

Relatório Final

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DAS
TRANSFORMAÇÕES DE FASE EM AÇOS
INOXIDÁVEIS DÚPLEX**

Bolsista: Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco

rodrmagn@fei.edu.br

Departamento de Engenharia de Materiais

Centro Universitário da FEI

Fundação Educacional Inaciana Pe. Sabóia de Medeiros

*Relatório final de bolsa de produtividade em pesquisa
obtida na chamada PQ 10/2010, processo 301754/2010-1*

30 de janeiro de 2014

RESUMO

A obtenção de dados experimentais que descrevam a cinética de transformação de fases nos aços inoxidáveis, e expressões do tipo JMA para a previsão destas frações, é fundamental para a determinação de ciclos térmicos para processamento termomecânico ou soldagem dos aços inoxidáveis dúplex que não levem a formação de fases deletérias, como sigma e chi. Contudo, a variedade de mecanismos de transformação (e a dificuldade experimental para descrever todas as possíveis ocorrências de formação de fase sigma em diferentes ciclos térmicos) torna inviável a utilização de experimentação como única forma de previsão das microestruturas formadas, sendo a simulação computacional uma ferramenta importante para suprir tal carência. A validação experimental de simulações de equilíbrio termodinâmico e de cinética de transformações de fase traz confiabilidade a estas simulações, permitindo seu uso seguro. Este projeto teve por objetivo avaliar a cinética das transformações de fase em aços inoxidáveis dúplex através de simulação computacional do equilíbrio de fases e da cinética das transformações de fases, validando as simulações com resultados experimentais. Os modelos termodinâmicos de equilíbrio que preveem as fases após solubilização ou envelhecimentos em tempos superiores a 1000h foram validados, e apesar de modelos cinéticos de formação de fase sigma terem sido criados, os resultados mostram que refinamento tanto do entendimento dos mecanismos de formação quanto das técnicas de caracterização quantitativa das amostras para validação destes modelos são necessárias, e estes são temas fundamentais da continuidade das pesquisas deste bolsista no triênio 2014-2016.

Palavras-chave: aços inoxidáveis dúplex, transformação de fases, simulação computacional, fase sigma.

1. RESUMO DAS ATIVIDADES REALIZADAS

A linha principal de pesquisa conduzida no triênio 2011-2013 versou sobre os estudos de cinética das transformações de fases em aços inoxidáveis dúplex e sua simulação computacional. Contudo, como o presente relatório mostrará na sequência, a simulação computacional destas transformações depende fortemente do estudo minucioso dos mecanismos envolvidos, e tal estudo permeou fortemente as atividades de pesquisa do grupo liderado pelo proponente deste novo projeto de pesquisa.

Deve se ressaltar, todavia, que o histórico de trabalho deste bolsista no Centro Universitário da FEI mostra que boa parte dos 17 anos de dedicação à docência, pesquisa e formação de pessoas esteve atrelada às relações entre estrutura e os comportamentos mecânico e eletroquímico de diferentes materiais. Assim, antes de descrever os resultados obtidos na linha atual e principal de atuação (transformações de fase em aços inoxidáveis dúplex e simulação computacional destas transformações), breve relato das extensas atividades relacionadas a esta linha anterior de trabalho, e que foram desenvolvidas paralelamente as atividades de pesquisa principais deste bolsista, serão apresentadas.

Trabalhos relacionados a comportamento mecânico de materiais

A experiência do bolsista em fadiga de materiais permitiu a nucleação na FEI de grupo de estudos em fadiga de materiais, e tal experiência se estendeu a estudos de fadiga em compósitos com matriz termoplástica de polipropileno (PP) e reforçados com fibras naturais, particularmente fibra de coco. Tal estudo gerou a publicação de quatro artigos em periódicos internacionais ⁽¹⁻⁴⁾, dois artigos completos em anais de eventos ^(5,6), e a orientação de uma dissertação de mestrado concluída na FEI em 2013 ⁽⁷⁾. Além disso, os estudos de comportamento mecânico dos materiais, e particularmente de materiais metálicos, desenvolvidos historicamente por este bolsista na FEI, ainda geraram outros três artigos em periódicos no período ⁽⁸⁻¹⁰⁾, além de levar ao término da orientação de outra dissertação de mestrado na FEI ⁽¹¹⁾, trabalho este que sintetizou todo o conhecimento acumulado para tratamento de dados obtidos em ensaios de impacto Charpy, coroando trabalho iniciado em 2003 ⁽¹²⁾, dentre inúmeros desenvolvidos caracterizando o comportamento de fratura frágil de aços estruturais.

Trabalhos relacionados a comportamento eletroquímico de materiais

A relação entre microestrutura, transformação de fases e comportamento eletroquímico de materiais metálicos está presente nos trabalhos do bolsista deste relatório desde seus trabalhos de mestrado e doutorado ^(13,14), e alguns trabalhos do triênio 2011-2013 versaram sobre este tema. Excetuando-se os trabalhos relacionados a aços inoxidáveis (que serão abordados nos itens subsequentes), podem ser destacados dois trabalhos publicados em periódicos ^(15,16) e dois em anais de congressos ^(17,18) versando sobre

transformações de fase e comportamento eletroquímico de ligas CuNiAlFe.

Trabalhos relacionados a transformações de fase em ligas metálicas

O conhecimento em transformações de fase desenvolvido na linha principal de pesquisa permite ao proponente atuar em estudos de transformações de fase não só de aços inoxidáveis dúplex, mas também no estudo das transformações de fase e microestruturas relacionadas a outros tipos de aços inoxidáveis e aços em geral. No triênio 2011-2013, nesta linha de trabalho, foram publicados sete trabalhos completos em anais de eventos ⁽¹⁹⁻²⁵⁾, um resumo expandido em anais ⁽²⁶⁾, sendo que destes cinco foram trabalhos colaborativos ou com a Escola Politécnica da USP ou com a empresa Heat Tech. Foram ainda orientados cinco trabalhos de conclusão de curso de graduação em engenharia de materiais ⁽²⁷⁻³¹⁾ relacionados à transformação de fases em ligas metálicas.

Trabalhos relacionados a transformações de fase em aços inoxidáveis dúplex

O trabalho de simulação computacional das transformações de fase em aços inoxidáveis dúplex, alvo principal de pesquisa previsto para o triênio 2011-2013, se mostrou absolutamente dependente do estudo minucioso dos mecanismos de transformação de fase, e da caracterização quantitativa das microestruturas formadas, e este marcou as principais produções realizadas por este bolsista no triênio, resultando em três artigos publicados em periódicos ⁽³²⁻³⁴⁾ e outros dois já aceitos para publicação em periódicos ^(35,36), além de vinte e um trabalhos em anais de congressos nacionais e internacionais ⁽³⁷⁻⁵⁷⁾ e seis resumos expandidos em anais de congressos. Estes trabalhos resultaram de intensa interação com alunos de graduação em engenharia de materiais, já que no período concluíram-se as orientações de uma iniciação científica ⁽⁶⁴⁾ e três trabalhos de conclusão de curso de graduação ⁽⁶⁵⁻⁶⁷⁾, sendo que destes, três geraram parte das publicações anteriormente mencionadas. Além disso, as publicações já mencionadas foram produzidas com alunos orientados de iniciação científica em período anterior ao triênio em questão, e foram também produzidas através da interação com orientados de mestrados concluídos na FEI anteriormente ao triênio 2011-2013. Desta relação com orientados, foi possível ter, no triênio, a orientação de três antigos orientados de iniciação científica e/ou trabalhos de conclusão de curso de graduação como mestrados no programa da FEI, mestrados estes que devem terminar seus trabalhos em 2014. Além destas três orientações de mestrado na FEI, o proponente coorienta três trabalhos de doutorado junto ao ITA, sendo que os três doutorandos foram orientados pelo proponente nos seus trabalhos de mestrado na FEI e trabalham em temas intimamente ligados às transformações de fase em aços inoxidáveis dúplex, conduzindo toda a parte experimental de suas teses na FEI, com orientação deste proponente. Duas destas teses foram defendidas ainda em 2013 ^(68,69), e a terceira deve ser defendida no primeiro semestre de 2015.

