



Projeto de iniciação científica

**Previsão da vida em fadiga de aços
inoxidáveis dúplex SAF 2205 e SAF 2507.**

Relatório final.

Bolsista: Gustavo H. B. Donato

e-mail: superguga@uol.com.br

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco
Departamento de Engenharia Mecânica - FEI

e-mail: rodrmag@feiedu.br

13 de Fevereiro de 2003.

Sumário

Resumo	04
<hr/>	
1-Objetivo	06
2-Revisão Bibliográfica	07
2.1-Aços inoxidáveis	07
Aços inoxidáveis dúplex	15
Elementos de liga	19
2.2-Propriedades dos aços inoxidáveis dúplex	22
2.3-Solicitação monotônica dos materiais	30
O ensaio de tração	30
2.4-Fadiga	38
2.4.1-Vida em fadiga	41
2.4.2-Mecanismos de formação de falha por fadiga	44
2.4.3-O ensaio de fadiga	56
2.4.4-Comportamento cíclico e controle do ensaio de fadiga:	58
2.4.5-Influência do acabamento superficial	62
3-Materiais e Métodos	65
3.1-Materiais	65
3.2-Métodos	64
Caracterização microestrutural	64
Análise da microdureza	68
Análise da fração volumétrica de ferrita	69



Ensaio mecânico	74
Medição da estrição	78
4-Resultados experimentais	80
4.1- Caracterização microestrutural	80
Caracterização com ácido oxálico	80
Caracterização com ataque de Behara modificado	84
Caracterização por interferência com luz polarizada sobre polimento com sílica coloidal	93
4.2- Análise da fração volumétrica de ferrita	98
4.3- Análise quantitativa da microestrutura	101
4.4- Microdureza Vickers	101
4.5- Ensaio de tração	108
4.6- Ensaio de fadiga	120
5- Discussão dos resultados	129
6- Conclusões	137
Apêndice A- Dano Acumulado	139
Apêndice B- Efeitos da tensão média na componente elástica do comportamento em fadiga:	142
7- Referências Bibliográficas	145

Resumo:

Este estudo visa a previsão da vida em fadiga dos aços inoxidáveis dúplex ferrita-austenita SAF2205 e SAF2507. Para tal, o estudo principal é a tomada de dados em ensaios de fadiga de baixo ciclo, verificando-se a influência das variáveis de ensaio e da microestrutura no comportamento a fadiga, possibilitando a confecção das curvas tensão-deformação cíclicas características e a determinação dos coeficientes de resistência e ductilidade a fadiga, dos expoentes de Basquim (b), de Coffin (c), além dos coeficientes e expoentes de encruamento monotônicos e cíclicos da equação de Ramberg-Osgood. Os materiais em estudo foram obtidos na forma de barras laminadas de diâmetro 20mm. Estas foram usinadas em sistemas CNC, dando origem a 120 corpos-de-prova segundo norma ASTM E606-92; foram posteriormente lixados e polidos, apresentando rugosidade superficial final média de 0,030 μ m. A fração volumétrica de fases foi determinada tanto por ferritoscópio como por estereologia quantitativa: as amostras, após o ataque eletrolítico de Behara modificado, foram submetidas a análise de imagens através do software Qmetals, conectado ao microscópio LEICA DMLM. Para o aço SAF2205 foram detectados 48% de ferrita e 52% de austenita, enquanto para o SAF2507, 47% de ferrita e 53% de austenita. A análise de microdureza apresentou média de 190 HV_{0,05} para o SAF2205 com picos de até 292 HV_{0,05} na superfície e para o SAF2507 média de 284 HV_{0,05} com picos de até 350 HV_{0,05} na superfície. A maior dureza na superfície é resultado da microestrutura mais refinada aí presente, devido ao processo de

fabricação empregado. Foram realizados ensaios de tração em corpos-de-prova de ambas as ligas, obtendo-se para o SAF2205: 532 MPa de limite de escoamento e 767 MPa de limite de resistência com 58,5% de alongamento em 25mm; para o SAF2507, obteve-se 613 MPa de limite de escoamento e 862 MPa de limite de resistência com 55,6% de alongamento em 25mm. Foram realizados ensaios de fadiga de baixo ciclo controlados por deformação, abrangendo o intervalo de 0,6% a 1,2% de amplitude de deformação. Ambas as ligas apresentaram nucleação e seguinte propagação de uma ou mais trincas por muitos ciclos, o que torna a falha visualizável e mais facilmente previsível. Para uma mesma amplitude de deformação, praticamente não ficaram evidentes diferenças significativas no comportamento das duas ligas a fadiga. Em ambos os casos o aquecimento das amostras se mostra intenso, mesmo em reduzidos níveis de deformação. Além disso, ambas as ligas apresentam o fenômeno de amolecimento cíclico.

Palavras chave: aços inoxidáveis dúplex; fadiga de baixo ciclo; ensaio de tração; SAF2205; SAF2507.



1-Objetivo:

No presente projeto de pesquisa, o objetivo foi a tomada dos dados que permitissem a previsão da vida em fadiga de dois tipos de aços inoxidáveis dúplex ferrita-austenita, o SAF 2205 e o SAF 2507, analisando, para isto, a influência da microestrutura destes materiais no comportamento à fadiga. Através dos ensaios de fadiga realizados em corpos-de-prova de ambos os materiais, foram levantados os coeficientes de resistência e ductilidade a fadiga, os expoentes de Basquim (b), de Coffin (c), além dos coeficientes e expoentes de encruamento cíclicos da equação de Ramberg-Osgood. Isso permitiu a análise de ambos os materiais quando solicitados ciclicamente.

2-Revisão bibliográfica:

2.1-Aços inoxidáveis:

O objetivo dessa revisão é uma análise das características dos aços inoxidáveis em geral, analisando o que são, qual é a sua constituição, e os fatores que os tornam inoxidáveis, o que agrega aos mesmos enorme importância tecnológica e econômica na indústria, como por exemplo aplicações em indústrias químicas, alimentícias e petrolíferas, além de analisar o fenômeno da fadiga em materiais metálicos. Deste modo, vai embasar o estudo da previsão da vida em fadiga dos aços inoxidáveis duplex SAF2205 e SAF2507.

