrodos de referência, vidrarias, banho ultratermostático e sistema de aquisição de temperatura HBM-Quantum.
- Equipamento para análise térmica diferencial DSC1600 SETARAM, até 1600°C.
- Dilatômetro DIL1600 SETARAM
- Máquina universal de ensaios MTS servo controlada de 250 kN de capacidade máxima, dotada de ampla gama de acessórios.
- Máquina universal de ensaios mecânica INSTRON de 3 T.
- Laminador de produtos planos, com cilindros de 200 mm de mesa e 190 mm de diâmetro, luz máxima de 20 mm, instrumentado com células de força para medição da força de laminação e célula de torque acoplada a um dos cilindros para medição de torque de laminação.
- Prensa hidráulica de duplo efeito de 40 T cada atuador, instrumentada.

## REFERÊNCIAS

1. C. H. Beraldo, J. W. Calderón-Hernández, R. Magnabosco, N. Alonso-Falleiros. Effect of Aging Heat Treatment H950 and H1000 on Mechanical and Pitting Corrosion Properties of UNS S46500 Stainless Steel. *MATERIALS RESEARCH*, v. 22, p. 1, 2018.
2. M. P. Oliveira, J. W. Calderón-Hernández, R. Magnabosco, D. Hincapie-Ladino, N. Alonso-Falleiros. Effect of Niobium on Phase Transformations, Mechanical Properties and Corrosion of Supermartensitic Stainless Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance (Print)*, v. 26, p. 1-9, 2017.
3. J. W. Calderón-Hernández, D. Hincapie-Ladino, R. Magnabosco, N. Alonso-Falleiros. Effect of sulfate on the pitting potential of austenitic stainless steels 18Cr8Ni and 17Cr6Mn5Ni in chloride media. *REM - International Engineering Journal*, v. 72, p. 97-103, 2019.

4. 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.
5. J. W. Calderón-Hernández, D. Hincapié-Ladino, E. B. Martins-Filho, R. Magnabosco, N. Alonso-Falleiros. Relation between pitting potential, degree of sensitization and reversed austenite in a supermartensitic stainless steel. *CORROSION*, v. 73, p. 953-960, 2017.
6. L. C. Morais, R. Magnabosco. Experimental investigations and DICTRA<sup>®</sup> simulation of sigma phase formation in a duplex stainless steel. *CALPHAD-COMPUTER COUPLING OF PHASE DIAGRAMS AND THERMOCHEMISTRY*, v. 58, p. 214-218, 2017.
7. E. A. Melo, R. Magnabosco,. Influence of the Heterogeneous Nucleation Sites on the Kinetics of Intermetallic Phase Formation in Aged Duplex Stainless Steel. *METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A-PHYSICAL METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE*, v. elet, p. 1-12, 2017.
8. B. C. M. Terra, R. Magnabosco. Effect of Mo substitution by W on the passive characteristics and mechanical behavior of AISI 316L austenitic stainless steel. *CORROSION*, 2019 (aceito para publicação).
9. J. W. Ferezin, R. Magnabosco. Study of strain induced martensitic transformation in two austenitic stainless steels by x-ray diffraction. In: 9th European Stainless Steel Conference Science & Market and the 5th European Duplex Stainless Steel Conference & Exhibition, 2017, Bergamo. 9th European Stainless Steel Conference Science & Market and the 5th European Duplex Stainless Steel Conference & Exhibition - conference proceedings. Milão: AIM, 2017. v. u. p. 1-7.
10. R. Magnabosco; F. M. Rabechini . Phase transformations during aging of a hyperduplex stainless steel. In: 9th European Stainless Steel Conference Science & Market and the 5th European Duplex Stainless Steel Conference & Exhibition, 2017, Bergamo. 9th European Stainless Steel Conference Science & Market and the 5th European Duplex Stainless Steel Conference & Exhibition - conference proceedings. Milão: AIM, 2017. v. u. p. 1-7.
11. C. E. Pinedo, R. Magnabosco, W. R. Silva. Formação de ferrita expandida na nitretação de um aço inoxidável ferrítico. In: 72º Congresso Anual da ABM, 2017, Rio de Janeiro. Anais do Congresso Anual da ABM. São Paulo: Editora Blucher, 2017. v. 72. p. 104-114.
12. R. Magnabosco; J. R. O. Alves. Nb alloyed lean duplex stainless steel design using thermodynamic modelling. In: CALPHAD XLVII, 2018, Juriquila. CALPHAD XLVII. Queretaro: Cidesi, 2018. v. 1. p. 127-127.
13. J. W. Calderon-Hernandez, D. Hincapie-Ladino, R. Magnabosco, F. M. Queiroz, H. G. Melo, H. Goldenstein. Estudo das transformações de fases em aço inoxidável supermartensítico. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - CBECIMAT, 2018, Foz do Iguaçu. 23 CBECIMAT. Foz do Iguaçu: CBECIMAT, 2018. v. u. p. 1.
14. L. C. Morais. Simulação da cinética de formação da fase sigma durante o envelhecimento isotérmico a 930°C do aço inoxidável dúplex. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Orientador: Rodrigo Magnabosco.