2. SÍNTESE DA BIBLIOGRAFIA FUNDAMENTAL.

Aços inoxidáveis dúplex são amplamente utilizados em situações que demandem a combinação de alta resistência mecânica, alta tenacidade e grande resistência à corrosão⁽⁷⁰⁻⁷⁴⁾. De modo geral, afirma-se^(75,76) que a resistência à corrosão por pite nos aços dúplex solubilizados é função da composição química, e a resistência à corrosão por pite (ou a modificação do potencial de início destes para valores mais nobres) cresce com o aumento do “índice de pite”, dado normalmente por $IP = (\%Cr + 3,3.\%Mo + 16.\%N)$. Assim, a existência de regiões nestes aços com teores diversos de Cr, Mo e N, ou regiões empobrecidas ou enriquecidas nestes elementos resultantes de transformações de fases, pode causar alterações significativas na resistência à corrosão destes materiais.

Durante envelhecimento isotérmico, determinadas sequências de tratamento térmico, conformação a quente ou soldagem, pode ocorrer nos aços inoxidáveis dúplex a precipitação de fases indesejáveis, que causam a redução da resistência à corrosão anteriormente mencionada, devido a formação de regiões empobrecidas particularmente em Cr e Mo, e também alterações significativas de propriedades mecânicas. Particularmente entre 600°C e 950°C pode ocorrer a formação de fase sigma, por três mecanismos distintos: como produto da decomposição eutetóide da ferrita original (gerando também austenita secundária), através de nucleação e crescimento a partir da ferrita original, e a partir da austenita presente, após o total consumo da ferrita, sendo que a nucleação de fase sigma ocorre preferencialmente de forma heterogênea nas interfaces ferrita-austenita e contornos de grão ferrita-ferrita, sendo comum o total consumo da ferrita presente para a formação de fase sigma^(77,78). A redução da resistência à corrosão que ocorre devido ao empobrecimento em cromo e molibdênio da matriz metálica onde as transformações ocorreram, e a fragilização causada por pequenas frações volumétricas de fase sigma na microestrutura, são amplamente discutidas na literatura^(14,75,77, 79,80).

Na literatura⁽⁸¹⁻⁸³⁾ encontram-se dados que descrevem a cinética de formação de fase sigma entre 800°C e 850°C de dois aços inoxidáveis superdúplex e um dúplex. Nota-se que há grande variação de resultados, que provavelmente devem estar relacionados à fração de ferrita presente nos aços dúplex (o que pode alterar a composição química da ferrita, alterando a formação de fase sigma a partir desta fase) ou à quantidade de contornos de grão e/ou interfaces ferrita/austenita presentes, podendo afetar o número de sítios de nucleação de fase sigma, o que também afetaria a cinética de formação desta fase.

Deste modo, torna-se fundamental estudar a formação de fase sigma a partir de simulações computacionais, visando à previsão das alterações microestruturais (fração de sigma e grau de empobrecimento em Cr e Mo das regiões adjacentes à fase sigma) após determinados históricos térmicos, prevendo o desempenho de diferentes materiais em uso.

3. TRABALHOS DO GRUPO DE PESQUISA DO BOLSISTA.

Trabalho recentemente publicado pelo proponente deste projeto ⁽³⁷⁾ relata de forma resumida as dificuldades de previsão das alterações microestruturais no envelhecimento de aços inoxidáveis dúplex através de simulações computacionais. A Figura 1 mostra as frações de equilíbrio calculadas para um aço inoxidável superdúplex UNS S32750 a partir da base de dados TCFE6 do ThermoCalc. Percebe-se que a previsão das frações de ferrita e austenita na região de solubilização (no campo bifásico ferrita – austenita) traz resultados bastante satisfatórios quando comparados aos medidos por técnicas de magnetização (ferritoscópio, em microestruturas como a apresentada na Figura 2.a), ao passo que a previsão da fração de fase sigma a 950°C apresenta sérias discrepâncias com relação aos dados experimentais, neste caso obtidos por estereologia quantitativa das amostras observadas por microscopia óptica (MO) após ataque eletrolítico em solução 10% KOH a 2 Vcc por 1 min (que gera imagens como a da Figura 2.b).

Uma das causas para tal discrepância pode resultar da técnica de caracterização quantitativa de fase sigma. Diferentes estudos deste proponente ^(32,35,38,42,45,51,52,57) e de outros autores ⁽⁸⁴⁾ mostram que o uso de imagens obtidas em microscopia eletrônica de varredura, de elétrons retroespalhados (MEV-BSC), permite a distinção entre fases sigma, chi e nitretos de cromo, como mostra a Figura 3.a, e que esta técnica revela valores de fração de fase sigma inferiores aos obtidos pela estereologia de imagens de microscopia óptica (MO) após ataque eletrolítico seletivo a fase sigma na solução 10% KOH a 2 Vcc por 1 min, como demonstra a Figura 3.b; a Figura 3.a também ilustra a complexidade morfológica e geométrica da fase sigma que pode se formar nos aços inoxidáveis dúplex.

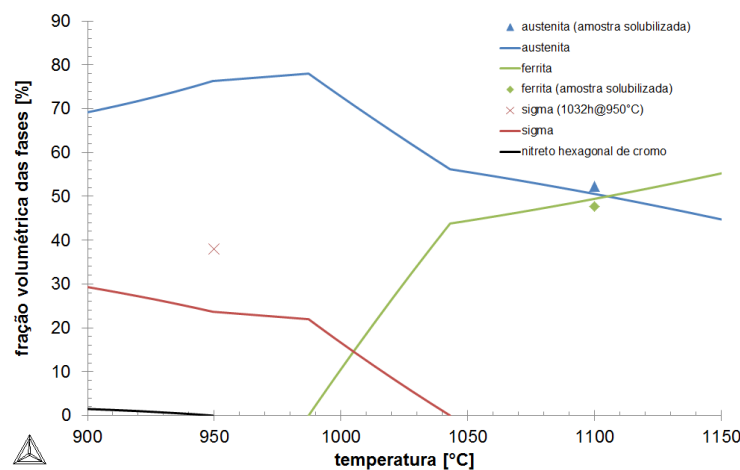


Figura 1. Frações volumétricas das fases calculadas para um aço UNS S32750 com o auxílio de Thermo-Calc, e valores experimentais de referência ⁽³⁷⁾.

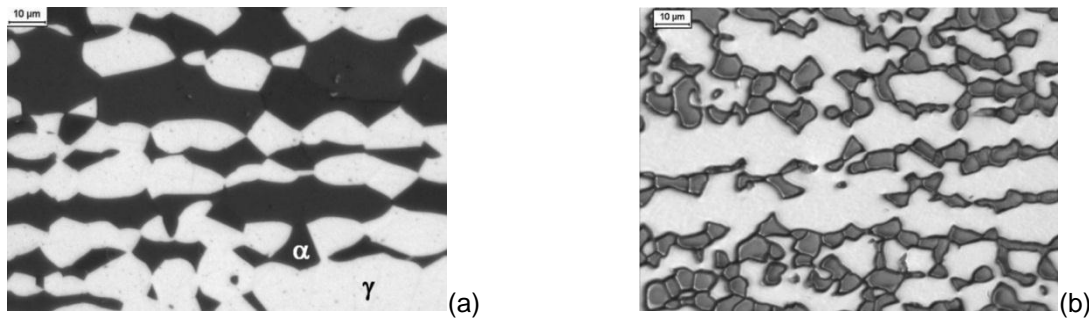


Figura 2. Microestrutura do aço UNS S32750 (a) solubilizado a 1100°C por 30 minutos após ataque de Beraha modificado e em (b) após envelhecimento a 950°C por 1032 h após ataque eletrolítico em solução 10% KOH a 2 Vcc por 1min. Microscopia óptica ⁽³⁷⁾.