Os aços em geral são basicamente ligas de ferro, com a presença de outros elementos em sua estrutura, os quais são responsáveis pelas diferentes propriedades que os aços adquirem. A adição de carbono ao ferro, por exemplo, apresenta aspectos negativos com relação à corrosão, porém é de extrema importância na obtenção das ligas ferro-carbono, com maior índice de dureza e resistência mecânica que o ferro sem este outro elemento. A porcentagem de carbono nos aços varia; porém, se for adicionada uma quantidade de carbono superior à que a estrutura do ferro suporta, ocorre a formação de uma fase distinta, a qual é denominada cementita. A cementita (Fe_3C) é um carboneto formado de ferro e 6,7% de carbono, e apresenta ligações covalentes. Esse fato confere à cementita uma característica frágil, além de dureza muito superior ao ferro puro, e alta resistência à oxidação [1].

No que diz respeito aos aços inoxidáveis, objetos deste estudo, com relação à estrutura metalúrgica, se dividem basicamente em 3 grupos [1,2]:

Austeníticos: apresentam estrutura cristalina cúbica de face centrada e possuem altos teores de elementos estabilizadores da austenita, como o níquel, manganês, nitrogênio, cobre e carbono. Recebem este nome pois tem a austenita (γ), fase do sistema Fe-C, estável inclusive em temperaturas inferiores à ambiente.

Os aços austeníticos são ligas de ferro, cromo (17 a 25%) e níquel (7 a 20%), podendo ser endurecidos por trabalho a frio (cerca de 4 vezes) e também ser facilmente soldados [3]. Além disso, possuem grande tenacidade, ductilidade e não são magnéticos. Em relação aos ferríticos (que serão apresentados a seguir), apresentam elevado custo, principalmente devido ao níquel adicionado. Com relação a trabalho em temperaturas adversas, são adequados tanto para trabalho a elevadas temperaturas (até 925°C), como a baixas temperaturas (inclusive aplicações criogênicas – abaixo de 0°C). São aços que apresentam elevada resistência à corrosão, porém são susceptíveis à corrosão sob tensão*. A presença de corrosão sob tensão intergranular só ocorre em aços sensitizados. Provoca o surgimento de falhas que atuam como concentradores de tensão que, aumentada localmente, levam à corrosão sob tensão. No entanto, alguns fatores acabam comprometendo os bons índices de resistência a este tipo de corrosão, como altas temperaturas, pH baixo, presença de H₂S e altas tensões aplicadas [5].

* A corrosão sob tensão ocorre quando o metal se encontra sob a ação simultânea de um meio corrosivo e de uma tensão mecânica, produzida, por exemplo, por deformação à frio [4].

A figura 2.1 representa a microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico.

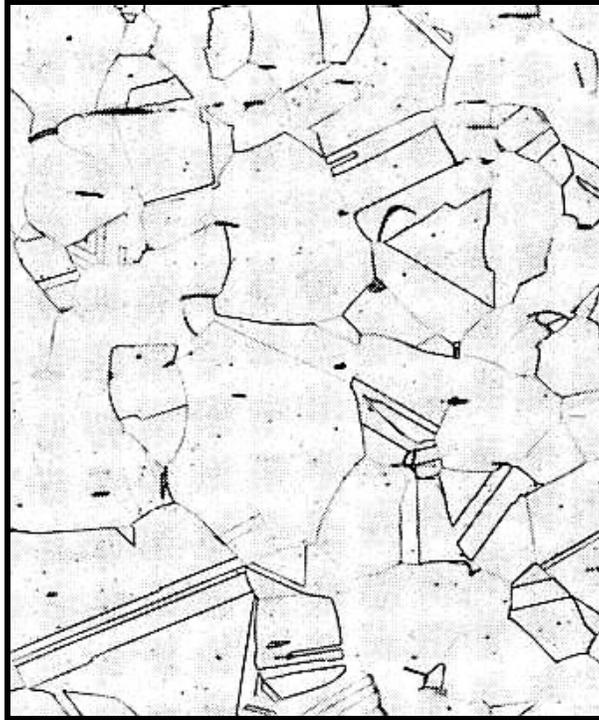


Figura 2.1: aço inoxidável AISI 316 recozido à 1035°C e temperado.
Ataque: H₂O-HCL-HNO₃ (100X) [3].

Ferríticos: apresentam estrutura cristalina cúbica de corpo centrado e tem a ferrita como fase predominante. O cromo, silício e o molibdênio atuam como estabilizadores dessa fase.

Os aços ferríticos são ligas de ferro e cromo (11 a 17%), e se comparados aos austeníticos apresentam normalmente menores custos, principalmente devido à menor presença de cromo e ausência de níquel. Apresentam menores ductilidade e tenacidade se comparados aos austeníticos, e são magnéticos. São soldáveis (com alguns cuidados

especiais) e facilmente conformados mecanicamente a frio. Sua resistência cresce ligeiramente por trabalho a frio (cerca de 50%). Apresentam elevada resistência à corrosão sob tensão. Apresentam transição dúctil-frágil, ou seja, fratura por clivagem, e por esse motivo não são adequados para trabalhos à temperaturas baixas [2,3]. A figura 2.2 representa a microestrutura típica de um aço inoxidável ferrítico.

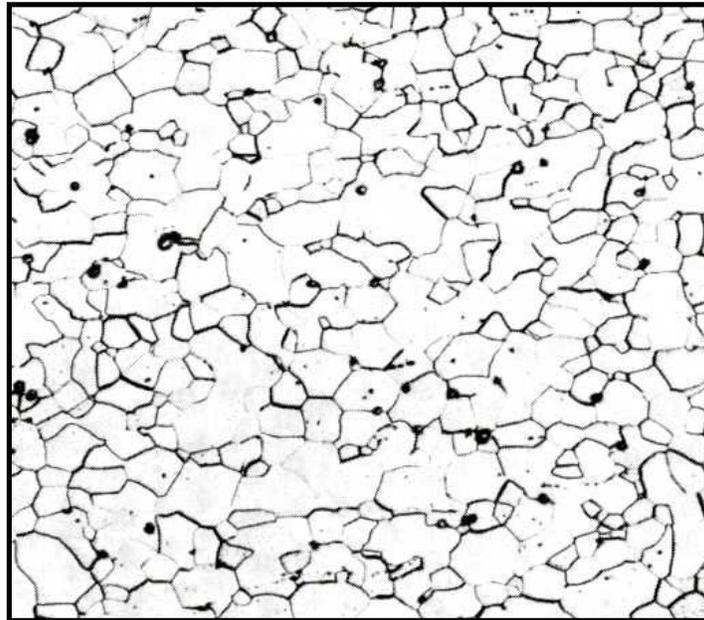


Figura 2.2: aço inoxidável AISI 409 recozido por uma hora a 870°C e resfriado no ar. Ataque: 10ml HNO₃-10ml ácido acético-15ml HCL-2 gotas de glicerol. (100X) [6]