15. I. Frazão. Desenvolvimento de teste para avaliação comparativa de CPT para ligas de alta resistência a corrosão por pite. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
16. B. C. M. Terra. Estudo do Efeito da Substituição do Mo por W no desempenho de aços inoxidáveis austeníticos. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros, Fundação Educacional Inaciana Pe Sabóia de Medeiros. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
17. G. R. Carrer-Spedo. Avaliação de parâmetros de ensaio para determinação de temperatura crítica de pite em aço inoxidável dúplex por via potencioestática. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
18. F. R. Pucci. Uso de difratometria de raios-X na quantificação da fração volumétrica de fases em aço inoxidável dúplex solubilizado. 2018. Iniciação Científica. (Graduando em Engenharia) - Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros, Fundação Educacional Inaciana Pe Sabóia de Medeiros. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
19. T. A. Lopes. Uso de difratometria de raios-X na quantificação da fração volumétrica de fases em aço inoxidável supermartensítico. 2018. Iniciação Científica. (Graduando em Engenharia) - Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros, Fundação Educacional Inaciana Pe Sabóia de Medeiros. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
20. T. A. Lopes. Uso de difratometria de raios-X na quantificação da fração volumétrica de fases em aço inoxidável superdúplex. 2017. Iniciação Científica. (Graduando em Engenharia) - Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros, Fundação Educacional Inaciana Pe Sabóia de Medeiros. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
22. M. T. M. Fiorante. Modelamento computacional da solubilização de um aço inoxidável superdúplex e sua validação experimental.. 2018. Iniciação Científica. (Graduando em Engenharia) - Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros, Fundação Educacional Inaciana Pe Sabóia de Medeiros. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
23. G. D. R. Chbane. Simulação computacional da formação de fase sigma em aços inoxidáveis dúplex. 2018. Iniciação Científica. (Graduando em Engenharia) - Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros, Fundação Educacional Inaciana Pe Sabóia de Medeiros. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
21. R. T. Alves Jr. Modelos 3D do diagrama de fases Fe-Cr-Ni. 2019. Iniciação Científica. (Graduando em Engenharia) - Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros, Fundação Educacional Inaciana Pe Sabóia de Medeiros. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
24. G. T. Sanches. Influência da corrosão seletiva de ferrita e austenita no comportamento eletroquímico de aço inoxidável dúplex. 2017. Iniciação Científica. (Graduando em Engenharia) - Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros, Fundação Educacional Inaciana Pe Sabóia de Medeiros. Orientador: Rodrigo Magnabosco.

25. F. R. Pucci. Quantificação de fases em aço inoxidável duplex usando difratometria de raios-X. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia) - Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
26. M. T. M. Fiorante. Modelamento computacional da solubilização de um aço inoxidável superduplex e sua validação experimental. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia) - Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
27. F. R. Pucci. Efeito de laminação criogênica na transformação de ferrita em austenita induzida por deformação em aço inoxidável superduplex. Início: 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. (Orientador).
28. E. C. Santos Jr. Desempenho em serviço de granalhas de aço alto carbono - influência da microestrutura e parâmetros de processo. Início: 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros. (Orientador).
29. M. T. M. Fiorante. Modelamento computacional dos ciclos térmicos de forjamento de um aço inoxidável superduplex e sua validação experimental. Início: 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. (Orientador).
30. G. C. Lago. Geração de diagrama TRC de formação de carbonetos de cromo em aço inoxidável austenítico tipo 316 usando o DICTRA<sup>®</sup>. Início: 2018. Iniciação científica (Graduando em Engenharia) - Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros, Fundação Educacional Inaciana Pe Sabóia de Medeiros. (Orientador).
31. L. O. José. Geração de diagrama TTP de formação de carbonetos de cromo em aço inoxidável austenítico tipo 316 usando o DICTRA<sup>®</sup>. Início: 2018. Iniciação científica (Graduando em Engenharia) - Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros, Fundação Educacional Inaciana Pe Sabóia de Medeiros. (Orientador).
32. B. G. M. Campos. Geração de diagramas TTP e TRC para o aço inoxidável austenítico tipo 254SMO usando o DICTRA<sup>®</sup>. Início: 2018. Iniciação científica (Graduando em Engenharia) - Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros, Fundação Educacional Inaciana Pe Sabóia de Medeiros. (Orientador).
33. B. M. S. Leite. Desenvolvimento de metodologia de uso de par de difusão para estudo do equilíbrio do sistema ferro-cromo. Início: 2018. Iniciação científica (Graduando em Engenharia) - Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros, Fundação Educacional Inaciana Pe Sabóia de Medeiros. (Orientador).
34. H. D. Solomon, T. M. Devine Jr. Duplex stainless steels: a tale of two phases, in: Duplex stainless steels – conference proceedings, Metals Park, Ohio: ASM (1982) 693.
35. J. O. Nilsson. *Materials Science and Technology*, 8 (1992) 685.
36. P. Paulraj, R. Garg. Effect of intermetallic phases on corrosion behavior and mechanical properties of duplex stainless steel and super-duplex stainless steel, *Advances in Science and Technology Research Journal* (2015), v. 9, n. 27, p. 87.

37. H. Vannevik et al, Effect of elemental partitioning on pitting resistance of high nitrogen duplex stainless steels, *ISIJ International* (1996), v. 36, n. 7, p. 807.
38. 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.
39. 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.
40. 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.
41. 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.
42. 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.
43. 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.
44. L. Xiong, D. Xiu-Ping, H. Lin, S. Hong-Mei, H. Cheng. Experimental study and kinect calculation on migration of  $\alpha/\gamma$  interface boundary during high temperature aging for 2205 duplex stainless steel. *Journal of iron and steel research* (2010) v, 17, p. 45.
45. G. E. Mori, D. Bauernfeind. Pitting and crevice corrosion of superaustenitic stainless steels. *Materials and Corrosion*, v. 55, n. 3, 2004.
46. A. Forgas-Jr, J. Marangoni, J. Otubo, G. H. B. Donato, R. Magnabosco. Reverse strain-induced martensitic transformation of the ferrite to austenite in duplex stainless steels. *Journal of Materials Science*, v. i, p. 1-12, 2016.