

Relatório Final

# **TRANSFORMAÇÕES DE FASE EM AÇOS INOXIDÁVEIS DÚPLEX**

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

*Relatório final de bolsa de produtividade em pesquisa  
obtida na chamada PQ 2013 – Processo 305138/2013-8*

*02 de março de 2017*

## RESUMO

O presente relatório descreve as atividades de pesquisa do bolsista no triênio 2014-2016, que buscaram o estudo 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. Quatro objetivos específicos foram perseguidos: i. compreensão das transformações de fase envolvidas na solidificação de aços inoxidáveis dúplex; ii. avaliação da possível transformação martensítica reversa induzida por deformação de ferrita em austenita; iii. avaliação do efeito das variáveis de tempo e temperatura de solubilização na formação da estrutura dúplex de aços dúplex e superdúplex; e iv. determinação dos mecanismos de transformações de fase pós-solubilização, por exemplo, durante envelhecimentos isotérmicos, particularmente com o estudo da formação de fase sigma. Os principais resultados atingidos foram apresentados, bem como a correlação entre estes resultados e fundamentos já consolidados na literatura, justificando os objetivos da pesquisa a desenvolver no quadriênio 2017-2020, como continuidade do trabalho até aqui desenvolvido. São brevemente descritas as atividades de continuidade de pesquisa, envolvendo as transformações de fase passíveis de ocorrer em aços inoxidáveis e sua consequência no desempenho destes materiais, também dividida em quatro grandes frentes de trabalho: i. caracterização microestrutural; ii. transformações martensíticas induzidas por deformação; iii. transformações controladas por difusão; e iv. comportamento a corrosão.

Palavras-chave: aços inoxidáveis dúplex; transformação de fases; transformações controladas por difusão; transformações martensíticas induzidas por deformação; caracterização microestrutural; corrosão.

## PHASE TRANSFORMATIONS IN DUPLEX STAINLESS STEELS

### ABSTRACT

This report describes the research activities in the 2014-2016 triennial, which sought to study all the phase transformations involved in the manufacturing stages of duplex stainless steels, from their obtaining from the liquid state to the solution treated condition, and possible post-solution treatment transformations. Four specific objectives were pursued: i. understanding of the phase transformations involved in the solidification of duplex stainless steels; ii. evaluation of the possible strain induced reverse martensitic transformation of ferrite into austenite; iii. evaluation of the effect of solution treatment time and temperature on the duplex structure; and iv. determination of the mechanisms of post- solution treatment phase transformations, for example, during isothermal aging, particularly the study of sigma phase formation. The main results achieved were presented, as well as the correlation between these results and already consolidated literature, justifying the research objectives to be developed in 2017-2020, as a continuity of the work developed so far. Research activities are briefly described, involving the phase transformations likely to occur in stainless steels and their consequence in the performance of these materials, also divided into four work fronts: i. microstructural characterization; ii. strain induced martensitic transformations; iii. diffusion-controlled transformations; and iv. corrosion behavior.

Keywords: duplex stainless steels; phase transformations; diffusion-controlled transformations; strain induced martensitic transformations; microstructural characterisation; corrosion.

## 1. METAS ATINGIDAS

As atividades de pesquisa do bolsista no triênio 2014-2016 buscaram o estudo 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. Quatro objetivos específicos foram perseguidos, discriminados a seguir, juntamente com seus resultados mais relevantes:

i. Compreensão das **transformações de fase envolvidas na solidificação de aços inoxidáveis dúplex**, a partir da elaboração de liga 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. Neste tópico, concluiu-se a orientação de uma dissertação de mestrado <sup>(1)</sup>, da qual se elabora trabalho para periódico internacional, e que produziu amostras para futuro trabalho de pesquisa buscando compreender a cinética de solubilização e formação de estrutura dúplex a partir da estrutura bruta de fusão.

ii. Avaliação da possível **transformação martensítica reversa induzida por deformação (TMRID)** de ferrita em austenita, que gerou o tema de uma dissertação de mestrado<sup>(2)</sup> e de uma tese de doutorado co-orientada<sup>(3)</sup>, além de 3 importantes contribuições ao tema<sup>(4-6)</sup>, e que motivou a exploração de outras transformações martensíticas induzidas por deformação, particularmente em aços inoxidáveis austeníticos<sup>(7-9)</sup>. Outros trabalhos desenvolvidos<sup>(10,11)</sup> também apontam para a necessidade de desenvolvimento de técnicas robustas para a quantificação de ferrita e austenita em aços inoxidáveis, e decorreram deste tópico de interesse do projeto de pesquisa do triênio 2014-2016.

iii. Avaliação do efeito das variáveis de tempo e temperatura de **solubilização na formação da estrutura dúplex de aços dúplex e superdúplex**, analisando principalmente os tamanhos de grão e pontos para possível nucleação heterogênea em ciclos térmicos pós-solubilização. O tema proposto gerou a orientação de duas dissertações <sup>(12,13)</sup>, um trabalho de conclusão de curso - TCC<sup>(14)</sup>, e duas publicações em congresso<sup>(15,16)</sup>. Prevê-se deste tópico a geração de pelo menos duas novas publicações em periódicos internacionais em 2017.

iv. Determinação dos mecanismos de **transformações de fase pós-solubilização**, por exemplo, durante envelhecimentos isotérmicos, particularmente com o estudo da formação de fase sigma. Tal estudo, foco central das atividades relativas a transformações de fases em aços inoxidáveis dúplex, propiciou a orientação pelo bolsista de duas teses de doutorado<sup>(17,18)</sup>, uma dissertação de mestrado<sup>(19)</sup>, um TCC<sup>(20)</sup>, uma iniciação científica<sup>(21)</sup>, 2 trabalhos em periódicos internacionais de destaque<sup>(22,23)</sup>, um trabalho em periódico nacional<sup>(24)</sup>, e quatro trabalhos em congressos internacionais<sup>(25-28)</sup>. Estão em elaboração neste tópico mais outras duas novas publicações em periódicos internacionais, com previsão de submissão no início de 2017.

Como consequência direta dos trabalhos sobre transformação de fases controladas por difusão mostradas no último item, e da experiência adquirida em comportamentos mecânico e eletroquímico de materiais estruturais, que permeiam as atividades de pesquisa do bolsista deste o início de suas atividades no

Centro Universitário FEI, várias foram as contribuições decorrentes do trabalho de pesquisa do bolsista no âmbito de aços inoxidáveis<sup>(29-32)</sup>, superligas<sup>(33-36)</sup>, aços estruturais<sup>(37-39)</sup>, e comportamento mecânico de materiais<sup>(40-46)</sup>, complementando a capacidade de formação de recursos humanos e de geração de conhecimento científico e tecnológico.

## 2. PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS.

Com o domínio científico e tecnológico das transformações de fases em aços inoxidáveis, é possível maior controle microestrutural, fundamental para a obtenção do desempenho esperado destes materiais em suas aplicações industriais. O trabalho até aqui desenvolvido pelo bolsista e descrito no item anterior para o último triênio (2014-2016) mostra a necessidade de caracterização mais ampla das possíveis transformações de fases em aços inoxidáveis, para que o controle e a simulação computacional destas transformações sejam possíveis.