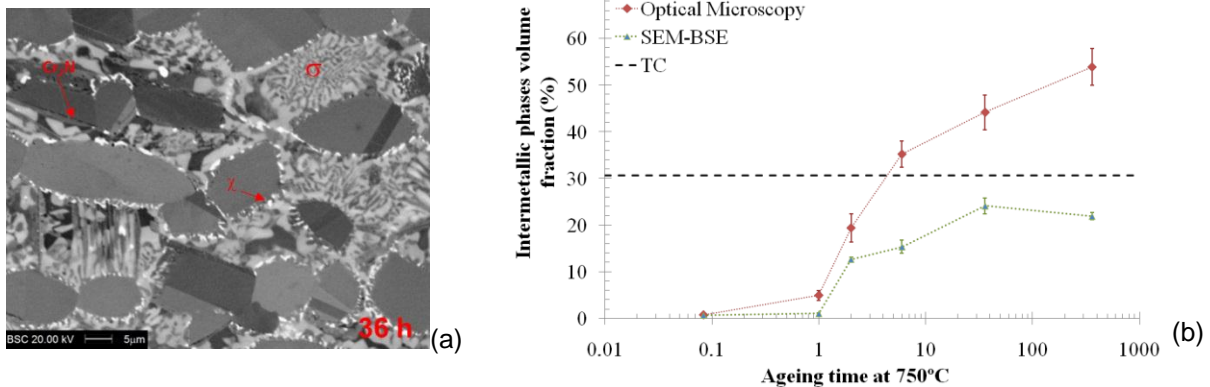


Figura 3. (a) Microestrutura do aço UNS S31803 após envelhecimento a 700°C por 36 h, MEV-BSC ⁽⁴²⁾; (b) comparação das frações de fase intermetálica (sigma e chi) determinadas em imagens de MO e MEV-BSC após envelhecimento a 750°C de aço UNS S31803 ⁽⁵⁷⁾.

No mesmo trabalho recentemente publicado pelo proponente desta proposta ⁽³⁷⁾ modelos cinéticos de previsão de transformações de fase envolvendo fase sigma são apresentados. Verificou-se que a ferramenta implementada com o software DiCTra e a base de dados difusional MOB2 é capaz de descrever os instantes iniciais de formação da fase ao supor que sigma nucleia heterogeneamente nas interfaces ferrita-austenita, mas que por conta desta geometria o reequilíbrio entre ferrita e austenita é impedido, não levando ao total consumo de ferrita nem à correta previsão da fração total de sigma a formar, como mostra a Figura 4.

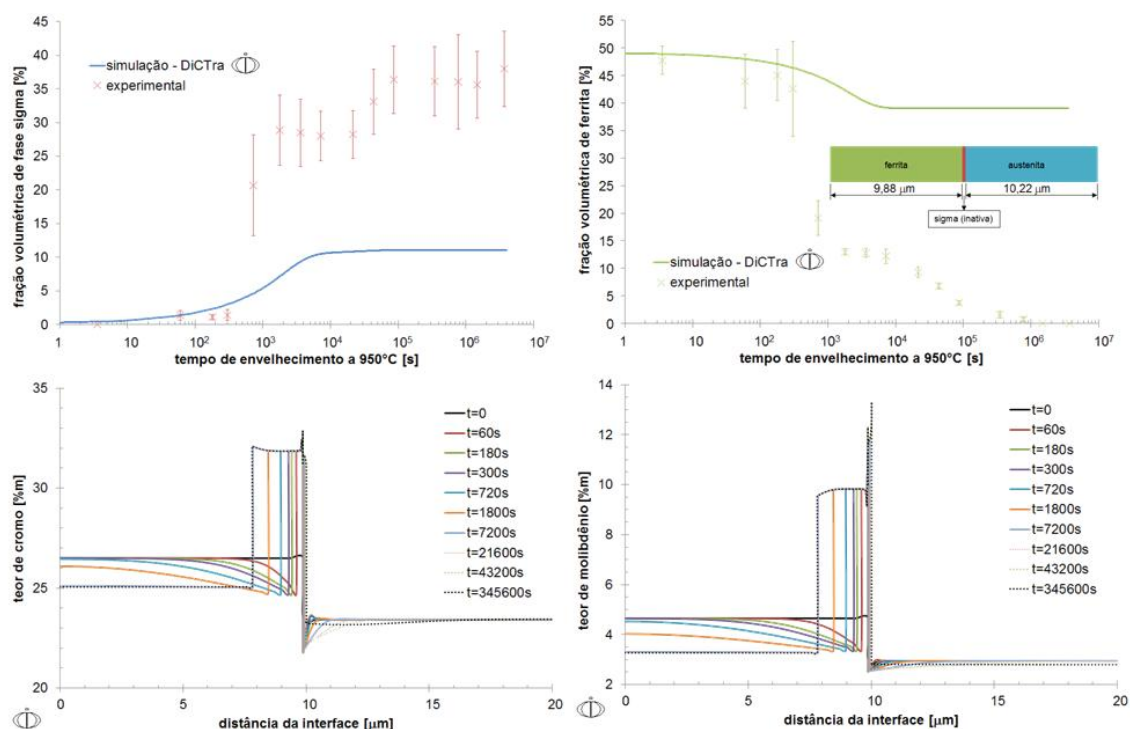


Figura 4. Resultados de fração volumétrica de sigma e ferrita obtidos por simulações em DiCTra do envelhecimento a 950°C do aço UNS S32750 segundo o modelo de 20 μm de comprimento total, e perfis de Cr e Mo nas interfaces ferrita-sigma-austenita decorrentes. As frações experimentais de ferrita foram obtidas por medidas magnéticas auxiliadas por ferritoscópio, e as medidas de fração de fase sigma experimentais foram obtidas por estereologia quantitativa de imagens de MO⁽³⁷⁾.

A Figura 5 apresenta novo modelo proposto, que adota outra geometria de simulação e dois tamanhos distintos de célula computacional total, comparando os resultados experimentais de fração de fase sigma obtidos por estereologia quantitativa de imagens de MEV-BSC às simulações dos modelos A-S-F (já apresentado na Figura 4) com o modelo A-F-S (onde há contato entre ferrita e austenita, permitindo o equilíbrio entre estas fases) e o modelo A-F-S meio, que apresenta metade da célula computacional total se comparado aos anteriores. Estes resultados preliminares mostram que diferentes geometrias de células computacionais, relacionadas a diferentes mecanismos e morfologias de formação de fase sigma, podem retornar diferentes resultados nas simulações e, portanto, o conhecimento aprofundado das diferentes transformações de fase e seus mecanismos é fundamental antes do estabelecimento de rotinas seguras e confiáveis de simulação.

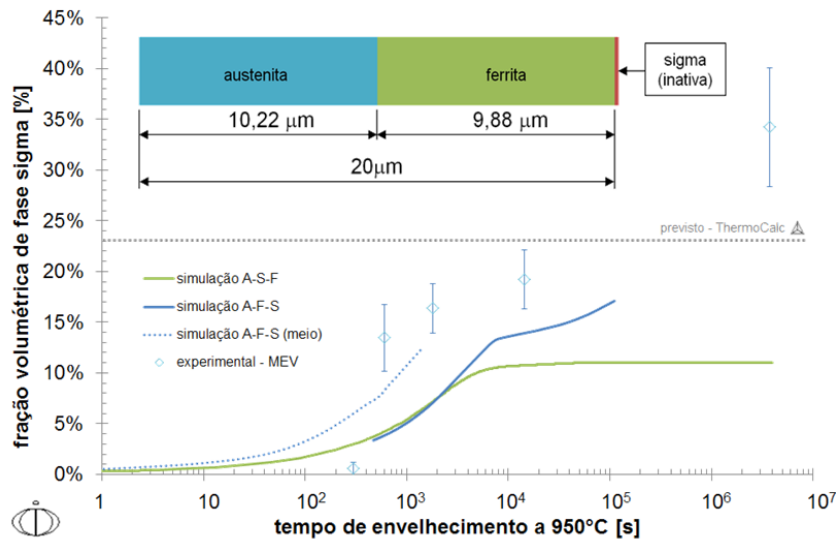


Figura 5. Resultados de fração volumétrica de sigma e ferrita obtidos por simulações em DiCTra do envelhecimento a 950°C do aço UNS S32750 segundo diferentes modelos computacionais, comparados a medidas de fração de fase sigma experimentais obtidas por estereologia quantitativa de imagens de MEV-BSC.

