FRAGILIZAÇÃO EM FLANGES DE AÇO INOXIDÁVEL SUPERDUPLEX DEVIDO À PRESENÇA DE FASE SIGMA

EMBRITTLEMENT OF SUPERDUPLEX STAINLESS STEEL FLANGES IN PRESENCE OF SIGMA PHASE

[i] Diego da Rocha Ramos [1]
[ii] Fernando Antonio Corrêa[2]
[iii] Odilon de Moraes Júnior[3]
[iv] Mateus Botani de Souza Dias[4]

RESUMO
Durante a etapa de montagem dos internos de um vaso de aço inoxidável superduplex foi detectada uma trinca passante em um bocal, este vaso já havia sido aprovado em todos os ensaios não destrutivos previstos, inclusive o teste hidrostático. Durante análise de falha foi detectada a presença de fase sigma no metal base. Devido aos resultados obtidos durante a análise de falha, foram avaliados 390 flanges fornecidos pelo mesmo fabricante. Ao longo deste trabalho foi discutido se os requisitos normativos adotados para aquisição de componentes em aço inoxidável superduplex são suficientes para evitar eventos semelhantes

Palavras-chave: Fase sigma; correntes parasitas; aço inoxidável superduplex

ABSTRACT
During the step of internal components mounting, was detected a crack in a nozzle of pressure vessel made of superduplex stainless steel, this vessel has been already approved in non-destructive test, including hydrostatic test. During the failure analysis was detected the presence of sigma phase in base metal. Due the results obtained during failure analysis, was analyzed 390 flanges, whose were supplied by the same manufacturer. Throughout this work was discussed if the standard requisites were enough to prevent similar events in the future.

Keywords: Sigma phase, Eddy current; superduplex stainless steel

[1] Pós-graduado em Engenharia de Soldagem na Faculdade SENAI de Tecnologia “Nadir Dias de Figueiredo”. E-mail: diego.rocha.ramos@gmail.com
[2] Doutorando em Ciência e Engenharia de Materiais; Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais; Engenheiro de Soldagem/EWF-DVS/SLV; Professor Assistente na Faculdade de Tecnologia “Senai Nadir Dias Figueiredo”. E-mail: fernando.correa@sp.senai.br
[3] Docente e Mestre em Engenharia Metalúrgica da Escola e Faculdade SENAI de Tecnologia em Processos Metalúrgicos, E-mail: odilon.junior@sp.senai.br
[4] Doutor em Engenharia de Materiais e Professor Assistente na Faculdade de Tecnologia “Senai Nadir Dias Figueiredo”. E-mail: mateus.dias@sp.senai.br.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Problema de pesquisa

O aço inoxidável superduplex, amplamente utilizado em plataformas de petróleo, pode sofrer fragilização devido à formação da fase sigma, que compromete sua resistência à corrosão e desempenho estrutural. Identificar e mitigar esse efeito é fundamental para garantir a integridade de flanges e outros componentes críticos.

1.2 Objetivo(s)

Este estudo busca investigar os mecanismos de fragilização causados pela fase sigma em flanges de aço inoxidável superduplex, com o objetivo de compreender as condições que favorecem essa formação e propor medidas de prevenção que garantam maior durabilidade e segurança em operações de extração de petróleo.

1.3 Justificativa

Dado o ambiente corrosivo de plataformas de petróleo e a alta demanda por materiais que suportam contaminantes agressivos, entender a fragilização do aço inoxidável superduplex é crucial para evitar falhas em flanges e tubulações. Isso contribuirá para melhorar a seleção de materiais e prolongar a vida útil dos equipamentos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 - AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX E SUPERDUPLEX

Os aços inoxidáveis duplex e superduplex são materiais com microestrutura bifásica, composta por frações volumétricas iguais de ferrita e austenita. Esta microestrutura permite associar a resistência à corrosão com propriedades mecânicas de tração superiores aos valores apresentados pelo aço carbono, resistência ao impacto e tenacidade à fratura (Silva, et al., 2010). Os aços inoxidáveis do tipo 22Cr e 25Cr são os materiais indicados pela norma NorsoK M-001 para aplicação em unidades de produção de óleo e gás (Norsok Standard, 2002).