Assim, busca-se aqui relato dos principais resultados obtidos pelo bolsista, relativos às principais transformações de fase que levam a formação de microestruturas específicas dos aços inoxidáveis, particularmente austeníticos e dúplex, e sua influência no comportamento eletroquímico. A correlação entre estes resultados e fundamentos já consolidados na literatura justificam os objetivos da pesquisa a desenvolver no quadriênio 2017-2020, como continuidade do trabalho até aqui desenvolvido. Julgou-se então necessária esta apresentação comparativa entre o arcabouço conceitual já dominado na literatura e os resultados obtidos pelo grupo de pesquisa do bolsista como forma de apontar os importantes desdobramentos que a pesquisa aqui conduzida gerou.

### *Aços inoxidáveis*

Experimentos pioneiros<sup>(47)</sup> com ligas Fe-Cr-0,06%C mostraram que o aumento do teor de Cr leva a taxas nulas de corrosão atmosférica quando o teor de Cr das ligas era superior a aproximadamente 12%, como mostra a Figura 1. A partir destes estudos, criou-se a denominação de um aço como “inoxidável”. Atualmente, os aços inoxidáveis mais comuns são ligas ferrosas baseadas no sistema Fe-Cr-Ni, e dependendo da temperatura e dos teores de Cr e Ni podem apresentar até quatro fases distintas: ferrita ( $\alpha$ ) de estrutura cúbica de corpo centrada, austenita ( $\gamma$ ) de estrutura cúbica de faces centradas,  $\alpha'$ , fase cúbica de corpo centrada rica em Cr se comparada a  $\alpha$ , e sigma ( $\sigma$ ), de estrutura tetragonal, de grande fragilidade e dureza. As fases são exemplificadas nas seções isotérmicas do ternário Fe-Cr-Ni a 1100°C e 900°C da Figura 2.

Nota-se que a fase austenita é mais rica em Ni, e que a fase ferrita é mais rica em Cr, e por este motivo Ni e Cr são respectivamente chamados de elementos austenizantes e ferritizantes. Outros elementos também têm partição preferencial entre ferrita e austenita, e por isso uma forma de avaliar a propensão de uma liga em ter ferrita ou austenita em sua microestrutura vem da avaliação dos teores de Cr e Ni equivalentes ( $Cr_{eq}$  e  $Ni_{eq}$ ), apresentados na Figura 3, que também traz uma das formas dos conhecidos diagramas de Schaeffler, utilizados

para prever as fases presentes em estruturas brutas de fusão de cordões de solda resfriados ao ar a partir de 1050 °C. Além de ferrita e austenita, surge neste diagrama também a martensita, fase metaestável resultante da transformação (martensítica) militar de austenita quando de resfriamento abaixo de temperatura onde a austenita (CFC) perde estabilidade se comparada a estrutura CCC (ou TCC, dependendo do teor de C intersticial), preferencial do ferro, em temperaturas próximas a ambiente.

Deste modo, o correto balanço de elementos de liga, temperaturas de processamento e modos de resfriamento podem levar a formação de aços inoxidáveis das mais diferentes microestruturas. Serão abordados na sequência os aços austeníticos e os dúplex, objetos de interesse das linhas de pesquisa do bolsista, com relação às diferentes transformações de fases possíveis e suas implicações no desempenho destes materiais.

Figura 1 – Taxas de corrosão atmosférica de ligas Fe-0,06%C-x%Cr em função do teor de Cr das ligas<sup>(47)</sup>.

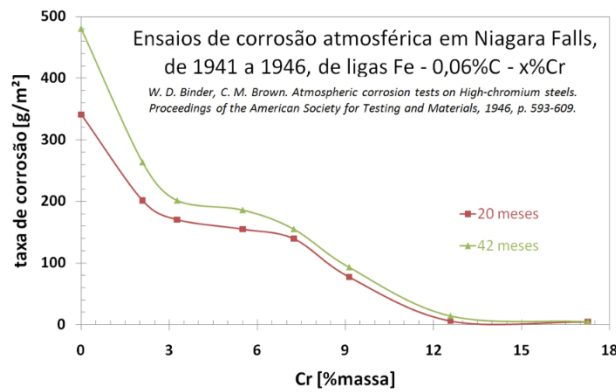


Figura 2 – Seções isotérmicas a (a) 1100°C e (b) 900°C do sistema Fe-Cr-Ni<sup>(48)</sup>.

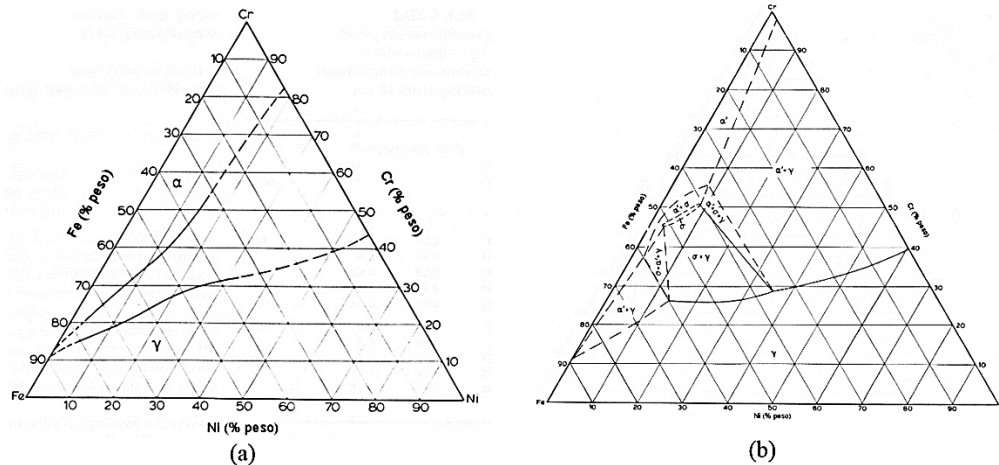
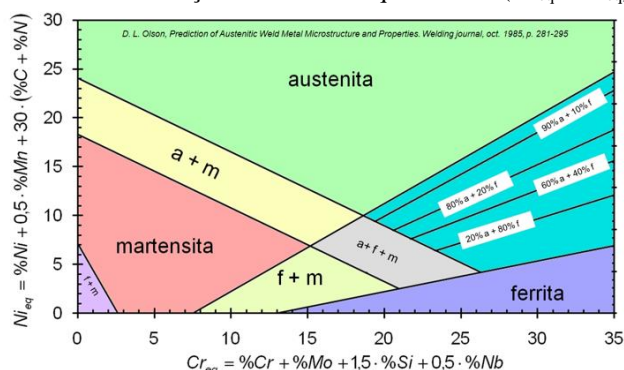