Martensíticos: estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (fase martensita) após têmpera, e cúbica de corpo centrado (quando revenido, a martensita se decompõe em ferro α , CCC, e carbonetos de cromo finamente precipitados no revenimento, não visíveis na microscopia óptica).

Os aços martensíticos são ligas de ferro e cromo (12 a 18%), com um teor de carbono variando de 0,10% a até 1%, e possuem como característica principal moderada resistência à corrosão. São endurecíveis por tratamento térmico, podendo alcançar níveis mais elevados de resistência mecânica e dureza que as duas outras categorias. São aços magnéticos e não podem ser soldados [1-3]. A figura 2.3 representa a microestrutura típica de um aço inoxidável martensítico. Pode-se notar inclusive carbonetos de cromo não dissolvidos durante a austenitização.

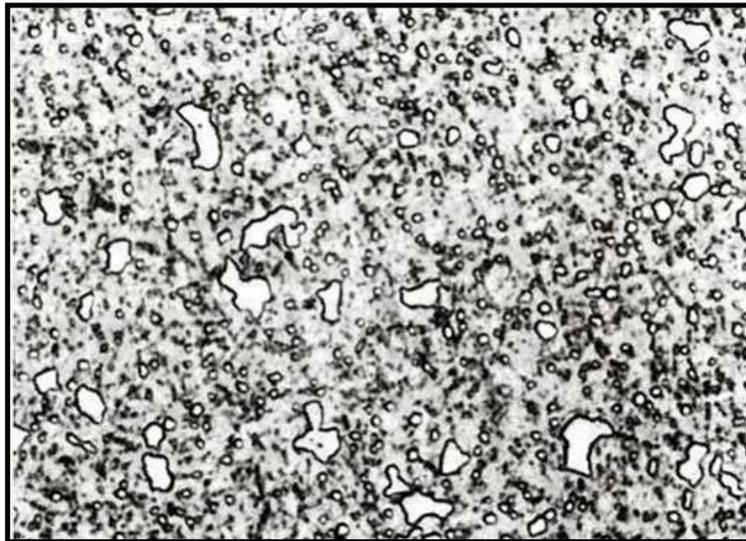


Figura 2.3: aço inoxidável martensítico AISI 440C, austenitizado por 1 hora à 1010°C, resfriado no ar e revenido 2h à 230°C. Ataque: Reativo de Vilella. (500X) [6].

Os aços inoxidáveis de maior fabricação e utilização nos Estados Unidos atualmente são o austenítico 304, seguido pelo ferrítico 409 [1].

Película passiva:

No caso dos aços inoxidáveis, o principal gerador da inoxidabilidade é o cromo, o qual deve estar presente na porcentagem mínima de 11% em solução sólida na matriz do material, o que possibilita a formação de um filme passivo superficial, aderente, não poroso e auto-regenerativo. Essa película é a chamada película passiva, e vai inibir a ação dos agentes corrosivos (atmosfera, meios aquosos ou orgânicos) sobre o material. Na figura 2.4, por se usar como base um aço baixo carbono, ao qual adicionou-se teores crescentes de cromo, ilustra-se a necessidade mínima de aproximadamente 13% de cromo em solução sólida na matriz do material para se obter a inoxidabilidade [1]. Já no caso do ferro puro, a porcentagem mínima observada é de 11% para a formação da película passiva.