Os aços inoxidáveis podem solidificar de diferentes modos em função da sua composição, conforme pode ser visto abaixo:

A - Modo ferrítico

$L \rightarrow \delta + L \rightarrow \delta$

B - Modo ferrítico-austenítico

$L \rightarrow \delta + L \rightarrow L + \delta + \gamma \rightarrow \delta + \gamma$

C - Modo austenítico-ferrítico

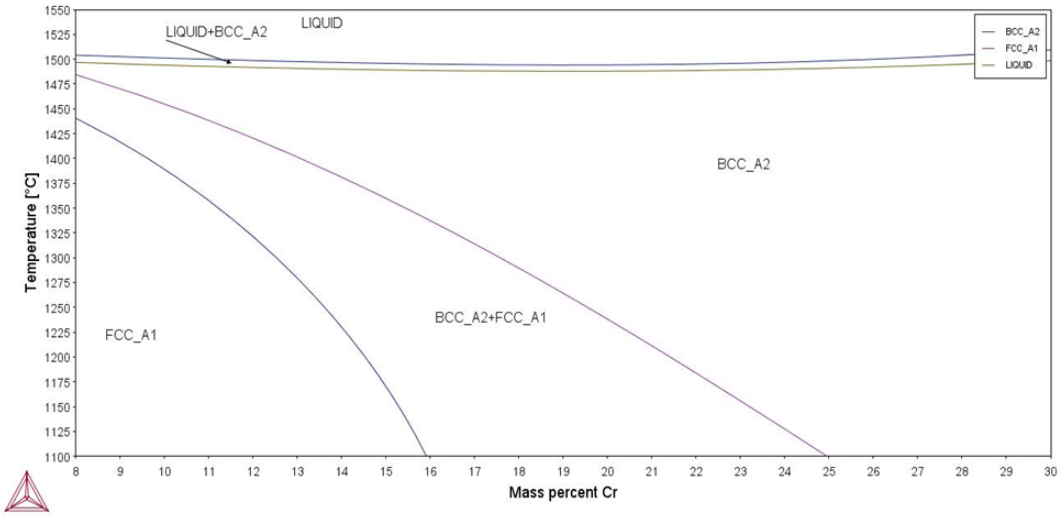
$L \rightarrow L + \gamma \rightarrow L + \gamma + \delta \rightarrow \gamma + \delta$

D - Modo austenítico

$L \rightarrow L + \gamma \rightarrow \gamma$

O modo de solidificação será determinado pela quantidade de elementos que aumentam o campo da ferrita ou da austenita, na Figura 1, abaixo é mostrado o efeito do teor de cromo no modo de solidificação. Nota-se que a forma de solidificação dos aços inoxidáveis duplex com teor de cromo entre 22 e 23% em massa, ocorre através do modo ferrítico.

Figura 1: Diagrama calculado através do software Thermocalc® considerando uma composição inicial de Fe-22Cr-5Ni. A seta vermelha indica a linha onde ocorre a transformação do líquido em ferrita e a seta azul indica a decomposição da ferrita em austenita



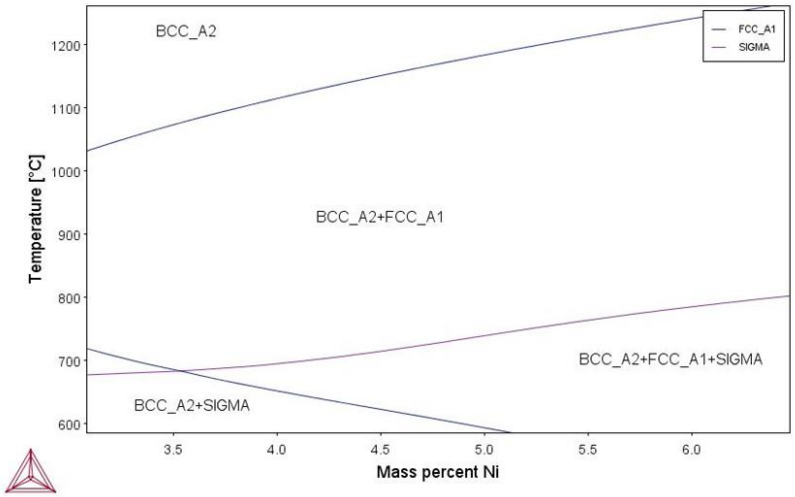
Fonte: O Autor, 2022

Conforme pode ser visto na Figura 1, com a diminuição da temperatura, ocorre a transformação da ferrita (δ) em austenita (γ) através de mecanismo difusional de nucleação e crescimento (Padilha, et al., 2012).