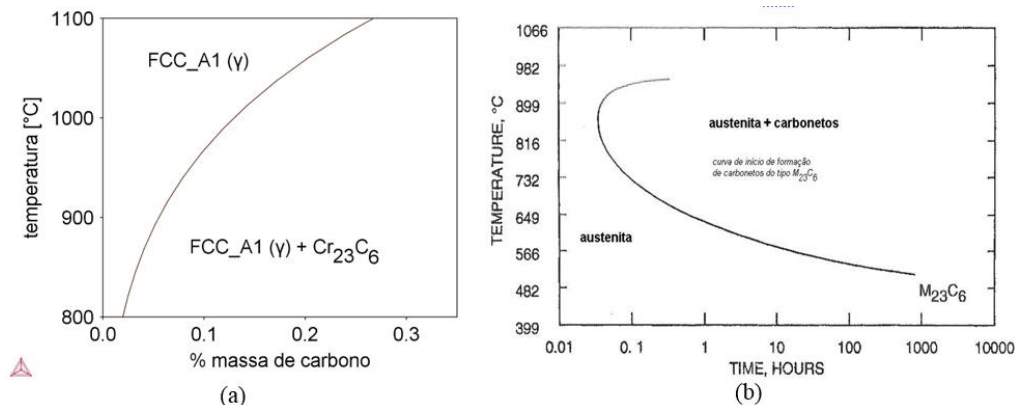
Figura 3 – Diagrama de Schaeffler para previsão de fases presentes nas estruturas de aços inoxidáveis fundidos resfriados ao ar a partir de 1050 °C e definições de Cr e Ni equivalentes ( $Cr_{eq}$  e  $Ni_{eq}$ )<sup>(49)</sup>.



### Inoxidáveis austeníticos

Elevados teores de  $Ni_{eq}$  permitem a estabilização da estrutura CFC, ou austenítica, mesmo a temperatura ambiente, levando a formação de aços inoxidáveis austeníticos. Caracterizam-se por elevadas ductilidade e tenacidade, e boa soldabilidade quando apresentam teores reduzidos de C<sup>(50)</sup>. A presença de Cr, elemento com forte tendência a formação de carbonetos, reduz a solubilidade de C na estrutura austenítica, podendo levar a precipitação de carbonetos de Cr, principalmente do tipo  $M_{23}C_6$  em contornos de grão e empobrecimento de Cr destas regiões, levando aos fenômenos de sensitização e corrosão intergranular, particularmente quando o aço é resfriado a partir das temperaturas de solubilização, acima da linha *solvus* da isopleta Fe-C de um aço inoxidável típico do tipo AISI 316 (como a mostrada na Figura 4a, calculada com o auxílio do programa Thermo-Calc<sup>®</sup> e a base de dados TCFE8), com taxas de resfriamento baixas, respeitando as curvas Tempo-Temperatura-Precipitação (TTP) do mesmo aço, como a mostrada na Figura 4b. Assim, compreender como as temperaturas de solubilização promovem a formação da esperada estrutura austenítica de grãos monofásicos, e sem a precipitação de carbonetos, particularmente nos contornos de grão, é essencial para a obtenção das desejadas estruturas de utilização.

Durante a deformação plástica, alguns aços austeníticos apresentam endurecimento não só devido ao encruamento, mas também como resultado de transformação martensítica induzida por deformação (TMID), particularmente em temperaturas abaixo da ambiente<sup>(50)</sup>. Duas são as TMID experimentadas pela austenita, havendo formação de martensita  $\epsilon$ , de estrutura hexagonal compacta, e a martensita  $\alpha'$ , de estrutura cúbica de corpo centrado e ferromagnética. As TMID em aços inoxidáveis austeníticos são conhecidas e estudadas desde a década de 1960<sup>(51)</sup>, e vem sendo continuamente estudadas em inúmeros outros trabalhos<sup>(52-58)</sup>.

Figura 4 – (a) Isopleta Fe-C de uma aço tipo 316 (b) diagrama TTP para o mesmo aço<sup>(50)</sup>.


Reduções de espessura em laminação a frio de até 65% levam a formação de até 68% em volume de martensita  $\alpha'$  em aços inoxidáveis austeníticos<sup>(52-54)</sup>, sendo o aumento da fração de martensita  $\alpha'$  proporcional a redução a frio imposta ao aço. No entanto, é interessante notar que a fração de martensita  $\alpha'$ , ferromagnética, apresentou-se numa pesquisa<sup>(54)</sup> com valores distintos se medida por ferritoscópio ou por cálculos sobre os resultados de difratometria de raios-X, de modo semelhante ao já observado por este grupo de pesquisa em trabalhos com aço inoxidável dúplex<sup>(4,5,6,10,11,59)</sup> e com aços austeníticos<sup>(7,8,9)</sup>.

Assim, compreender a influência da composição química e microestrutura anterior a deformação nas TMID de aços austeníticos, descrever a fenomenologia das transformações e propor modelos termodinâmicos para a estabilidade de austenita e potencial termodinâmico para a TMID pode ajudar a entender a formação destas microestruturas em aços austeníticos, e auxiliar na compreensão das transformações martensíticas reversas induzidas por deformação (TMRID) observadas em aços inoxidáveis dúplex em trabalhos deste grupo de pesquisa<sup>(2-5)</sup>, e que serão discutidas no tópico seguinte.

### ***Inoxidáveis dúplex***

O correto balanço dos teores de  $Cr_{eq}$  e  $Ni_{eq}$  em conjunto com a escolha de temperatura de solubilização dentro do campo de estabilidade das fases ferrita e austenita pode levar a formação da estrutura dúplex, contendo frações equivalentes das fases ferrita e austenita. Os aços que tem esta microestrutura, chamados de dúplex, são comercialmente caracterizados pela sua resistência a corrosão, particularmente pelo valor do número equivalente de resistência a corrosão por pite (PREN, Pitting Resistance Equivalent Number), definido na equação 1. A Tabela 1 traz a denominação usual dos aços dúplex em função de seu PREN, destacando-se que os aços mais usados estão nas categorias “standard” (ou simplesmente “dúplex”) e “superdúplex”.

$$PREN = \%Cr + 3,3 \cdot (\%Mo) + 16 \cdot (\%N) \quad (1)$$



Tabela 1 - Número PREN para os aços inoxidáveis dúplex<sup>(19)</sup>.

Categoria do aço inoxidável	PREN
<i>Lean</i> Dúplex	< 30
Dúplex ( <i>Standard-duplex</i> )	30 < PREN < 40
Superdúplex	40 < PREN < 48
Hiperdúplex	> 48

No exemplo da Figura 5, que mostra as frações de equilíbrio calculadas para um aço inoxidável dúplex UNS S31803 a partir da base de dados TCFE8 do ThermoCalc, a faixa de temperatura ideal para solubilização (partição) dos elementos de liga e formação de estrutura dúplex está entre 1000 e 1200°C. Todavia, como mostra a Figura 5, em temperaturas inferiores as fases ferrita e austenita tornam-se metaestáveis, e outras fases, como o nitreto hexagonal de cromo Cr<sub>2</sub>N e fase sigma passam a ser possíveis. Contudo, tais fases são indesejáveis, pois sendo ricas nos elementos que garantem a resistência a corrosão (Cr, Mo e N), levam a formação em suas vizinhanças de regiões empobrecidas nestes elementos, diminuindo a resistência a corrosão, particularmente aos fenômenos de corrosão localizada, como corrosão por pite.