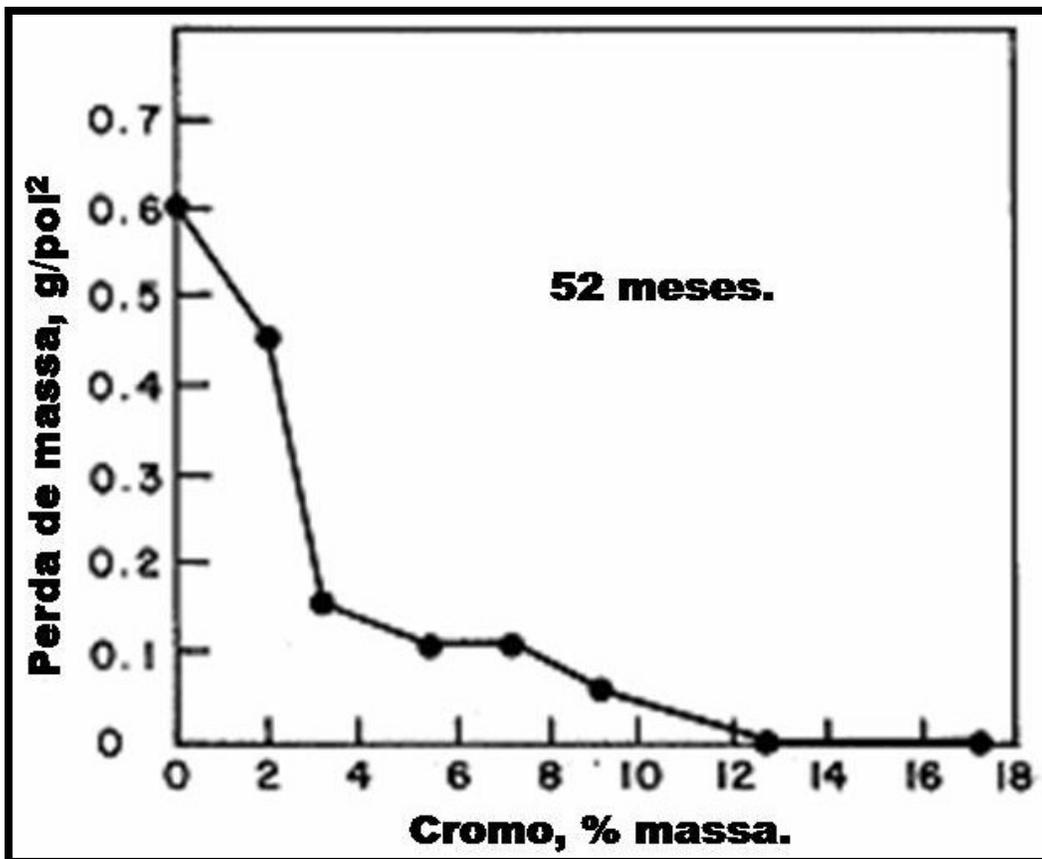


Figura 2.4: taxa de corrosão em função da porcentagem de cromo na matriz de um aço baixo carbono submetido a atmosfera [1].

A única maneira de prevenir o processo de corrosão no aço é proteger sua superfície. Essa proteção pode ser feita através de pinturas, óleos especiais ou filmes não porosos, os quais tem por função eliminar o contato da superfície com o ambiente. No caso da película passiva, o cromo contido nos aços inoxidáveis reage com oxigênio do ar formando uma fina camada. Apesar de muito fina, esta camada de óxido de cromo não é porosa e portanto impede que a superfície do aço entre em contato com a atmosfera. Isto previne a corrosão do aço provocada pelo meio ambiente, como mostra a figura 2.5. Esta camada, chamada película passiva, é aderente, resistente e

invisível a olho nú, permitindo que o brilho natural do metal possa ser visto. Se danificada, é capaz de se autoregenerar quase instantaneamente, mantendo a proteção do aço [2].

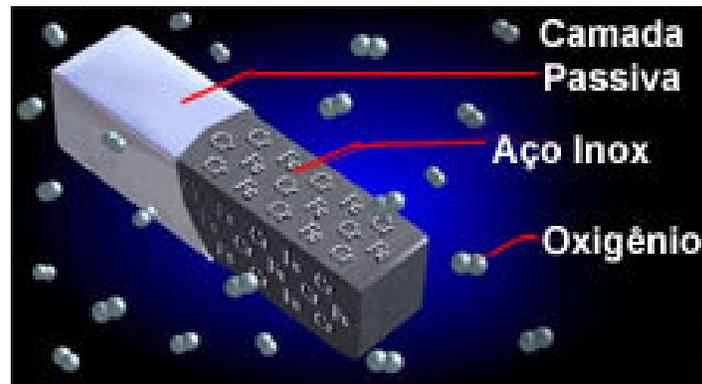


Figura 2.5: esquema de formação de película passiva em aços inoxidáveis [2].

Além do cromo, existem outros compostos de liga que agindo sinergeticamente com este elemento, podem aumentar ainda mais a resistência à corrosão. São eles o níquel, o nitrogênio e o molibdênio. Além disso, para que se consiga manter os índices de resistência à corrosão, deve-se reduzir a presença de carbono a no máximo 0,03%, para que este não se combine com o cromo disponível, reduzindo localmente a concentração desse elemento e permitindo maior ataque corrosivo, comprometendo a inoxidabilidade, um fenômeno conhecido como sensitização [1].

O fenômeno da sensitização é identificado pela corrosão intergranular em um aço inoxidável, principalmente pela precipitação, nestas regiões, de fases ricas em cromo devido à maior velocidade de difusão desse elemento nos contornos de grão. Isso resulta em uma região pobre em cromo ao redor do contorno de grão, levando à corrosão preferencial dessas regiões [1,9].

Pode-se aplicar tratamentos térmicos ao material para redifundir o cromo para as regiões sensibilizadas, ou ainda adicionar a aços com %C superior a 0,03% titânio ou nióbio (ou ainda tântalo), os quais agem positivamente contra a sensibilização, já que geram carbonetos mais estáveis que os de cromo, impedindo a formação de regiões empobrecidas deste elemento pela precipitação de carbonetos de cromo [1].

A sensibilização ocorre preferencialmente nos contornos de grão, e quando ocorre gera fortes mudanças nas propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis. Como resultado, nota-se aumento da resistência mecânica devido à precipitação finamente dispersa das novas fases e um grande aumento de dureza. Por outro lado ocorre uma grande fragilização do material sensibilizado, com diminuição nos valores de ductilidade e de tenacidade.

Como visto, de acordo com a estrutura metalúrgica do aço, existem vantagens e desvantagens apresentadas distintamente por cada um dos grupos. Surge, então, a necessidade da obtenção de um aço inoxidável que alie as qualidades dos aços ferríticos e austeníticos, especialmente com relação à resistência mecânica, tenacidade e resistência à corrosão. Como resposta à essa necessidade surgem os aços inoxidáveis dúplex.

Os aços inoxidáveis dúplex: são aços produzidos através do sistema AOD (descarburação por sopro combinado de oxigênio e argônio), e por isso apresentam muito baixo teor de carbono; assim, são praticamente imunes à sensibilização por precipitação de carbonetos de cromo. Novas tecnologias permitem o aumento do teor de nitrogênio nos aços inoxidáveis,

especialmente nos dúplex, levando a aumentos consideráveis de resistência mecânica, tenacidade e resistência à corrosão [7].

O estudo da metalurgia física desses aços pode ter início com a análise do sistema ternário Fe-Cr-Ni, sua composição básica. Basicamente quatro fases sólidas são encontradas nesse ternário. Três delas são soluções sólidas, sendo elas a austenita (γ , CFC), ferrita (α , CCC) e α' (CCC rica em cromo). A quarta fase é intermetálica, denominada sigma (σ). Usualmente denomina-se por δ todo sólido de estrutura cúbica de corpo centrado formado na solidificação [5]. No entanto, tal denominação é usualmente substituída por α em diversas referências [5,8]. Na figura 2.6 tem-se a secção isotérmica a 1300°C do ternário Fe-Cr-Ni.