Trabalhos desenvolvidos em conjunto com doutoranda ⁽⁶⁸⁾ coorientada pelo proponente deste projeto mostram diferentes caminhos a seguir no esclarecimento dos mecanismos de formação de fase sigma. Sabendo que esta formação pode ser descrita por uma expressão do tipo Johnson-Mehl-Avrami (JMA), como mostrada na Eq. 1, onde f é a fração de fase sigma formada ($0 < f < 1$) após um envelhecimento isotérmico por um período de tempo t , com k definido na Eq. 2, onde Q_σ é a energia de ativação para formação de fase sigma, R é a constante universal dos gases ($8,31 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$), e n é o chamado de expoente de Avrami, cujos diferentes valores poderiam ser relacionados a diferentes geometrias da fase sigma em formação: considerando que o número de núcleos presentes é proporcional à primeira potência do tempo, e seus respectivos volumes são relacionados à terceira potência, ter-se-á para o volume total transformado a dependência da quarta potência do tempo ($n=4$), válida para o crescimento tridimensional das partículas, chamado também de pseudoesférico ou poliédrico. Com a mudança na forma dos núcleos, o volume total transformado poderia se relacionar também ao crescimento bidirecional na forma de placas ($n=3$), unidirecional na forma acicular ($n=2$), ou independente da forma das partículas ($n=1$), resultando em diferentes inclinações para a curva sigmoideal da fração de sigma em função do tempo de envelhecimento, como mostra a Figura 6. Assim, a definição da morfologia de crescimento da fase sigma, e da geometria do sistema, pode ajudar a melhor descrever o modelo cinético que levará a simulação em DiCTra com maior aderência aos resultados experimentais.

$$f = 1 - e^{(-k.t^n)} \quad \text{Eq. 1}$$

$$k = k_o \cdot e^{\left(\frac{-Q_\sigma}{R.T}\right)} \quad \text{Eq. 2}$$

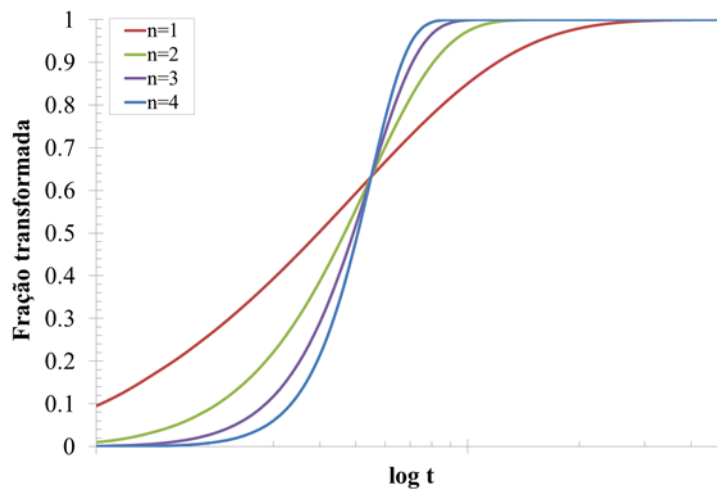


Figura 6. Influência da geometria de crescimento dos núcleos na forma da curva sigmoidal descrita pela Eq. 1.

A influência da microestrutura original pré-envelhecimento (ou pós-solubilização) também pode ter influência significativa nos mecanismos e cinética de transformação de fases dos aços inoxidáveis dúplex. O mesmo trabalho de doutorado coordenado pelo proponente e já mencionado ⁽⁶⁸⁾ compara as curvas Tempo-Temperatura-Precipitação de aços UNS S31803, inicialmente solubilizados de maneiras distintas, e mostrando diferentes cinéticas de formação para a fase sigma, como mostra a Figura 7. Além disso, este trabalho de doutoramento indica dois mecanismos principais nas etapas de nucleação de fase sigma, sendo o de decomposição eutetóide da ferrita para temperaturas superiores a 800°C e precipitação direta da ferrita em temperaturas mais baixas.

Considerando as informações aqui descritas, o correto modelamento computacional das transformações de fase dos aços inoxidáveis dúplex apresenta-se como um problema complexo, onde são necessárias as definições: i) dos mecanismos de formação de fase sigma e outras fases como chi e nitretos de cromo, ii) das possíveis morfologias de nucleação e crescimento, e iii) das microestruturas originais onde os fenômenos de nucleação e crescimento ocorrerão. Deste modo, os desafios dessa linha de pesquisa, que serão detalhados na sequência, versam sobre o profundo entendimento das transformações de fase nos aços inoxidáveis dúplex, fornecendo o arcabouço necessário para a simulação computacional destas transformações e, com a possibilidade de previsão das microestruturas, se ter o desenvolvimento de novas ligas ou de novos processos de fabricação para estes materiais.