2.2 – Fase Sigma

A fase sigma é uma fase que pode precipitar diretamente da ferrita delta (Magnabosco, 2009) ou pode resultar da decomposição eutetóide da ferrita delta em sigma e austenita (Padilha, et al., 2012). A fase sigma é uma fase intermetálica com características que acarretam a degradação das propriedades mecânicas e diminuição da resistência à corrosão. Na Figura 2, a seguir, é mostrada o diagrama de equilíbrio típico de uma Fe-22Cr-5Ni

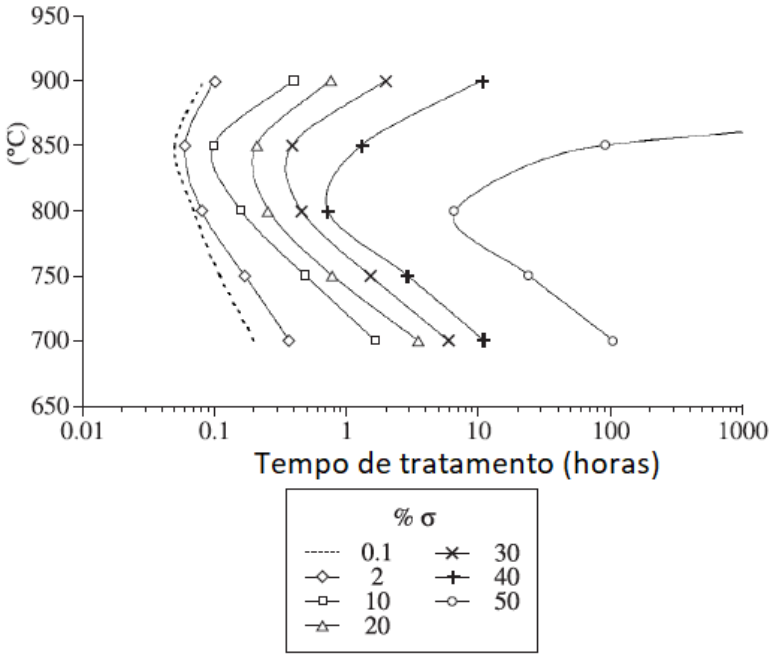
Figura 2: Diagrama calculado através do software Thermocalc® considerando uma composição inicial de Fe-22Cr-5Ni. A seta azul indica temperatura onde começa a formação da fase sigma.



Fonte: O Autor, 2022

A fração volumétrica de fase sigma presente no aço inoxidável, será função do tempo de permanência na temperatura de precipitação, conforme pode ser visto na Figura 3, adaptada de Magnabosco (Magnabosco, 2009).

Figura 3: Fração volumétrica de fase sigma em função da temperatura e tempo de transformação adaptada de Magnabosco.



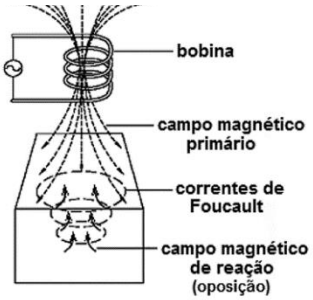
Fonte: Magnabosco, 2009

A curva apresentada na Figura 3, mostra que a exposição de aços inoxidáveis duplex e superduplex à temperatura de 850°C por cerca de meia hora, pode conduzir a frações volumétricas de fase sigma superiores a 2%.

2.3 – Correntes Parasitas

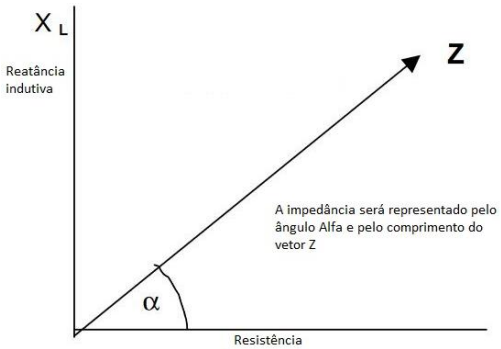
Quando uma corrente alternada passa por uma bobina condutora, cria-se um campo magnético que, ao se aproximar de outro material condutor, gera um campo magnético de reação e uma corrente de Foucault ou corrente parasita (Figura 4) (Cattani et al., 2014).