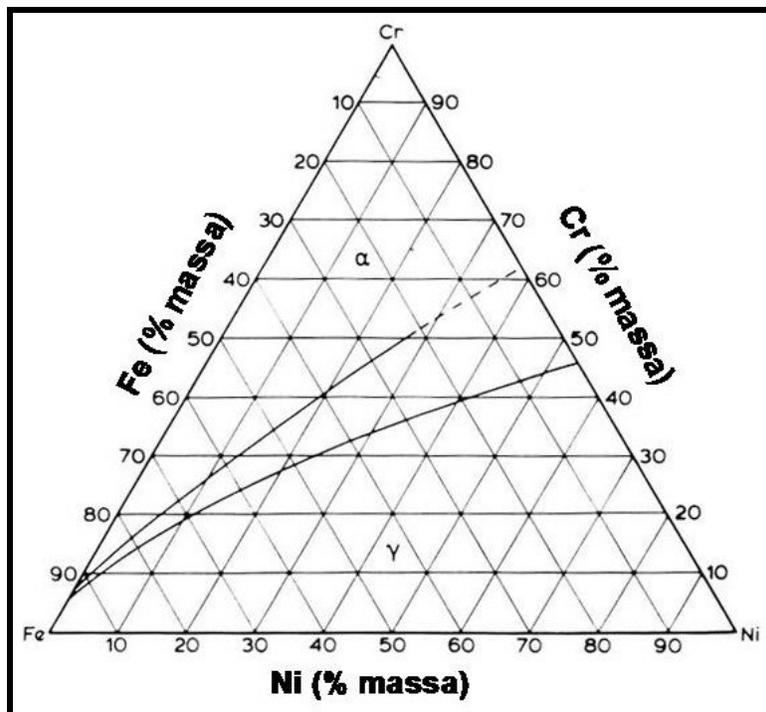


Figura 2.6: Seção isotérmica a 1300°C do ternário Fe-Cr-Ni [8].

O desenvolvimento da estrutura dúplex ferrita-austenita nos aços inoxidáveis dúplex pode se dar pela correta escolha de composição e da execução de um tratamento de solubilização seguido de resfriamento rápido [8]. As figuras 2.7, 2.8 e 2.9 representam as isotermas do sistema Fe-Cr-Ni, respectivamente para as temperaturas de 1200°C, 1100°C e 1000°C. Pode-se notar que a menores temperaturas, a região de equilíbrio entre as fases ferrita e austenita aumenta.

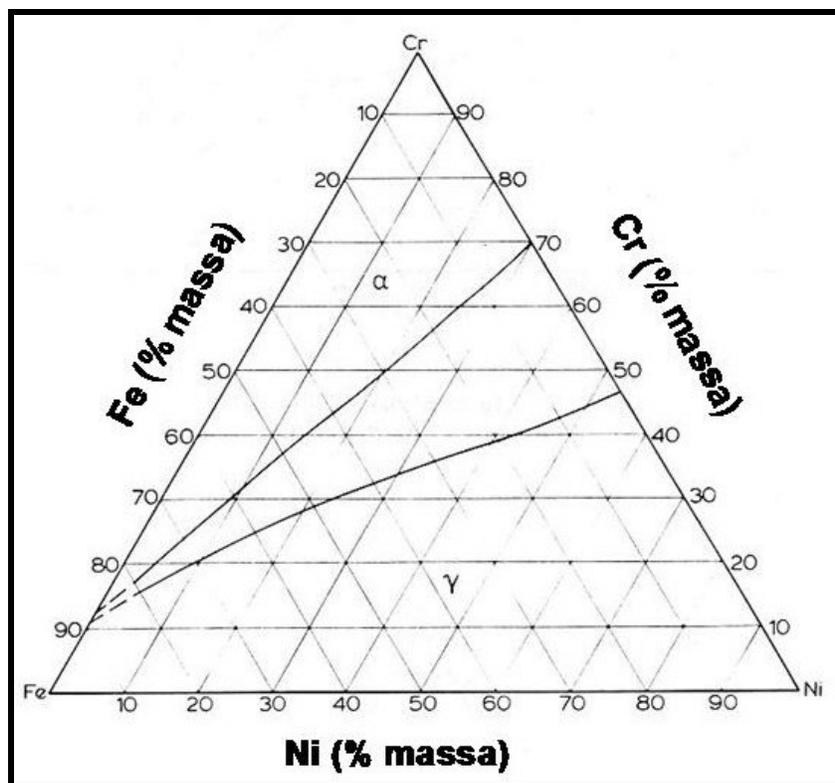


Figura 2.7: Seção isotérmica a 1200°C do ternário Fe-Cr-Ni [8].

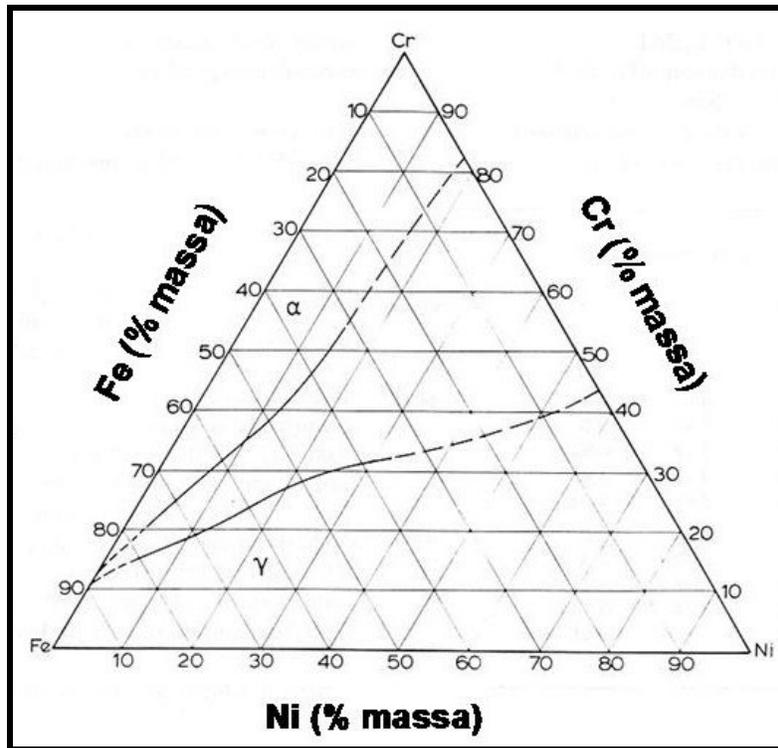


Figura 2.8: Seção isotérmica a 1100°C do ternário Fe-Cr-Ni [8].