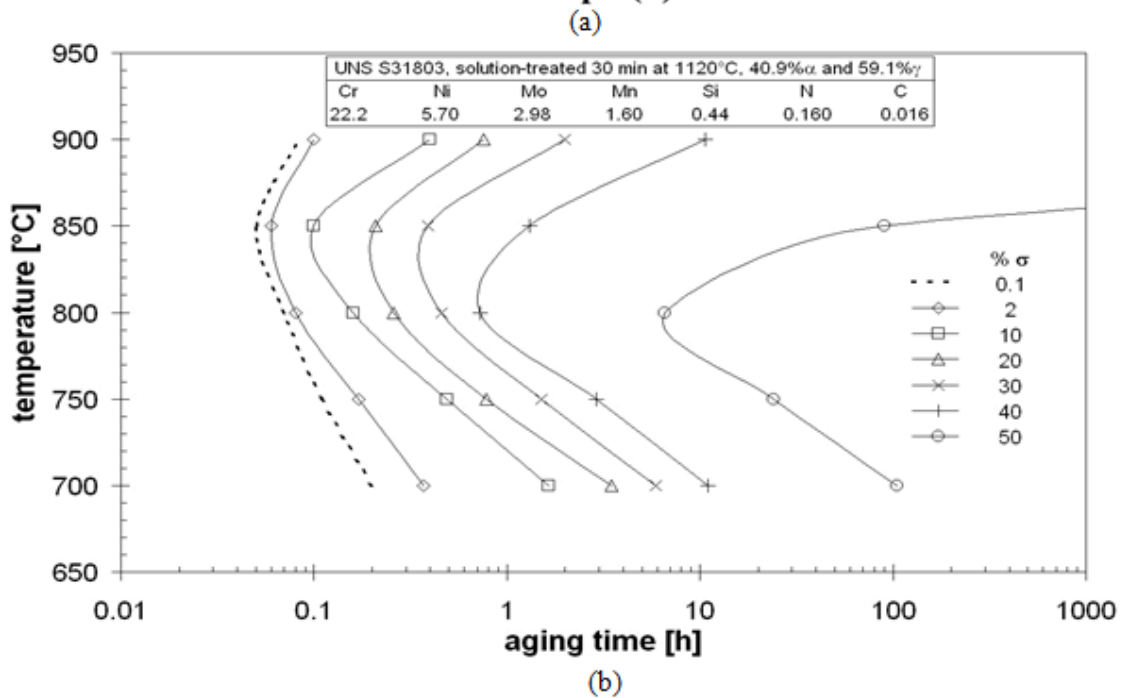
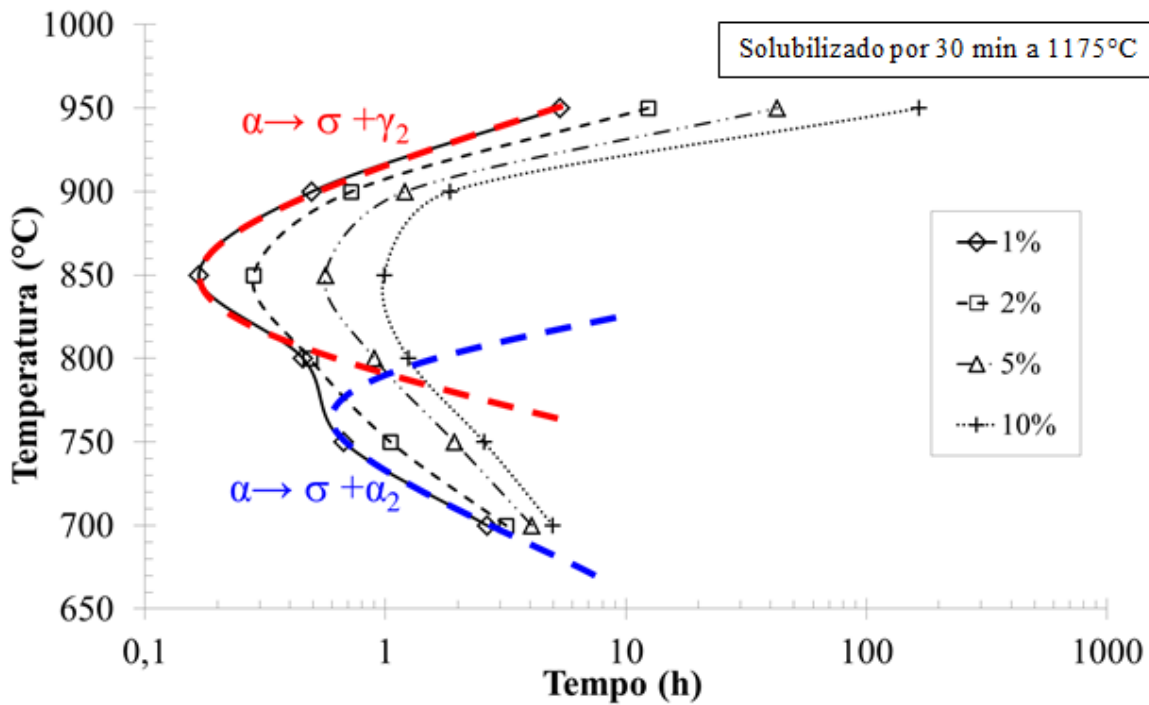


Figura 7. Diagramas Tempo-Temperatura-Precipitação para o aço UNS S31803 entre 700°C e 900°C obtidos (a) por Santos⁽⁶⁸⁾ e (b) por Magnabosco⁽⁷⁶⁾.

4. DESAFIOS DA LINHA DE PESQUISA – TRIÊNIO 2014-2016.

Os desafios envolvidos a simulação computacional das transformações de fase em aços inoxidáveis dúplex são inúmeros, e dependem de claro conhecimento de todas as transformações de fase envolvidas nas etapas de fabricação de aços inoxidáveis dúplex, desde sua obtenção a partir do estado líquido até os tratamentos de solubilização e possíveis transformações pós-solubilização. Só com o arcabouço conceitual das transformações, entendendo-se os mecanismos e morfologias envolvidos, será possível a criação de modelos computacionais que permitam a previsão destas microestruturas, permitindo o desenvolvimento de novas ligas ou de novos processos de fabricação para estes materiais. Assim, para o próximo triênio de trabalho podem ser listadas quatro frentes de trabalho, com objetivos específicos, para se sistematizar o conhecimento de todas as transformações de fase envolvidas nas etapas de fabricação de aços inoxidáveis dúplex:

i. Compreensão das transformações de fase envolvidas na solidificação de aços inoxidáveis dúplex, a partir da elaboração de ligas lean-dúplex (baixo Ni) com diferentes adições de Nb, verificando a possibilidade de controle de tamanho de grão ferrítico e austenítico nas etapas de formação de estrutura a partir do líquido, e durante solubilização e tratamentos termomecânicos subsequentes, a partir das experiências inicialmente conduzidas no grupo de pesquisa do proponente ^(40,67).

ii. Avaliação do efeito das variáveis de tempo e temperatura de solubilização na formação da estrutura dúplex de aços lean-dúplex, dúplex e superdúplex, analisando fração de fases formadas, e quantificando tamanhos de grão e pontos para possível nucleação heterogênea em ciclos térmicos pós-solubilização, continuando trabalhos já desenvolvidos pelo grupo ^(48,55,61-63).

iii. Avaliação da possível transformação martensítica reversa induzida por deformação (TMRID) de ferrita em austenita observada em alguns trabalhos do grupo ^(41,43,44,49,56,59,61,64,66).

iv. Determinação dos mecanismos de transformações de fase pós-solubilização, por exemplo, durante envelhecimentos isotérmicos, permitindo a criação de modelos computacionais de transformação de fase em DiCTRa para a previsão de microestruturas em aços inoxidáveis dúplex, superdúplex e hiperdúplex, em continuidade ao extenso trabalho já desenvolvido pelo grupo de pesquisa do proponente deste projeto ^(32-39,42,45-47,50-55,57-60,78-80), particularmente com o estudo da formação de fase sigma.

4.1. METODOLOGIA

Pode se dividir as atividades necessárias ao cumprimento dos objetivos propostos em quatro grandes grupos de trabalho, com os quais as pesquisas se desenvolverão com o envolvimento de doutorandos, mestrandos e alunos de graduação (tanto em projetos de iniciação científica quanto em trabalhos de conclusão de curso). Na sequência os quatro grupos de trabalho serão tratados de forma resumida, e os cronogramas inicialmente previstos para três anos são apresentados na Tabela 1.

Solidificação: neste grupo de trabalho se procurará o entendimento das transformações de fase envolvidas na solidificação de aços inoxidáveis dúplex. Já há mestrando (João Ricardo Ortega Alves) trabalhando em dissertação de mestrado que versará sobre a elaboração de ligas lean-dúplex (Fe-21Cr-1Ni-5Mn-1Mo-0,11N) com diferentes adições de Nb (de zero a aproximadamente 0,5%), verificando a possibilidade de controle de tamanho de grão ferrítico e austenítico nas etapas de formação de estrutura a partir do líquido. Estudos envolvendo a solubilização e tratamentos termomecânicos subsequentes também estão previstos, com o envolvimento de dois bolsistas de iniciação científica e pelo menos mais um mestrando. Simulações em ThermoCalc utilizando o módulo Scheil são previstas para a simulação das temperaturas liquidus e solidus e avaliação de segregação, e seus resultados serão comparados a medidas de perfis térmicos de solidificação, análise térmica e determinação de composições químicas locais por MEV-EDS.

Solubilização: concentrando esforços no estudo da formação das estruturas dúplex ferrita-austenita e sua caracterização quantitativa, este grupo de trabalho centrará atividades na avaliação das variáveis de tempo e temperatura de solubilização na formação da estrutura dúplex de aço UNS S31803 (adquirido pela FEI como chapa laminada a quente de 3 mm de espessura, com 2 m² disponíveis de material) e de aço UNS S32750 (doado pela Villares a FEI como barra de diâmetro 85 mm e 3,5 m de comprimento). Atualmente, dois trabalhos de conclusão de curso de graduação vêm sendo desenvolvidos nesta linha sob orientação do proponente deste projeto, e pretende-se integrar a este grupo de trabalho dois mestrandos (uma delas já selecionada, Elis Almeida Melo) e dois bolsistas de iniciação científica, visando não só realizar experimentos de solubilização como também criar modelos computacionais em ThermoCalc e DiCTra que permitam a previsão das microestruturas solubilizadas. Cabe ressaltar que os trabalhos deste grupo tem relação estreita com os trabalhos de solubilização e tratamentos termomecânicos descritos no item anterior, e estes se complementam.