Assim, a estrutura dúplex é metaestável, sendo obtida na temperatura ambiente após resfriamento que impeça as transformações de fase, particularmente de ferrita em sigma, como as descritas no diagrama TTP obtido para o aço UNS S31803 em trabalho recente<sup>(22)</sup> do grupo de pesquisa do proponente, apresentado na Figura 6. Conhecer a cinética destas transformações, deste modo, é fundamental para obter aços dúplex em diferentes processamentos sem a formação destas fases deletérias.

Figura 5 - Frações volumétricas das fases calculadas para um aço UNS S31803 com o auxílio de Thermo-Calc, e valores experimentais de referência da fração de fase sigma após longos tempos de envelhecimento nas temperaturas indicadas<sup>(22)</sup>.

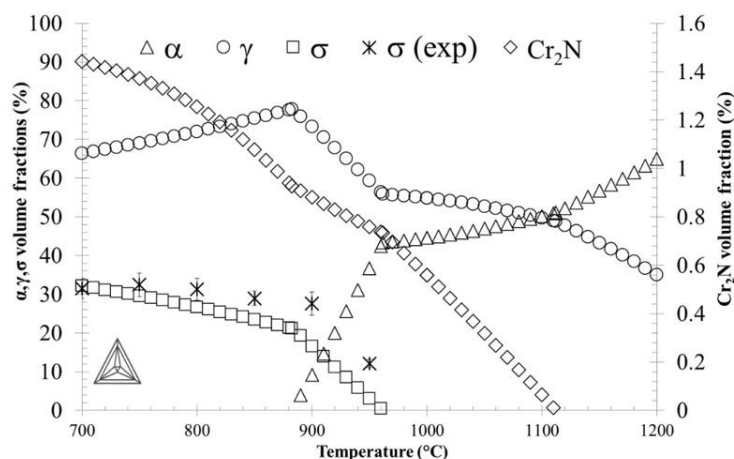
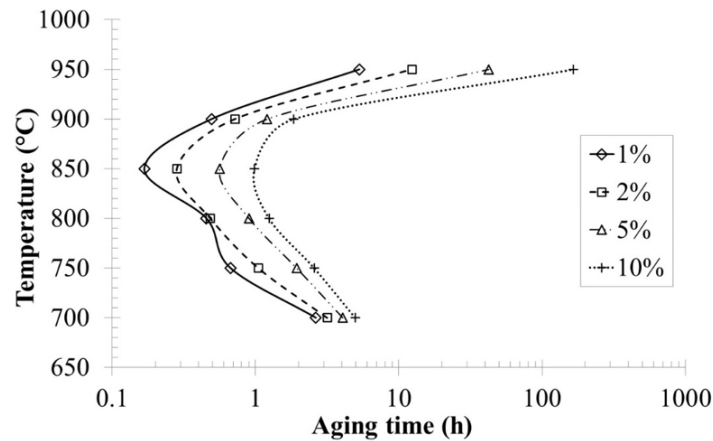


Figura 6 – Diagrama TTP de formação de fase sigma para um aço UNS S31803<sup>(22)</sup>.

A complexidade microestrutural e de diferentes mecanismos de formação de fases durante envelhecimento de aços dúplex abaixo de 900°C pode ser exemplificada pelas microestruturas da Figura 7. Pode haver coexistência de morfologias lamelares, associadas a decomposição eutetóide da ferrita (gerando sigma e austenita secundária empobrecida em Cr e Mo com relação a original, ou precipitação descontínua de sigma a partir da ferrita, gerando ferrita empobrecida em Cr e Mo, e morfologias mais maciças, também decorrentes dos mesmos mecanismos de formação. Nota-se também na figura 7 que o envelhecimento leva a formação não só de sigma ( $\sigma$ ) e nitretos de cromo, fases previstas no equilíbrio termodinâmico já mostrado na Figura 5, como também há a formação de fase chi ( $\chi$ ), que normalmente serve de núcleo heterogêneo para a formação de sigma. Além disso, na Figura 7 nota-se que os diferentes tempos de solubilização, que levaram a diferentes tamanhos de grão das fases ferrita e austenita, não modificaram a característica principal da formação das fases durante o envelhecimento, que é a nucleação heterogênea em interfaces.

Dissertação de mestrado<sup>(12)</sup> recentemente defendida no grupo de pesquisa do proponente deste projeto, cujos resultados serão publicados em breve em periódico internacional de renome, mostram que há preferência de nucleação em interfaces do tipo  $\alpha/\gamma$  ou pontos triplos contendo  $\alpha$ . Todos estes trabalhos reforçam a necessidade de aprofundamento do entendimento das transformações de fase durante a solubilização (mostrando quantidade e tipo de sítios de nucleação heterogênea em função das variáveis de processamento) e pós-solubilização, permitindo maior controle microestrutural durante as etapas de processo.

Resultados de cinética de crescimento de grão das fases ferrita e austenita foram obtidos em dissertação de mestrado orientada pelo bolsista e defendida em 2016<sup>(13)</sup>, e alguns destes resultados são exemplificados na Figura 8. Nota-se por exemplo que o tamanho de intercepto segue lei de potência em função do tempo de solubilização nas temperaturas estudadas, como era de se esperar, e que há predominância de interfaces do tipo  $\alpha/\gamma$ . Foram obtidas as energias de ativação para crescimento de grão global e individual de cada fase, essenciais para a previsão das microestruturas após determinados ciclos de solubilização, mas ainda há a necessidade de explorar efeitos de grau de encruamento anterior a solubilização e influência das microestruturas brutas de fusão

na formação da estrutura solubilizada, e tais tópicos serão também explorados pelo projeto de pesquisa aqui apresentado.

Figura 7 – Aço UNS S31803 envelhecido por 30 min a 850 °C após ter sido solubilizado a 1100°C por (a) 1 hora, (b) 24 horas (c) 96 horas e (d) 192 horas. <sup>(12)</sup>