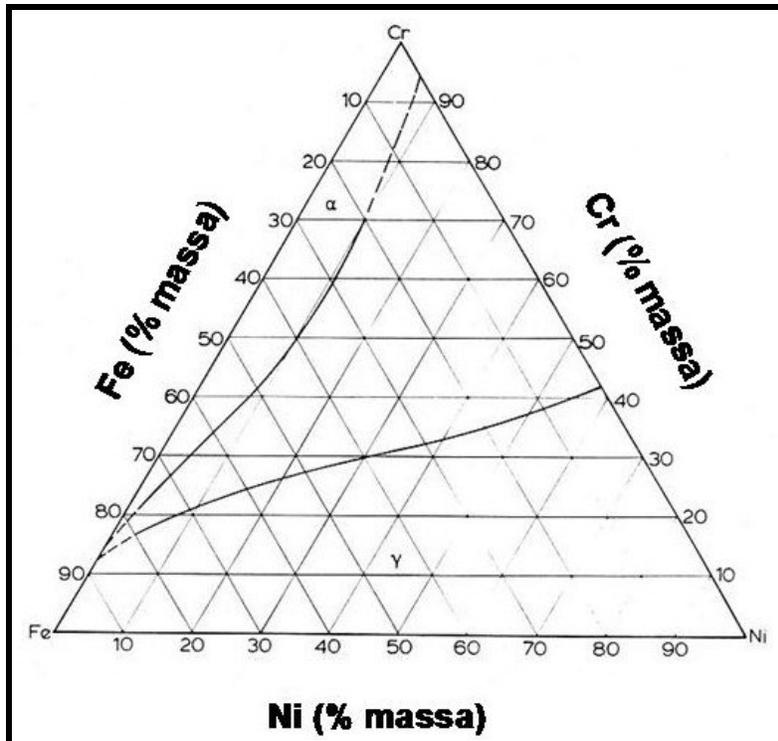


Figura 2.9: Seção isotérmica a 1000°C do ternário Fe-Cr-Ni [8].

Elementos de liga:

Listados a seguir estão alguns elementos normalmente adicionados aos aços inoxidáveis e suas respectivas conseqüências para a nova liga [1].

Cr (cromo): A resistência à corrosão possui uma dependência direta com o teor presente deste elemento. Quanto maior o teor de cromo contido na liga, maior é a resistência à corrosão do aço. O cromo livre em solução sólida na matriz do material vai se combinar com o oxigênio do ar possibilitando a formação da película passiva, protegendo o material contra os agentes corrosivos.

Ni (níquel): O níquel altera a estrutura cristalográfica da liga, conferindo maior ductilidade, e tornando o aço não magnético. Além disso, associado ao cromo, favorece o aumento da resistência à corrosão.

C (carbono): causa endurecimento e aumento na resistência mecânica da liga. Porém, associado ao cromo prejudica a resistência à corrosão. É estabilizador da austenita.

Ti (titânio) e Nb (nióbio): Apresentam uma importante função na manutenção da inoxidabilidade. Evitam a ocorrência da combinação do carbono com o cromo, evitando assim perda de resistência à corrosão [1,2].

N (Nitrogênio): Juntamente com o cromo e molibdênio, é usado para propiciar maior resistência à corrosão. Adições de nitrogênio entre 0,1% e 0,3% aumentam significativamente a resistência à corrosão por pite. Estudos em uma liga Fe-25Cr-5Ni-2,4Mo-3Cu mostram que a adição de 0,1% de nitrogênio aumenta o potencial de pite em uma solução 3% NaCl a 30°C. A

adição de nitrogênio aumenta a resistência à corrosão da fase austenita e reduz a partição do cromo, mantendo altos teores de cromo na austenita. Por esse motivo o aumento da resistência à corrosão é bastante significativo [1,5].

Estrutura dúplex ferrita-austenita:

Para a verificação da formação da estrutura dúplex ferrita-austenita, pode-se utilizar os valores de cromo e níquel equivalentes obtidos pelas equações 2.1 e 2.2 [9]:

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5.\%Si + 0,5.\%Nb \quad (\text{eq.2.1})$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 0,5.\%Mn + 30.(\%C + \%N) \quad (\text{eq.2.2})$$

Para uma composição química média do aço SAF2205 22,0%Cr – 5,5%Ni – 3,0%Mo – 1,7%Mn – 0,8%Si – 0,14%N – 0,03%C [1], obtém-se $Cr_{eq}=26,2\%$ e $Ni_{eq}=11,5\%$. Traçando-se sobre a Figura 2.8 as linhas que definem o equilíbrio entre α e γ (“*tie-lines*”) fornecidas por [8] e a composição “equivalente” de cromo e níquel do aço SAF 2205 obtém-se a Figura 2.10. Nota-se que conduzindo o tratamento isotérmico deste aço a aproximadamente 1100°C, seguido de resfriamento rápido, pode-se formar a estrutura dúplex ferrita-austenita. Se a “*tie-line*” que passa pelo ponto A da Figura 2.10 for paralela a traçada a direita deste, tem-se que o aço SAF 2205

solubilizado a 1100°C e resfriado rapidamente deve apresentar estrutura contendo aproximadamente 39% em massa de ferrita e 61% de austenita[4], o que é aceitável já que Magnabosco^[4] demonstrou que o aço SAF2205 solubilizado a 1120°C possui 40,9% α e 59,1% γ , valores muito próximos aos encontrados neste cálculo.