Transformação martensítica reversa induzida por deformação (TMRID): atualmente o tema é explorado por um doutorando (Arnaldo Forgas Júnior) e uma mestranda (Julia Marangoni), em trabalhos orientados pelo proponente deste projeto. Enquanto o doutorando explora a caracterização desta transformação na chapa de aço UNS S31803 já descrita, após deformações uniaxiais e após processo de laminação de planos, a mestranda continua os trabalhos iniciados em seus projetos de iniciação científica e trabalho de conclusão de curso de graduação, mas com o estudo da transformação no aço UNS S32750 também já mencionado com deformações uniaxiais de tração ou de compressão. Pelo menos mais um bolsista de iniciação científica será agregado nesta linha de trabalho.

Fase sigma: O estudo de formação de fase sigma e outras fases deletérias, como chi e nitretos de cromo, vêm sendo desenvolvido por duas recém-doutoras^(68,69) (Daniella Caluscio dos Santos, que já faz parte do corpo docente da FEI, e Evelin Barbosa de Mélo), um mestrando (Fernando Maraccini Rabechini) e uma bolsista de iniciação científica (Mariana Bortoletto Paschoal). As recém-doutoras continuarão a fazer parte da equipe de trabalho, e pretende-se agregar ainda mais dois mestrandos e três bolsistas de iniciação científica para explorar as morfologias de formação de fase sigma, mecanismos de transformação de fases, técnicas de quantificação das fases presentes, explorando MEV e difração de raios-X, e modelos computacionais em DiCTra e Prisma para prever a formação das estruturas e sua relação com as microestruturas de origem, interligando os diferentes temas dos grupos de trabalho aqui descritos.

Tabela 1. Cronograma previsto para os quatro grupos de trabalho deste projeto.

Grupo de trabalho	Subprojeto	2014	2015	2016
Solidificação	Mestrado João R. O. Alves			
	Novo mestrando			
	Nova iniciação científica			
	Nova iniciação científica			
Solubilização	Novo mestrando			
	Novo mestrando			
	Nova iniciação científica			
	Nova iniciação científica			
	Novo trabalho de conclusão			
	Novo trabalho de conclusão			
TMRID	Doutorado Arnaldo Forgas Jr.			
	Mestrado Júlia Marangoni			
	Nova iniciação científica			
Fase Sigma	Mestrado Fernando M. Rabechini			
	IC Mariana B. Paschoal			
	Mestrado Elis Almeida Melo			
	Novo mestrando			
	Nova iniciação científica			
	Nova iniciação científica			
	Nova iniciação científica			

REFERÊNCIAS

1. A. A. Morandim-Giannetti, T. S. Albuquerque, R. K. C. Carvalho, R. M. S. Araújo, R. Magnabosco. Study of napier grass delignification for production of cellulosic derivatives. *Carbohydrate polymers*, v. 92, p. 849-855, 2013.
2. S. H. P. Bettini, M. C. Antunes, 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*, 2013.
3. S. H. P. Bettini, M. C. Antunes, R. Magnabosco. Investigation on the effect of a compatibilizer on the fatigue behavior of PP/coir fiber composites. *Polymer engineering and science*, 2011.
4. A. A. Morandim-Giannetti, J. A. M. Agnelli, B. Z. Lanças, R. Magnabosco, S. A. Casarin, S. H. P. Bettini. Lignin as additive in polypropylene/coir composites: thermal, mechanical and morphological properties. *Carbohydrate polymers*, v. 87, p. 2563-2568, 2011.
5. 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... p. 46-55.
6. S. H. P. Bettini, B. Z. Lanças, A. C. Biteli, R. Magnabosco, J. A. M. Agnelli, A. A. Morandim-Giannetti. Investigação do efeito da incorporação de lignina nas propriedades mecânicas e ópticas de compósitos de polipropileno e fibras de coco. in: 11° Congresso Brasileiro de Polímeros, 2011, Campos do Jordão
7. D. V. O. Moraes. Avaliação de propriedades de fadiga de compósitos de polipropileno reforçado com fibras de coco. 2013. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica) - Centro Universitário da FEI, orientador: R. Magnabosco.
8. T. M. Fonseca Jr, R. Magnabosco. Evaluation of methods for estimating fatigue properties applied to stainless steels and aluminum alloys. *Tecnologia em metalurgia, materiais e mineração* (impresso), v. 9, p. 284-293, 2012.
9. G. F. Batalha, A. Farias, R. Magnabosco, S. Delijaicov, M. Adamiak, L. A. Dobrzanski. Evaluation of an AlCrN coated FSW tool. *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*, v. 55, p. 607-615, 2012.
10. A. Farias, G. F. Batalha, E. F. Prados, R. Magnabosco, S. Delijaicov. Tool wear evaluations in friction stir processing of commercial titanium Ti-6Al-4V. *Wear* (Lausanne), v. 302, p. 1327-1333, 2012.
11. K. C. Gouveia. Investigação dos métodos de determinação da temperatura de transição dúctil-frágil (TTDF) utilizando ensaio de impacto Charpy. 2013. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica) - Centro Universitário da FEI, orientador: R. Magnabosco.
12. R. Magnabosco, L. C. Rossetto. Toughness of two hsla steel sheets. *Journal of the brazilian society of mechanical sciences and engineering* (impresso), Rio de Janeiro, v. XXV, n.2, p. 170-173, 2003.
13. R. Magnabosco. Estudo do comportamento eletroquímico do aço AISI M2 em NaOH utilizando técnicas de polarização potenciodinâmica e potenciostática. 133p. Dissertação (mestrado em engenharia) - departamento de engenharia metalúrgica e de materiais, Universidade de São Paulo, 1996.
14. R. Magnabosco. Influência da microestrutura no comportamento eletroquímico do aço inoxidável UNS S31803 (SAF 2205). 2001. 181 p. Tese (doutorado em engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2001.
15. R. C. N. Liberto, R. Magnabosco, N. Alonso-Falleiros. Corrosão por pite em condição erosiva da liga Cu10Ni-3Al-1,3Fe envelhecida a 550°C em meio contendo sulfato. *Tecnologia em metalurgia, materiais e mineração* (impresso), v. 9, p. 173-181, 2012.
16. R. C. N. Liberto, R. Magnabosco, N. Alonso-Falleiros. Selective corrosion of 550°C aged Cu10Ni-3Al-1.3Fe alloy in NaCl aqueous solution. *Corrosion science*, p. 1976-1982, 2011.
17. R. C. N. Liberto, R. Magnabosco, N. Alonso-Falleiros. Corrosão por pite em condição erosiva da liga Cu10Ni-3Al-1,3Fe envelhecida a 550°C, em 0,0001M Na₂S.9H₂O. in: 66 Congresso ABM, 2011, São Paulo. Anais... p. 2426-2437.
18. R. C. N. Liberto, R. Magnabosco, N. Alonso-Falleiros. Corrosão por pite em condição erosiva da liga Cu10Ni-3Al-1,3Fe envelhecida a 550°C, em 0,01M Na₂SO₄. in: 66 Congresso ABM, 2011, São Paulo. Anais... p. 2306-2316.
19. A. Almeida, F. J. G. Landgraf, R. Magnabosco, H. Goldenstein. Detecção da transformação da austenita por deformação plástica em aços para gasodutos classe API 5L X80 através de medidas magnéticas. in: 68° Congresso anual da ABM, 2013, Belo Horizonte. Anais... p. 761-772.