Figura 4: D Esquema mostra o efeito do campo magnético em material condutor.um campo magnético sobre



Fonte: Cattani, 2014

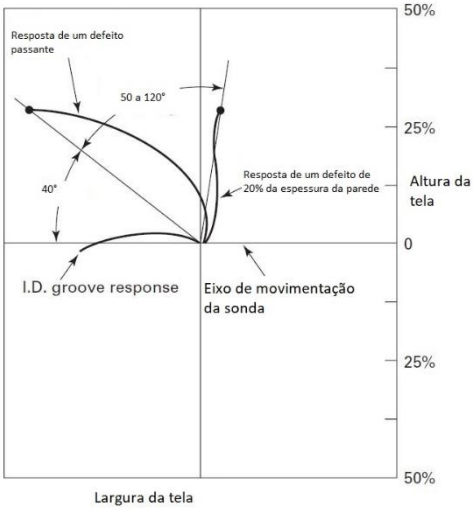
Figura 5: O ângulo alfa e o vetor Z são influenciados por defeitos e fases do material.



Fonte: Cattani, 2014

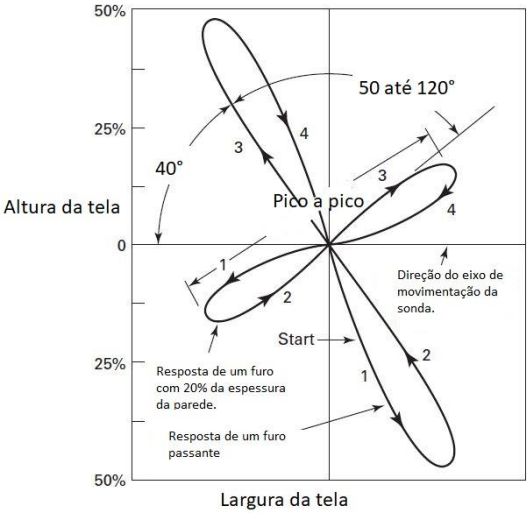
A resposta do ensaio é um gráfico de reatância indutiva versus resistência, conforme pode ser visto na Figura 5. A imagem típica de um ensaio de correntes parasitas em um tubo padrão pode ser vista utilizando a técnica absoluta na Figura 6 e utilizando a técnica relativa na Figura 7.

Figura 6: Sinal típico de ensaio por correntes parasitas utilizando a técnica absoluta, adaptado do ASME V



Fonte: ASME V, 2010

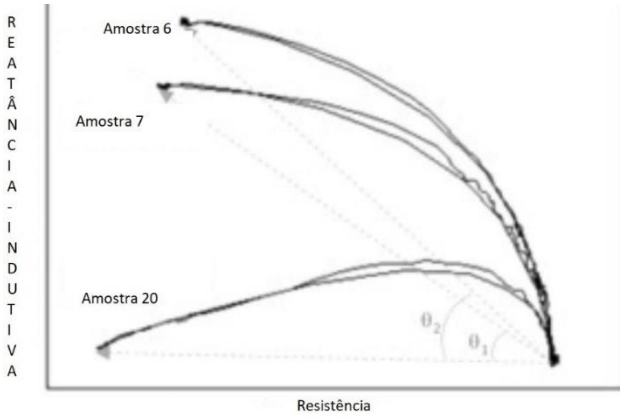
Figura 7: Sinal típico de ensaio por correntes parasitas utilizando a técnica relativa, adaptado do ASME V



Fonte: ASME V, 2010

A técnica de correntes parasitas é amplamente utilizada na avaliação de integridade de tubos de trocadores de calor, conforme indicado na norma ASME V. Camerini et al. (2015) investigaram a aplicação dessa técnica para quantificar a fase sigma em aços inoxidáveis duplex e superduplex, demonstrando que sua presença em aços superduplex altera a curva de impedância do material. As amostras de aço UNS S32750 foram submetidos a tratamentos térmicos específicos para a preparação controlada da fase sigma, com quantificação por metalografia e difração de raios X. Ensaios de correntes parasitas demonstraram o impacto da fração volumétrica da fase sigma na impedância, permitindo traçar uma curva que se relaciona a concentração dessa fase ao ângulo alfa da curva de impedância, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8: Efeito da fração volumétrica de fase sigma na curva de impedância de um aço UNS S32750



Fonte: Carmerini, 2015

3 METODOLOGIA

3.1 – SELEÇÃO DE MATERIAIS

A seleção de materiais para tubulações é realizada conforme os parâmetros preconizados nas diretrizes de tubulações. As diretrizes para seleção de materiais para sistemas de tubulações, no setor de E&P da PETROBRAS, são baseadas em documentos técnicos conhecidos internamente como DR-ENGP. As tubulações das plataformas do projeto REPLICANTES seguiram o documento técnico I-ET-3010.92-1400-200-KFB-001 baseado no DR-ENGP-1.1-R.3. A especificação técnica I-ET-3010.92-1400-200-KFB-001 apresenta os materiais a serem adotados em função do fluido de processo, material e a classe de pressão, segue abaixo trecho do padrão B16, a Figura 9 traz os materiais aplicáveis para tubos, a Figura 10 traz os requisitos de materiais para acessórios e a Figura 11 traz os requisitos para flanges conforme o padrão B16.