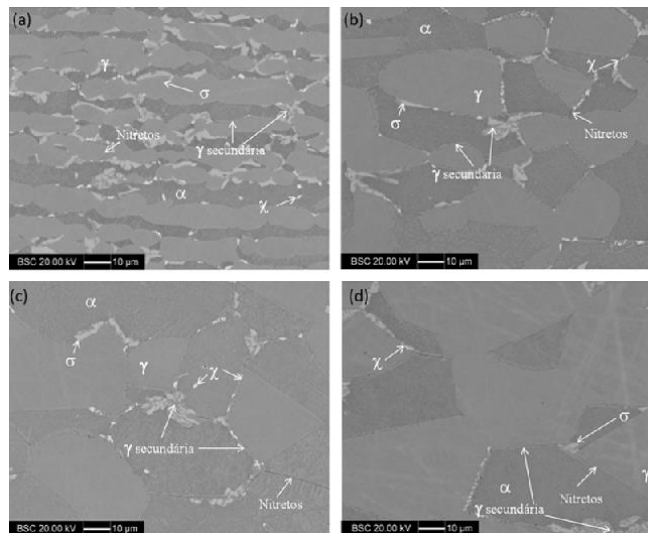
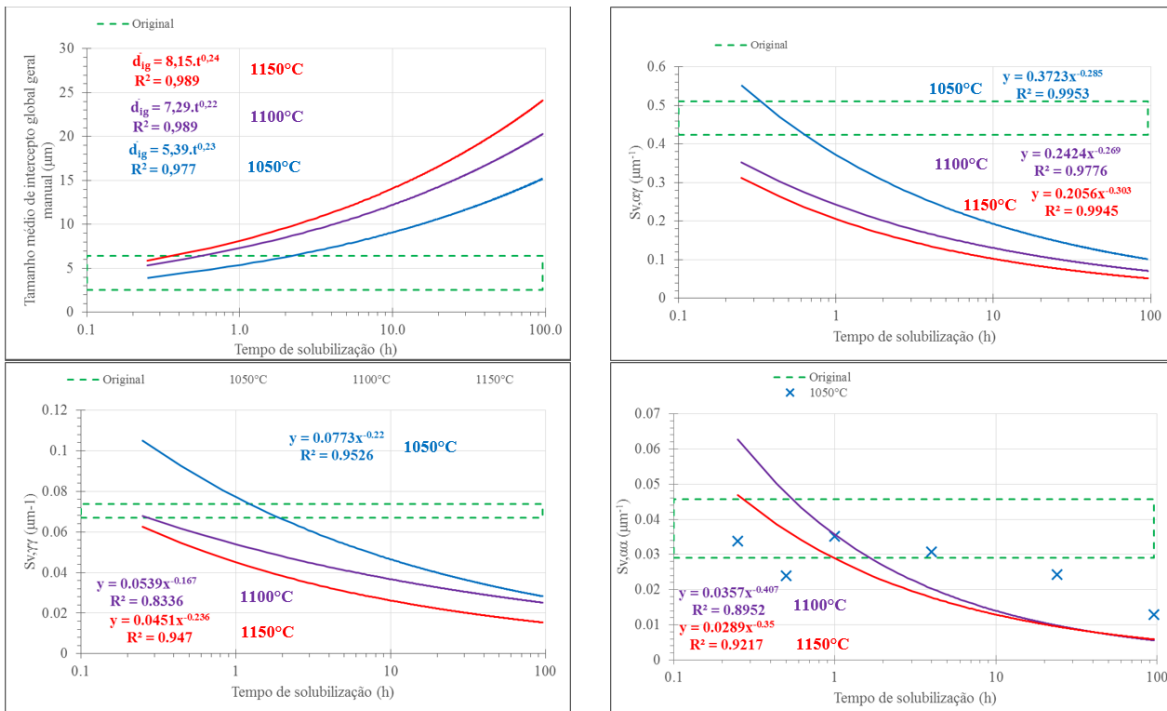
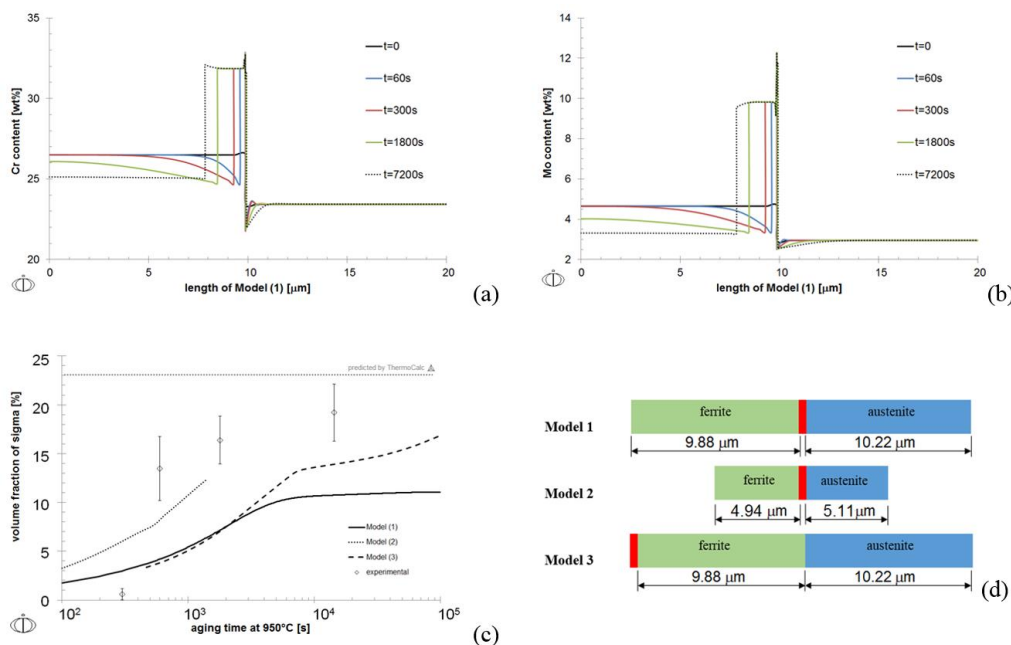


Figura 8 – Tamanho médio de interceptos e área de diferentes interfaces em aço dúplex UNS S31803 inicialmente com 50% de trabalho a frio e solubilizado em três diferentes temperaturas e tempos variados. <sup>(13)</sup>



Dada a complexidade microestrutural das estruturas solubilizadas, e das transformações de fase pós-solubilização controladas por difusão no envelhecimento, a simulação computacional da cinética destas transformações de fase torna-se ainda mais desafiadora. Uma dissertação de mestrado defendida em fevereiro de 2017<sup>(60)</sup> e orientada pelo bolsista, e outros projetos de simulação previstos, partem de resultados prévios do grupo<sup>(25)</sup>. Alguns destes resultados, exemplificados na Figura 9, mostram que já consegue descrever perfis os perfis de Cr e Mo nas fases ferrita e austenita em contato com a fase sigma formada, essenciais para a previsão do comportamento a corrosão, mas ainda falham na correta descrição da fração volumétrica de fase sigma formada. Além disso, os modelos cinéticos em DiCTra<sup>®</sup> se valem do equilíbrio local entre fases simulado em Thermo-Calc<sup>®</sup>, e assim validar de forma inequívoca as simulações destes dois softwares quanto a fração volumétrica de fases e composição química das fases é fundamental para o progresso e obtenção de resultados confiáveis, e por isso estudo minucioso das técnicas de caracterização das fases formadas em aços inoxidáveis também tem que fazer parte do escopo de trabalho do grupo de pesquisa do bolsista na continuidade dos trabalhos de pesquisa.

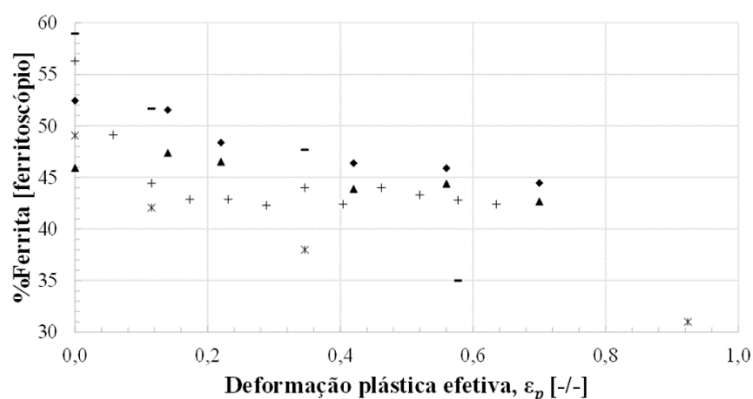
Figura 9 – Perfis de Cr (a) e Mo (b) simulados para em diferentes tempos de envelhecimento a 850°C e comparação de dados experimentais com simulações de fração volumétrica de fase sigma (c) para três modelos computacionais desenvolvidos em DiCTra<sup>®</sup> (25).