20. E. Corassini, R. Magnabosco. Influência do grau de encruamento e tratamentos térmicos de recozimento nas propriedades mecânicas do aço ABNT 1006. in: 68° Congresso anual da ABM, 2013, Belo Horizonte. Anais... p. 1-10.
21. C. F. Vendramine, R. Magnabosco. Levantamento da curva TTT do aço 15B30 com análise dos constituintes ferrita e perlita. in: 68° Congresso anual da ABM, 2013, Belo Horizonte. Anais... p. 303-313.
22. R. Magnabosco, T. C. Verissimo. Levantamento experimental da curva TTT do aço AISI 15B30 - zona bainítica. in: 68° Congresso anual da ABM, 2013, Belo Horizonte. Anais... p. 733-741.
23. A. P. Tschiptschin, R. Magnabosco, C. E. Pinedo. Uso da técnica de raios-X com ângulo rasante para a caracterização da superfície cementada sob plasma em um aço inoxidável austenítico tipo 316L. in: 68° Congresso anual da ABM, 2013, Belo Horizonte. Anais... p. 3841-3850.
24. A. Almeida, F. J. G. Landgraf, R. Magnabosco, H. Goldenstein. Monitoramento da transformação de fase induzida por deformação em aços para gasodutos classe API 5L X80 por medidas magnéticas. in: 67th ABM international congress, 2012. Anais... p. 1634-1644.
25. A. A. Prado, C. E. Pinedo, R. Magnabosco. Efeito da temperatura de nitretação sob plasma na microestrutura do aço inoxidável martensítico AISI 420. in: 67th ABM international congress, 2012. Anais... p. 2565-2574.
26. A. Almeida, F. J. G. Landgraf, H. Goldenstein, R. Magnabosco. Evaluation of austenite transformation from m/a constituent in grade X80 pipeline steel under plastic deformation. in: X encontro da SBPMat, 2011, Gramado.
27. C. B. Stecca. Influência do grau de encruamento no tratamento térmico do aço bifásico (dp600). 2012. Trabalho de Conclusão de Curso. (graduação em engenharia de materiais) - Centro Universitário da FEI. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
28. C. F. Vendramine. Levantamento da curva TTT do aço 15B30 com análise dos constituintes ferrita e perlita. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso. (graduação em engenharia de materiais) - Centro Universitário da FEI. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
29. E. Corassini. Influência do grau de encruamento e tratamentos térmicos de recozimento nas propriedades mecânicas do aço ABNT 1006. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso. (graduação em engenharia de materiais) - Centro Universitário da FEI. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
30. T. C. Verissimo. Levantamento experimental da curva TTT do aço AISI 15B30 - zona bainítica. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso. (graduação em engenharia de materiais) - Centro Universitário da FEI. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
31. J. C. G. Solé. Influência da solda no comportamento mecânico do tubo composto de SANICRO (R) 28 e aço HT8. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso. (graduação em engenharia de materiais) - Centro Universitário da FEI. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
32. R. Magnabosco, D. C. dos Santos. Intermetallic phases formation during short aging between 850°C and 950°C of a superduplex stainless steel. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 1, p. 71-74, 2012.
33. R. Magnabosco, C. C. Ávila, F. M. Rabechini. Influência do trabalho a frio na formação de fase sigma em aço inoxidável dúplex. *Tecnologia em metalurgia, materiais e mineração* (impresso), v. 9, p. 190-196, 2012.
34. T. F. Fontes, R. Magnabosco, M. Terada, A. F. Padilha, I. Costa. Corrosion versus mechanical tests for indirect detection of alpha prime phase in UNS S32520 super duplex stainless steel. *Corrosion* (Houston, Tex.), v. 67, p. 045004, 2011.
35. D. C. dos Santos, R. Magnabosco, C. Moura-Neto. Influence of sigma phase formation on pitting corrosion of an aged UNS S31803 duplex stainless steel. *Corrosion* (Houston, Tex.), 2013.
36. E. B. Mélo, R. Magnabosco, C. Moura-Neto. Influence of the microstructure on the degree of sensitization of a duplex stainless steel UNS S31803 aged at 650°C. *Materials Research* (São Carlos), 2013.
37. R. Magnabosco ; R. L. S. Pacca. Simulação da cinética de formação de fase sigma durante o envelhecimento isotérmico a 950°C de aço inoxidável superdúplex. in: 68° Congresso anual da ABM, 2013, Belo Horizonte. Anais... p. 3559-3568.
38. L. C. Morais, D. C. Santos, R. Magnabosco. Estudo do grau de sensibilização do aço inoxidável UNS S31803 por ensaios de reativação potenciodinâmica de duplo loop. in: 68° Congresso anual da ABM, 2013, Belo Horizonte. Anais... p. 146-157.
39. L. C. Valeriano, E. O. Correa, N. A. Mariano, R. Magnabosco. Influência dos tratamentos térmicos de solubilização e de envelhecimento na microestrutura do aço inoxidável superduplex UNS S32520. in: 68° Congresso anual da ABM, 2013, Belo Horizonte. Anais... p. 1822-1832.

40. J. R. O. Alves, R. Magnabosco. estudo de uma rota de processamento para obtenção de aços inoxidáveis dúplex. in: 68° Congresso anual da ABM, 2013, Belo Horizonte. Anais... p. 56-67.
41. J. Marangoni, R. Magnabosco. Avaliação da transformação de ferrita em austenita induzida por deformação em aço inoxidável dúplex através de medidas de densidade. in: 68° Congresso anual da ABM, 2013, Belo Horizonte. Anais... p. 193-201.
42. D. C. Santos, R. Magnabosco, C. Moura-Neto. Estudo dos mecanismos e da cinética de formação de fase sigma no aço inoxidável dúplex UNS S31803 envelhecido a 700°C. in: 68° Congresso anual da ABM, 2013, Belo Horizonte. Anais... p. 68-79.
43. J. Marangoni, R. Magnabosco. investigação da transformação de ferrita em austenita induzida por deformação em aço inoxidável dúplex. in: 67th ABM international congress, 2012. Anais... p. 898-905.
44. A. Forgas-Jr., R. Magnabosco, C. Moura-Neto, D. B. Tavares. Transformação da ferrita em austenita em um aço inoxidável dúplex submetido a carregamento uniaxial. in: 67th ABM international congress, 2012. Anais... p. 855-865.
45. D. C. Santos, R. Magnabosco, C. Moura-Neto. Influência do método de quantificação de fases na análise da formação de sigma em aço inoxidável dúplex UNS S31803. in: 67th ABM international congress, 2012. Anais... p. 279-290.
46. L. C. Morais, D. C. Santos, R. Magnabosco. Estudo exploratório do grau de sensibilização do aço inoxidável UNS S31803 através da técnica de reativação potenciodinâmica de duplo loop. in: 67th ABM international congress, 2012. Anais... p. 246-257.
47. R. Magnabosco, C. C. M. Silva. Avaliação das transformações de fase em aço inoxidável superdúplex durante envelhecimento entre 300 e 500°C através de medidas de microdureza. in: 66° Congresso ABM, 2011. Anais... p. 900-909.
48. R. Magnabosco ; L. A. L. Z. Pupin. Influência do tempo e da temperatura de solubilização na formação da microestrutura dúplex do aço UNS S31803. in: 66° Congresso ABM, 2011. Anais.... p. 862-870.
49. R. Magnabosco, C. C. Ávila, F. M. Rabechini. Influência do encruamento na cinética de formação de fase sigma em aço inoxidável dúplex. in: 66° Congresso ABM, 2011. Anais... p. 812-820.
50. R. Magnabosco, R. L. S. Pacca. Formação de fases intermetálicas em envelhecimentos entre 550 e 650°C em aço inoxidável superdúplex. in: 66° Congresso ABM, 2011. Anais... p. 844-853.
51. D. C. Santos, R. Magnabosco. Utilização de microscopia eletrônica de varredura na análise quantitativa de fases do aço inoxidável dúplex UNS S31803 envelhecido a 850°C. in: 66° Congresso ABM, 2011. Anais... p. 533-544.
52. R. Magnabosco, D. C. Santos. Formação de fases intermetálicas em envelhecimentos rápidos entre 850 e 950°C em aço inoxidável superdúplex. in: 66° Congresso ABM, 2011. Anais... p. 821-830.
53. E. B. Mélo, R. Magnabosco. Transformações de fase durante o envelhecimento isotérmico a 475°C do aço UNS S31803. in: 66° Congresso ABM, 2011. Anais... p. 803-811.
54. E. B. Mélo, R. Magnabosco, C. Moura-Neto. Phase transformations on an UNS S31803 duplex stainless steel during aging at 650°C and its influence on pitting potentials in a 0.6M NaCl solution. in: 7th European stainless steel conference - science and market, Como. Proceedings. Milão: aim, 2011.
55. R. Magnabosco, S. Spomberg. Comparative study of ferrite quantification methods applied to duplex stainless steels. in: 7th European stainless steel conference - science and market, Como. Proceedings. Milão: aim, 2011.
56. R. Magnabosco, D. B. Tavares, A. Forgas-Jr., C. Moura-Neto. Ferrite-to-austenite transformation during cold working of a duplex stainless steel. in: 7th European stainless steel conference - science and market, Como. Proceedings. Milão: aim, 2011.
57. D. C. Santos, R. Magnabosco. Quantitative analysis of phases in UNS S31803 duplex stainless steel aged at 750°C using scanning electron microscopy. in: 7th European stainless steel conference - science and market, Como. Proceedings. Milão: aim, 2011.
58. C. C. M. Silva, R. Magnabosco. Efeito do envelhecimento entre 300°C e 500°C na microestrutura do aço UNS S32750. in: I SICFEI - Simpósio de iniciação científica, didática e de ações sociais de extensão da FEI, 2011, São Bernardo do Campo.
59. C. C. Ávila, R. Magnabosco. Influência do encruamento e tempo de envelhecimento a 650°C na microestrutura do aço UNS S31803. in: I SICFEI - Simpósio de iniciação científica, didática e de ações sociais de extensão da FEI, 2011, São Bernardo do Campo.