Figura 9: Trecho do padrão B16, a classe de pressão é 150# e em função do diâmetro são selecionados o tipo de material e a sua respectiva espessura

TUPI BV	TECHNICAL SPECIFICATION	N°. I-ET-3010.92-1400-200-KFB-001	REV. G
	PRESALT FPSOS - PETROBRAS 66 (P-66)	SHEET 31 of 122	
	TITLE: AMENDMENT 3 - PIPING MATERIALS TECHNICAL SPECIFICATION	CORPORATE	
		IEREPL	

CODE	Service	Temp. Range	Corrosion Allowance	Class	Standard
ASME B31.3	AM - Amine (Note 11); PC - Process (Corrosive Hydrocarbon) (Note 13); F - Safety System and Flare.	-46°C/130°C (Note 10)	---	150	B16

Pipes and Fittings						Valves (Notes 8 and 9) Ball		
Item	Tag	Size (in)	Wall or Class	Ends	Material	Size	Description	Tag
Pipe	T-36	1/2" - 1 1/2"	Sch 40S	PLAIN	ASTM A 790 (UNS S31803) seamless	1/2" – 1 1/2"	Ball valve; class 800; SW; duplex steel, RPTFE® seat.	VE-209
	T-37A	2" - 6"	Sch10S	BW		2" - 4"	Ball valve; class 150; FLG; RF; duplex steel, RPTFE® seat.	VE-210
	T-47	8" - 24"			ASTM A928 (UNS S31803) CLASS 1 or 3 welded (E=1)	6" - 24"	Ball valve; class 150; FLG; RF; gear; duplex steel, RPTFE® seat.	VE-211
		26" - 28"	Sch10					

Fonte: Tupi BV, 2015

Figura 10: Requisitos para acessórios de tubulações, conforme o padrão B16 do documento I-ET-3010.92-1400-200-KFB-001

FITTINGS AND ACCESSORIES (Notes 1 and 3)						
	Elbow 90°	JO-46	1/2" - 1 1/2"	3000	SW	ASTM A182 Gr F 51 (UNS S31803)
	Elbow 45°	JO-45				
	Equal Tee	TE-38				
	Red. Tee	TRE-33				
	Cross	CRUZ-32				
	Half Coupling	ML-18				
	Red. Coupling	LRE-16				
	Cap	TAM-35				
	Union	UN-23				
	Coupling	L-27				
	Short Nip.	T-36		Wall thickness according to pipe	PLAIN	ASTM A 790 (UNS S31803) seamless
	Long Nip.					
	Red. Nip.C	NIPRC-11				ASTM A815 (UNS S31803)
	Red. Nip.E	NIPRE-18				
	Red. Nip.C	NIPRC-11A	1/2" - 4"		BW/PLAIN	
	Red. Nip.E	NIPRE-18A				
	S.R.ELL 90°	CRC-22	2" - 24"		BW	
	L.R.ELL 90°	CRL-30	2" - 28"			
	L.R.ELL 45°	CRL-31				
	Tee	TE-39				
	Red. Tee	TRE-34				
	Conc. Red.	REDC-15				
	Ecc. Red.	REDE-14				
	Cap	TAM-36				
	Cross	CRUZ-33				
	Weldolet	WOL-07	4" - 28"			ASTM A182 Gr. F 51 (UNS S31803)

Fonte: Tupi BV, 2015

Figura 11: Requisitos para flanges, conforme o padrão B16 do documento I-ET-3010.92-1400-200-KFB-001

Flange (Notes 4)	FLG-120	1/2" - 1 1/2"	150	SW (RF)	ASTM A 182 Gr. F 51 (UNS S31803)
	FLG-121	1/2" - 24"		BLIND (RF)	
	FLG-122	2" - 24"		WN (RF)	
	FLG-121A	26" - 28"		BLIND (RF)	
	FLG-122A			WN (RF)	