Além das transformações de fase controladas por difusão, os aços dúplex podem experimentar transformações induzidas por deformação, particularmente transformação martensítica reversa induzida por deformação (TMRID) de ferrita em austenita, como mostram alguns trabalhos do grupo do proponente<sup>(2-6)</sup>. A Figura 10 exemplifica a redução da fração de ferrita com o aumento da deformação para um aço superdúplex

UNS S32750, comparado a resultados do grupo com experimentos realizados em aço dúplex UNS S31803. A ocorrência desta transformação, com a confirmação por difração de raios-X (DRX) da existência de apenas ferrita e austenita nas microestruturas, reforça a possibilidade de TMRID, mas levanta questões importantes sobre o entendimento deste fenômeno, sobre a avaliação termodinâmica do equilíbrio de fases e dos possíveis potenciais termodinâmicos a serem vencidos pelo trabalho de deformação plástica, e também apontam para a necessidade de desenvolvimento de técnicas robustas para a quantificação de ferrita e austenita em aços inoxidáveis, usando por exemplo DRX.

Figura 10 – Redução da fração de ferrita em função da deformação plástica efetiva aplicada a diferentes aços inoxidáveis dúplex<sup>(2)</sup>.



### 3. CONTINUIDADE DA PESQUISA

A comparação dos resultados obtidos com o arcabouço de conhecimento acumulado em transformações de fases e desempenho de aços inoxidáveis reforça a necessidade do 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 eletroquímico. Este desafio será encarado em quatro frentes distintas de trabalho, cada qual com seus objetivos específicos, como segue:

- i. **Caracterização microestrutural:** nesta frente de trabalho se procurará a caracterização microestrutural de aços inoxidáveis dúplex e austeníticos, através da determinação de composição química de equilíbrio de fases por análises de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) em microscopia eletrônica de varredura (MEV), cristalografia de fases por difratometria de raios-X, e quantificação de fração volumétrica de fases por diferentes meios, como estereologia quantitativa de imagens de MEV e de microscopia óptica (MO), difração de raios-X e ferritoscopia (para fases magnéticas). Os dados de cristalografia por DRX, além de serem ferramentas

complementares para estudo indireto da composição química das fases (já que as células unitárias têm suas dimensões afetadas por diferentes composições químicas), são fundamentais para determinar os parâmetros de espalhamento atômico necessários à quantificação da fração volumétrica de fases por DRX, já exploradas em trabalhos do grupo do proponente<sup>(4-11)</sup>. As fases cujas frações volumétricas forem determinadas por DRX também serão mensuradas pelas técnicas de estereologia quantitativa (e ferritoscopia para ferrita e martensita  $\alpha'$ ), permitindo a comparação entre técnicas, avaliando-se qual é a mais recomendada para a caracterização microestrutural, como já inicialmente exploradas pelo grupo do proponente deste projeto em trabalhos<sup>(17,18,22-24,27)</sup> deste triênio.

- ii. **Transformações Martensíticas Induzidas por Deformação (TMID):** se buscará o aprofundamento dos trabalhos já realizados sobre transformação martensítica reversa induzida por deformação (TMRID) em aços inoxidáveis dúplex, temas de tese de doutorado<sup>(3)</sup>, dissertação de mestrado<sup>(2)</sup> e trabalhos publicados<sup>(4-6)</sup> pelo grupo do proponente, além de rever e aprofundar trabalhos de TMID em aços inoxidáveis austeníticos<sup>(7-9)</sup>. Além da descrição e contextualização fenomenológica das transformações, a avaliação termodinâmica do equilíbrio de fases e dos possíveis potenciais termodinâmicos a serem vencidos pelo trabalho de deformação plástica serão explorados nesta nova fase.
- iii. **Transformações controladas por difusão (TCD):** principal foco de trabalho do grupo de pesquisa do bolsista nos últimos 6 anos<sup>(1,12-27)</sup>, este tema continuará sendo explorado, avaliando as alterações microestruturais que ocorrem na solubilização de aços dúplex e aços austeníticos (estes últimos, com substituição parcial de Mo por W, em projeto desenvolvido em parceria com a Villares Metals) e no aquecimento de aços dúplex nos campos de formação de fases sigma, chi e nitretos. Além disso, continua-se a explorar as potencialidades de simulação computacional de equilíbrio termodinâmico pelo Thermo-Calc<sup>®</sup> e de cinética de transformações de fases pelo DiCTra<sup>®</sup>, usando-se inclusive das caracterizações microestruturais propostas na frente de trabalho “i” anteriormente descrita.
- iv. **Comportamento a corrosão:** as transformações de fase estudadas nas frentes de trabalho “ii” e “iii” anteriormente propostas tem impacto direto na distribuição dos elementos de liga dos aços inoxidáveis, e particularmente nos gradientes de Cr, Mo, W e N, principais formadores da película passiva, e por isso tem influência direta no comportamento a corrosão. Assim, seguindo a linha de trabalho do bolsista em comportamento a corrosão do último triênio<sup>(17,18,22,23,26,28,29,32)</sup>, os aços cujas transformações de fase serão provocadas nos itens “ii” e “iii” serão estudados quanto a corrosão por pite (determinação de potencial de pite –  $E_p$  – e temperatura crítica de pite – CPT), corrosão localizada (por técnicas como a de reativação potenciodinâmica de duplo loop – DL-EPR) e corrosão seletiva. Em particular, os estudos de corrosão seletiva também serão utilizados na obtenção de amostras monofásicas para auxiliar nas caracterizações microestruturais do item “i”, como já explorado em trabalhos anteriores<sup>(28,29)</sup>.

O cronograma destas quatro frentes de trabalho previsto para quatro anos, divididos em trimestres e para cada subprojeto, são apresentados na Tabela 2.