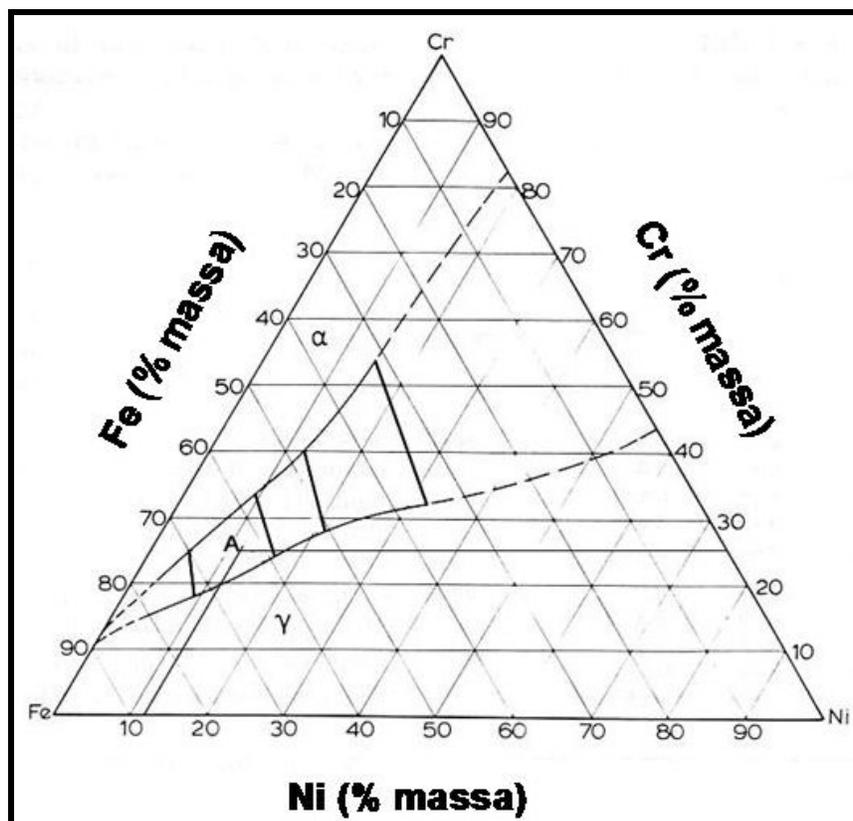


Figura 2.10: Seção isotérmica a 1100°C do ternário Fe-Cr-Ni, mostrando as “tie-lines” no campo α / γ . O ponto A representa a composição (em cromo e níquel equivalentes) do aço SAF 2205 [5].

Os aços inoxidáveis dúplex, como os aços deste estudo, possuem estrutura idealmente composta por 50% de austenita e 50% de ferrita, e daí

vem a classificação dúplex [1]. A estrutura típica é composta em média por 40% a 45% de ferrita e 55% a 60% de austenita, obtidas após solubilização entre 1000°C e 1200°C e resfriamento brusco [5]. Caso a proporção dessas duas fases fuja dessa ordem de valores, os materiais recebem a denominação “*dual phase*”, ou bifásicos.

2.2-Propriedades dos aços inoxidáveis dúplex:

Com relação aos aços inoxidáveis dúplex, a produção atual é pequena se comparada com a dos ferríticos e austeníticos, mas é de grande importância pois têm utilização bastante específica, principalmente em indústrias de ponta, como indústrias químicas, petrolíferas, de geração de energia e também de papel e celulose, entre outras [1].

Esse tipo de aço tem um comportamento superplástico, indicado pelas grandes e uniformes deformações às quais podem ser sujeitos sem a formação de estrição em temperaturas próximas à metade da temperatura de fusão dos mesmos. A superplasticidade estrutural é causada pela presença de uma estrutura muito refinada, obtida durante a transformação de parte da fase ferrítica para a formação da estrutura austenítica/ferrítica [1].

As diferentes microestruturas são determinadas pela composição química e histórico termomecânico. Durante a deformação a quente, a matriz ferrítica é bastante dúctil, devido à ocorrência de recristalização dinâmica. Com o aumento da fração volumétrica de austenita, há aumento da resistência mecânica, e quando se forma a estrutura dúplex há redução de ductilidade, resultado da formação de cavidades em pontos triplos e

interfaces ferrita/austenita, devido à grande diferença de comportamento mecânico mostrado por estas duas fases.[5]

A figura 2.11 representa a microestrutura de um aço inoxidável dúplex.

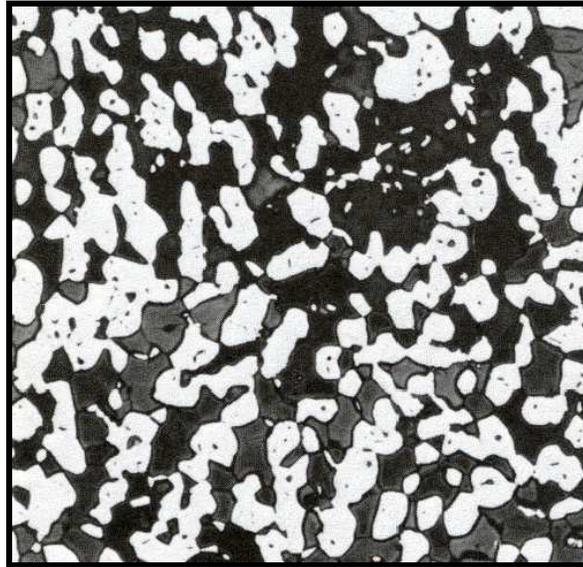


Figura 2.11: Aço inoxidável duplex AISI 312 recozido com ferrita (escura) e austenita (branca). Ataque: solução aquosa HCL 10%-K₂S₂O₅ 1%. (200X) [6]

O aço inoxidável dúplex mais conhecido é o SAF 2205 (ou UNS S31803), que possui ampla utilização nas indústrias químicas, de óleo, gás, papel e celulose, aplicado principalmente em evaporadores, dutos e tanques de condução e armazenamento de material corrosivo. A composição química típica desse material é 22% Cr – 5% Ni – 3% Mo – 0.15% N – 0.02% C [7].

Um outro aço inoxidável dúplex de grande importância é o SAF 2507. Este é um aço de concepção recente e se encaixa na classificação de superdúplex. Apresenta ótimas propriedades mecânicas e excelente resistência à corrosão. Sua composição química nominal é (24-26)% Cr – (6-8)% Ni – 0,03% C – 1.2% Mn – 0.8% Si – 0.035% P – 0.020% S – (0.24-0.32)% N - (3-5)% Mo [1].