60. F. M. Rabechini, R. Magnabosco. Influência do encruamento e tempo de envelhecimento a 850°C na microestrutura do aço UNS S31803. in: I SICFEI - Simpósio de iniciação científica, didática e de ações sociais de extensão da FEI, 2011, São Bernardo do Campo.
61. J. Marangoni, R. Magnabosco. Investigação da transformação de ferrita em austenita induzida por deformação em aço inoxidável dúplex. in: I SICFEI - Simpósio de iniciação científica, didática e de ações sociais de extensão da FEI, 2011, São Bernardo do Campo.
62. L. A. L. Z. Pupin, R. Magnabosco. Influência do tempo e da temperatura de solubilização na formação da microestrutura dúplex do aço UNS S31803. in: I SICFEI - Simpósio de iniciação científica, didática e de ações sociais de extensão da FEI, 2011, São Bernardo do Campo.
63. S. Spomberg, R. Magnabosco. Uso de difratometria de raios-x na quantificação de ferrita e austenita em aços inoxidáveis dúplex. in: I SICFEI - Simpósio de iniciação científica, didática e de ações sociais de extensão da FEI, 2011, São Bernardo do Campo.
64. J. Marangoni. Investigação da transformação de ferrita em austenita induzida por deformação em aço inoxidável dúplex. 2012. Iniciação científica. (graduando em engenharia de materiais) - Centro Universitário da FEI, orientador: R. Magnabosco.
65. A. G. Cardoso. Comparação da resistência a corrosão por pite em solução 0,6M NaCl entre aços inoxidáveis austeníticos e dúplex. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso. (graduação em engenharia de materiais) - Centro Universitário da FEI. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
66. J. Marangoni. Investigação da transformação de ferrita em austenita induzida por deformação em aço inoxidável dúplex. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso. (graduação em engenharia de materiais) - Centro Universitário da FEI. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
67. J. R. O. Alves. Estudo de uma rota de processamento para obtenção de aços inoxidáveis dúplex. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso. (graduação em engenharia de materiais) - Centro Universitário da FEI. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
68. Daniella Caluscio dos Santos. ESTUDO DAS TRANSFORMAÇÕES DE FASE ISOTÉRMICAS DO AÇO UNS S31803 ENVELHECIDO ENTRE 700°C E 950°C. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, São José dos Campos.
69. Evelin Barbosa de Mélo. INFLUÊNCIA DAS TRANSFORMAÇÕES DE FASE A 475°C E A 650°C NO COMPORTAMENTO ELETROQUÍMICO DO AÇO UNS S31803. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, São José dos Campos.
70. M. L. Erbing, H. L. Groth. Duplex-un'alternativa all'acciaio inossidabile 316 per il risparmio di peso in applicazioni offshore. *L'Acciaio inossidabile*, n. 2, 1993, p. 10-13.
71. J. J. Eckenrod, K. E. Pinnow. Effects of chemical composition and thermal history on the properties of alloy 2205 duplex stainless steel, *New developments in stainless steel technology*, Detroit, 77-87, 1984.
72. J. Nordström, B. Rung. Bollitori e torri di stoccaggio di pasta per carta in acciai inossidabili duplex consentono risparmio di peso e di costi. *L'Acciaio inossidabile*, v. 2, 1995, p. 7-12.
73. B. Leffler. Alloy 2205 for marine chemical tankers. *Materials performance*, 1990, p. 60-63.
74. D. C. Agarwal. Duplex stainless steels – the cost effective answer to corrosion problems of major industries. *Key eng. mater.*, n. 2, v. 20-28, 1988, p. 1677-1692.
75. H. D. Solomon, T. M. Devine Jr., *Duplex stainless steels – a tale of two phases*. in: *Duplex stainless steels – conference proceedings*. ASM, Metals park : Ohio, 1982, p. 693-756.
76. J. Sedriks, *Corrosion of stainless steels*. John Wiley : NY, 1996, 2. ed., p. 47-53.
77. J. O. Nilsson, *Super duplex stainless steels*. *Materials science and technology*, ago. 1992, v. 8, p. 685-700.
78. R. Magnabosco, Kinetics of sigma phase formation in a duplex stainless steel. *Materials research*, v. 12, p. 321-327, 2009.
79. R. Magnabosco, N. Alonso-Falleiros, Pit morphology and its relation to microstructure of 850°C aged UNS S31803 duplex stainless steel. *Corrosion (Houston, Tx)* v. 61, n. 2, p. 130-136, 2005.
80. R. Magnabosco, N. Alonso-Falleiros, Sigma phase and polarization response of UNS S31803 in sulfuric acid. *Corrosion (Houston, Tx)* v. 61, n. 8, p. 807-814.
81. A. Turnbull, P. E. Francis, M. P. Ryan, L. P. Orkney, A. J. Griffiths, B. Hawkins, A novel approach to characterizing the corrosion resistance of super duplex stainless steel welds *Corrosion (Houston, Tx)* v. 58, n. 12, 2002, p. 1039-1048.
82. C. J. Park, V. Shankar-Rao, H. S. Kwon, Effects of sigma phase on the initiation and propagation of pitting corrosion of duplex stainless steel. *Corrosion (Houston, Tx)* v. 61, n. 1, 2005, p. 76-83.

83. M. A. Domínguez-Aguilar, R. C. Newman, Detection of deleterious phases in duplex stainless steel by weak galvanostatic polarization in halide solutions. *Corrosion science*, v. 48, 2006, p. 2577-2591.
84. I. Calliari et al. Measuring secondary phases in duplex stainless steels. *JOM*, v. 61, n. 1, p. 80-83, 2009.