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

Grupo de trabalho	Subprojeto	2017	2018	2019	2020
Caracterização	Mestrado Jéssica W. F. Vieira				
	Nova IC				
	IC Flávia R. Pucci				
	Novo Mestrado				
	Novo Mestrado				
TMID	Novo Mestrado				
	Novo Mestrado				
TCD	Nova IC				
	Nova IC				
	Novo Mestrado				
	Novo Mestrado				
Corrosão	Mestrado Ivy Frazão				
	Mestrado Bárbara C. M. Terra				
	Mestrado Gabriela C. R. Spedo				
	Novo Mestrado				

## REFERÊNCIAS

1. J. R. O. Alves. Estudo de uma rota de processamento de aços inoxidáveis lean dúplex (2101), verificando o efeito da adição de diferentes teores de nióbio sobre a estrutura bruta de fusão. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - FEI, Bolsista CAPES, 2015, 202p. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
2. J. Marangoni. Investigação da transformação de ferrita em austenita induzida por deformação em aço inoxidável superdúplex. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - FEI, bolsista CAPES, 2015, 151p. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
3. A. Forgas Jr., Transformação de ferrita em austenita induzida por deformação plástica em um aço inoxidável dúplex. Início: 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) - ITA, 2016, 135 p.. Co-orientador: Rodrigo Magnabosco.
4. A. Forgas-Jr., J. Otubo, R. Magnabosco. Ferrite quantification methodologies for duplex stainless steel. Journal of Aerospace Technology and Management (Online), 2016, aceito para publicação.
5. A. Forgas-Jr., J. Otubo, R. Magnabosco. Evaluation of ferrite quantification methods applied to duplex stainless steels. In: 70º Congresso Anual da ABM - Internacional, 2015, Rio de Janeiro. Anais, 2015, 10p.
6. A. Forgas-Jr., L. 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.
7. J. W. Ferezin. Estudo por difratometria de raios-X da transformação martensítica induzida por deformação de dois aços inoxidáveis austeníticos. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia de Materiais) - FEI. Orientador: Rodrigo Magnabosco.

8. J. W. Ferezin. Estudo por difratometria de raios X da transformação martensítica induzida por deformação de dois aços inoxidáveis austeníticos. Iniciação Científica. (Graduando em Engenharia) - FEI, Fundação Educacional Inaciana Pe Sabóia de Medeiros. 2015, 69p. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
9. J. W. Ferezin, R. Magnabosco. Estudo da transformação martensítica induzida por deformação em aço austenítico. In: V SICFEI - Simpósio de Iniciação Científica, Didática e de Ações Sociais de Extensão da FEI, 2015, Anais, p. 117.
10. P. O. S. Sorrentino. Avaliação da técnica de quantificação das fases ferrita e austenita via difratometria de raios X para aplicação em aços inoxidáveis dúplex. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia de Materiais) - FEI. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
11. T. S. Cano. Quantificação das fases presentes nos aços inoxidáveis dúplex por difratometria de raios-X. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia de Materiais) - FEI. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
12. E. A. Melo. Estudo da Influência do tamanho de grão na nucleação e cinética de formação de fases intermetálicas em aço inoxidável dúplex. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - FEI, bolsista CAPES, 2015, 163p. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
13. R. M. Leandro. Influência do tempo e da temperatura de solubilização na formação da microestrutura dúplex do aço UNS S31803. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – FEI, 2016, 114 p. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
14. R. M. Leandro. Influência do tempo e da temperatura de solubilização no tamanho de grão austenítico e ferrítico, e na fração de ferrita, de um aço inoxidável dúplex UNS S31803. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia de Materiais) - FEI, 2014, 75 p. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
15. R. M. Leandro, R. Magnabosco. Influência do tempo e da temperatura de solubilização no tamanho de grão austenítico e ferrítico, e na fração de ferrita de um aço inoxidável dúplex UNS S31803. In: 69º Congresso da ABM - Internacional, Anais, 2014, 10p.
16. P. C. O. Falcão, R. Magnabosco. Influência do tamanho de grão original na cinética de formação de fase sigma em aço inoxidável superdúplex. In: IV Simpósio de Iniciação Científica, Didática e de Ações Sociais de Extensão da FEI - SICFEI, 2014, São Bernardo do Campo. Anais, 2014.
17. E. B. Mélo. Influência das transformações de fase a 475°C e a 650°C no comportamento eletroquímico do aço UNS S31803. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2013, 284 p. Coorientador: Rodrigo Magnabosco.
18. D. C. Santos. Estudo das transformações de fase isotérmicas do aço UNS S31803 envelhecido entre 700°C e 950°C. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. 2013, 304 p. Coorientador: Rodrigo Magnabosco.
19. F. M. Rabechini. Investigação das transformações de fase durante envelhecimento isotérmico de aço inoxidável hiperdúplex. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - FEI, 2014, 105p. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
20. P. C. O. Falcão. Influência do tamanho de grão original na cinética de formação de fase sigma em aço inoxidável superdúplex. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia de Materiais) - FEI. 2016, 96p. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
21. P. C. O. Falcão. Influência do tamanho de grão original na cinética de formação de fase sigma em aço inoxidável superdúplex. Iniciação Científica. (Graduando em Engenharia) - FEI, Fundação Educacional Inaciana Pe Sabóia de Medeiros. 2014, 74p. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
22. D. C. Santos, R. Magnabosco. Kinetic Study to Predict Sigma Phase Formation in Duplex Stainless Steels. Metallurgical and Materials Transactions. A, Physical Metallurgy and Materials Science, v. 47, p. 1, 2016.
23. E. B. Mélo, R. Magnabosco. Evaluation of microstructural effects on the degree of sensitization (DOS) of a UNS S31803 duplex stainless steel aged at 475°C. Corrosion (Houston, Tex.), v. 71, p. 1490-1499, 2015.
24. M. B. Paschoal, R. Romana, R. Magnabosco. Quantificação de fases intermetálicas em aço inoxidável superdúplex por estereologia quantitativa - efeito de diferentes fontes de imagens. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 12, p. 310-317, 2015.
25. R. Magnabosco. Modelling of sigma phase formation during isothermal aging of a superduplex stainless steel. In: 8th European Stainless Steel Conference - Science & Market, 2015, Graz. 8th ESSC - conference proceedings, 2015. v. u. p. 400-409.