Quanto às propriedades mecânicas, o aço inoxidável SAF 2205 ocupa um lugar de destaque dentre os inoxidáveis, pois possui um limite de resistência à tração de 770 MPa, limite de escoamento próximo de 515 MPa (praticamente o dobro do encontrado em aços inoxidáveis austeníticos como os AISI 304 e 316) [7] e alongamento em 50mm superior a 32% [10]. Diversos autores mencionam a possibilidade de soldagem no aço SAF 2205 sem prejuízo das propriedades mecânicas e de resistência à corrosão. Sua utilização em condições criogênicas, no entanto, não é possível por apresentar transição gradual de comportamento dúctil-frágil [5]. Sua resistência à corrosão supera a dos austeníticos, mesmo os de baixo teor de carbono.

Pesquisadores como DAVISON e REDMOND descrevem as propriedades mecânicas mínimas dos aços inoxidáveis dúplex; no caso do aço SAF 2205, apontam um limite de escoamento mínimo de 450MPa, limite de resistência mínimo 620MPa e alongamento mínimo em 50mm de 25%. Além disso, denominam o aço SAF 2205 como de segunda geração, pelo alto teor de nitrogênio e baixo carbono nele encontrado, e afirmam ser possível a manutenção da tenacidade, resistência mecânica e corrosão, mesmo após procedimentos de soldagem, fazendo deste aço um dos dúplex mais utilizados até mesmo em condições de climas árticos [5].

A correta escolha dos parâmetros de soldagem (fornecimento de energia, atmosfera protetora, material de adição e seqüência de soldagem) podem produzir juntas soldadas de propriedades mecânicas equivalentes a do metal de base, sem prejuízo de tenacidade. Tal fato amplia o universo de utilização dos aços dúplex, e é responsável pela extensa utilização destes [5].

O aço inoxidável dúplex SAF 2507 apresenta ótimas características de resistência mecânica, resistência à corrosão e soldabilidade. Assim como o SAF 2205, o aço SAF 2507 merece um lugar de destaque devido a suas propriedades. Apresenta como valores mínimos 800 MPa de tensão limite de resistência, 550 MPa de tensão limite de escoamento e 25% de alongamento. Já com relação à dureza, apresenta um valor máximo de 28 HRC [1].

Os aços dúplex apresentam limites de fadiga bem definidos, ficando bem clara a dependência desses com o limite de escoamento. O aço SAF 2205 apresenta limite de fadiga da ordem de 285 MPa (tensão máxima de tração), ou 63% do limite de escoamento [5].

Por outro lado, no caso da existência de fases precipitadas neste aço (como sigma ou α' , que se formam respectivamente a 700°C-900°C e 400°C-500°C), ocorre grande variação de tenacidade, com redução dos níveis de energia absorvida em ensaios de impacto. A precipitação de fases no material, como a fase sigma, gera aumento de resistência mecânica, como pode se notar em ensaios de dureza de amostras com presença desta fase, porém causa grande fragilização, com redução da ductilidade e da tenacidade à fratura. A figura 2.12 mostra a relação inversa da dureza e da tenacidade de acordo com o tempo de envelhecimento das amostras de aço SAF 2205 a 850°C.

Estudos recentes mostraram que a fratura frágil em aços inoxidáveis dúplex ocorre para frações volumétricas de fase sigma superiores a 5% e que frações volumétricas inferiores a 2% não impedem a ocorrência de fratura dúctil em ensaio *Charpy* [5]. A figura 2.13 representa o aspecto da fase sigma

precipitada em aço inoxidável dúplex SAF 2205 envelhecido a 850°C. Além da fase sigma, podem aparecer diferentes fases nos aços inoxidáveis dúplex, como fase chi, carbonetos, fase de Laves, fase π , nitretos de cromo, ou ainda austenita e ferrita secundárias.[5]

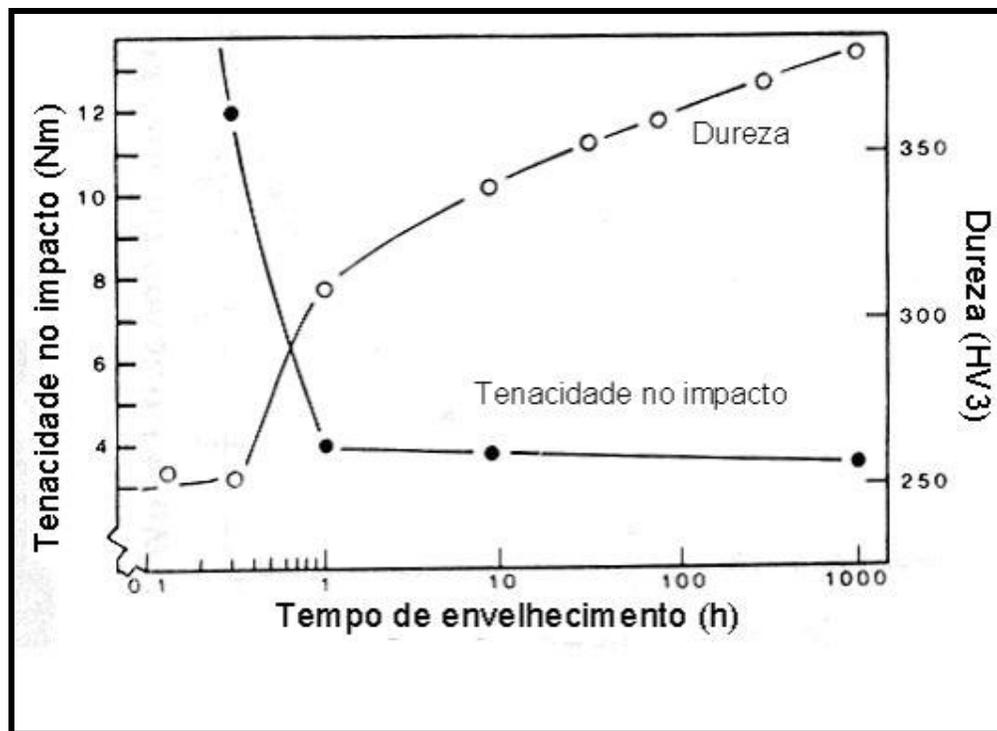


Figura 2.12: Propriedades mecânicas do aço SAF 2205 após envelhecimento a 850°C.[5]