26. D. C. Santos, R. Magnabosco. Influence of intermetallic phase content and microstructure on pitting potential of a duplex stainless steel. In: EUROCORR 2014, 2014, Pisa. EUROCORR 2014 - Conference Proceedings. Milano: AIM, 2014. p. 1-10.
27. M. B. Paschoal, R. Magnabosco. Quantificação de fases intermetálicas formadas em envelhecimento isotérmico a 850°C de aço inoxidável superdúplex usando imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura. In: 69° Congresso da ABM - Internacional, 2014, São Paulo. Anais do 69° Congresso da ABM - Internacional. São Paulo: ABM, 2014.
28. F. L. F. Lima, R. Magnabosco. Avaliação da técnica de extração de fases por corrosão seletiva do aço UNS S31803 em solução 1M HCl a 60°C. In: 69° Congresso da ABM - Internacional, 2014, São Paulo. Anais do 69° Congresso da ABM - Internacional. São Paulo: ABM, 2014.
29. F. L. F. Lima. Avaliação da técnica de extração de fases por corrosão seletiva do aço UNS S31803 em solução 1 M HCl a 60°C. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia de Materiais) - FEL. 2013, 95 p. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
30. C. E. Pinedo, R. Magnabosco. Mecanismos de nitretação sob plasma do aço inoxidável martensítico AISI 420 nitretado a alta e baixa temperatura. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 12, p. 257-264, 2015.
31. A. A. Vitoi, R. Magnabosco, C. E. Pinedo, A. P. Tschiptschin. Nitretação sob plasma por tela ativa e plasma direto/DC do aço inoxidável endurecível por precipitação tipo 17-4 PH. In: 70° Congresso Anual da ABM - Internacional, 2015, Rio de Janeiro. 70° Congresso Anual da ABM - Internacional - Anais. São Paulo: ABM, 2015.
32. J. W. Calderon-Hernandez, D. Hincapie-Ladino, R. Magnabosco, A. L. S. Nunes, N. Alonso-Falleiros. Influencia del tratamiento térmico de revenido sobre la resistencia a la corrosión por picadura y sobre la susceptibilidad a corrosión intergranular de un acero inoxidable supermartensítico. In: CIM - Congreso Internacional de materiales, 2015, Boyacá. CIM - Congreso Internacional de materiales - anais. Bogotá: CIM, 2015.
33. F. Beneduce-Neto; R. Magnabosco; A. L. V. C. SILVA. Avaliação de trincas a quente em fundidos de precisão em superligas por termodinâmica computacional. In: 69° Congresso da ABM - Internacional, 2014, São Paulo. Anais do 69° Congresso da ABM - Internacional. São Paulo: ABM, 2014.
34. A. C. C. Oliveira, G. H. B. Donato, R. Magnabosco, V. Teleginski, D. Chagas, G. Vasconcelos, F. Camargo. Analysis of the metallurgical bonding between inconel and NiCrAlY coatings by HVOF and with CO2 laser beam. In: 21° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2014, Cuiabá. 21° CBECiMat - anais, 2014.
35. A. C. C. Oliveira, G. H. B. Donato, R. Magnabosco, V. Teleginski, D. Chagas, G. Vasconcelos, F. Camargo. Analysis of the Metallurgical Bonding between Inconel and NiCrAlY Coatings by HVOF and with CO2 Laser Beam. Materials Science Forum (Online), v. 869, p. 727-731, 2016.
36. F. Beneduce-Neto, R. Magnabosco, A. L. V. C. Silva. Superalloys Hot Tearing Evaluation Using Computational Thermodynamics. In: 14th Discussion Meeting On Thermodynamics Of Alloys. Tofa 2014, anais.
37. W. Naville, A. L. Morassi, D. W. Leite, R. Magnabosco. Hydrogen stress cracking in power generator M42 galvanized martensitic carbon steel screws. Engineering Failure Analysis, p. 257-264, 2015.
38. L. C. Morais, R. Magnabosco. Estudo da influência da temperatura de recozimento intercrítico nas propriedades de um aço dual-phase. In: 69° Congresso da ABM - Internacional, 2014, São Paulo. Anais do 69° Congresso da ABM - Internacional. São Paulo: ABM, 2014.
39. G. E. Silva, R. Magnabosco, J. L. Abel. Influência da taxa de resfriamento na microestrutura de ferros fundidos. In: 69° Congresso da ABM - Internacional, 2014, São Paulo. Anais do 69° Congresso da ABM - Internacional. São Paulo: ABM, 2014.
40. B. S. Pimentel, D. Hincapie-Ladino, N. Alonso-Falleiros, R. Magnabosco, G. H. B. Donato. Avaliação experimental das propriedades tensão-deformação de um aço API 5L X65 sour após diferentes tempos de imersão em solução saturada por H2S. In: 69° Congresso da ABM - Internacional, 2014, São Paulo. Anais do 69° Congresso da ABM - Internacional. São Paulo: ABM, 2014.
41. 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.

42. G. H. B. Donato, R. Magnabosco. Modeling and Characterization of Residual Stresses in Material Processing. In: Saleem Hashmi; Gilmar Ferreira Batalha; Chester J. Van Tyne; Bekir Yilbas. (Org.). *Comprehensive Materials Processing*. 1ed. Oxford: Elsevier, 2014, v. 2, p. 219-233.
43. K. C. Gouveia, R. Magnabosco. Investigação dos métodos de determinação da temperatura de transição dúctil-frágil (TTDF) utilizando ensaio de impacto Charpy. In: 69° Congresso da ABM - Internacional, 2014, São Paulo. *Anais do 69° Congresso da ABM - Internacional*. São Paulo: ABM, 2014. p. 1-10.
44. B. P. Brandão, D. Hincapie-Ladino, R. Magnabosco, G. H. B. Donato, W. Naville, N. Alonso-Falleiros. Comportamento em ensaio Charpy para tubo API 5L X65 após diferentes tempos de imersão em solução saturada por H<sub>2</sub>S. In: 69° Congresso da ABM - Internacional, 2014, São Paulo. *Anais do 69° Congresso da ABM - Internacional*. São Paulo: ABM, 2014.
45. D. V. O. Moraes. Avaliação de propriedades de fadiga de compósitos de polipropileno reforçado com fibras de coco. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - FEI, bolsista CAPES, 2013, 221 p. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
46. K. C. Gouveia. Investigação dos métodos de determinação da temperatura de transição dúctil-frágil (TTDF) utilizando ensaio de Impacto Charpy. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - FEI, 2013, 162 p. Orientador: Rodrigo Magnabosco.
47. 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.
48. G. V. Raynor, V. G. Rivlin. Phase equilibria in iron ternary alloys. *The Institute of Metals* : London, 1985, p. 316-332.
49. D. L. Olson, Prediction of austenitic weld metal microstructure and properties. *Welding Journal*, 1985, p. 281-295.
50. A. J. Sedriks. *Corrosion of stainless steels*. John Wiley : NY, 1996, 2. ed., p. 13-35.
51. R. P. Reed, The spontaneous martensitic transformations in 18% Cr, 8% Ni Steels, *Acta Metallurgica*, v. 10, 1962, p. 865-77.
52. I. Mésáros, J. Prohászka, Magnetic investigation of the effect of  $\alpha'$ -martensite on the properties of austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 161, 2005, p. 162-168.
53. A. Mitra et al, Ferromagnetic Properties of Deformation-Induced Martensite Transformation in AISI 304 Stainless Steel, *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 35A, fev. 2004, p. 599-605.
54. J. Talonen, H. Hänninen, Damping Properties of Austenitic Stainless Steels Containing Strain-Induced Martensite, *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 35A, ago. 2004, p. 2401-2406.
55. J. Talonen, H. Hänninen, Formation of shear bands and strain-induced martensite during plastic deformation of metastable austenitic stainless steels, *Acta Materialia*, v. 55, 2007, p. 6108-6118.
56. S. S. M. Tavares, et al, Magnetic properties and  $\alpha'$  martensite quantification in an AISI 301LN stainless steel deformed by cold rolling, *Materials Characterization*, v. 59, 2008, p. 901- 904.
57. A. Das et al., Morphologies and characteristics of deformation induced martensite during tensile deformation of 304 LN stainless steel, *Materials Science and Engineering A*, v. 486, 2008, p. 283-286
58. D. L. Johannsen et al, Influence of Annealing Treatment on the Formation of Nano/Submicron Grain Size AISI 301 Austenitic Stainless Steels, *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 37A, ago. 2006, p. 2325-2338.
59. R. Magnabosco, S. Spomberg, Comparative study of ferrite quantification methods applied to duplex stainless steels. In: 7th European Stainless Steel Conference - Science and Market: Proceedings. AIM, 2011.
60. L. C. Morais. Simulação da cinética de formação da fase sigma durante envelhecimento isotérmico de aço inoxidável dúplex. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - FEI, Bolsista CAPES, 2017, 135 p. Orientador: Rodrigo Magnabosco.