Fonte: Tupi BV, 2015

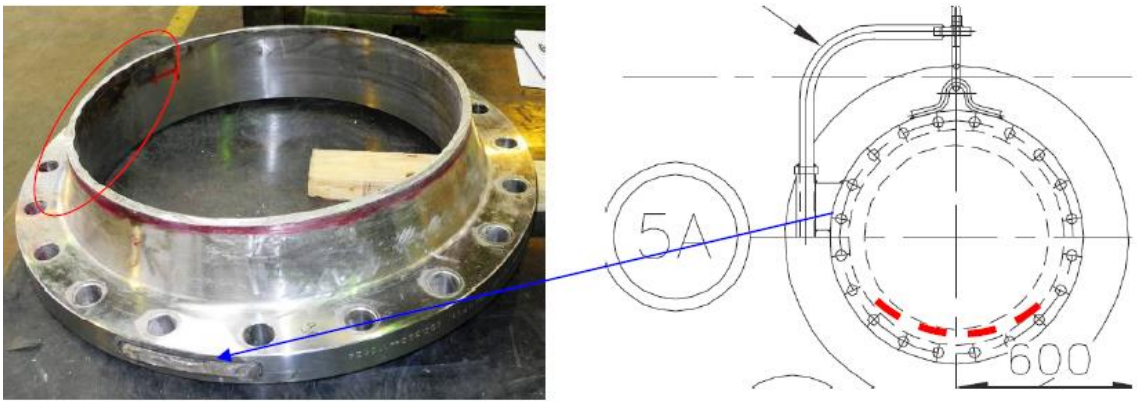
O padrão apresentado B16 mostrado na Figura 9 é apenas um exemplo de aplicação de aços da família do duplex em tubulações de processo. Atualmente, já existem aplicações mais severas, onde tubos de UNS S32760 são utilizados em classe de pressão de 2500# transportando gás pela unidade de processo.

3.2 - FALHA EM FLANGE DE AÇO INOXIDÁVEL ANTES DA ENTRADA EM OPERAÇÃO

Em meados de março de 2015, durante as obras de construção de uma plataforma, foi detectada uma trinca no flange da boca de visita do vaso separador de gás. O vaso já havia passado por todas as etapas de ensaios previstas no plano de inspeção e testes, inclusive o teste hidrostático, o equipamento encontrava-se no estaleiro e ainda não tinha entrado em operação. A análise de falha foi conduzida pela empresa LABOTEST e foi emitido o relatório N° 44940 (Bernasconi, 2015). Na sequência serão apresentados os pontos mais relevantes do relatório N° 44940, visando mostrar o que levou à falha do componente.

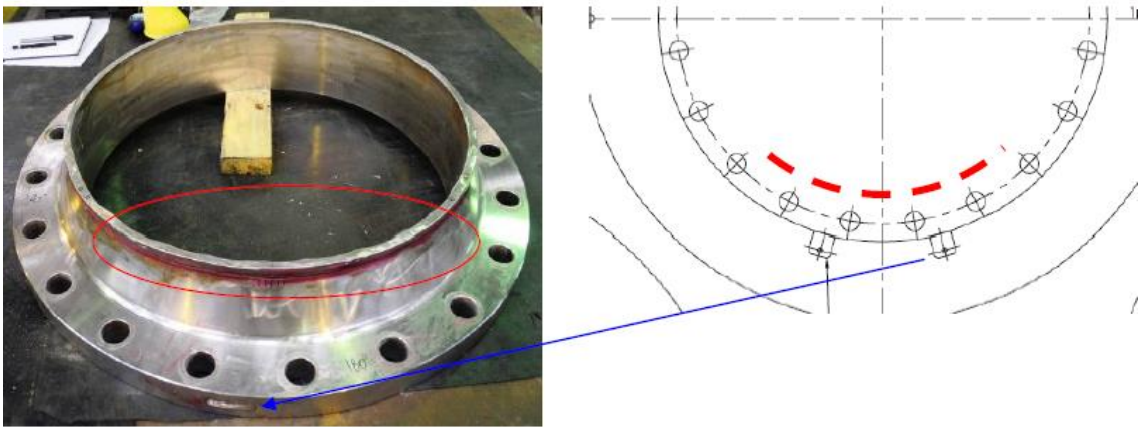
O flange da boca de visita foi extraído para análise, conforme pode ser visto na Figura 12 e Figura 13. O flange foi fabricado no material A 182 F53 – UNS 32750, o processo de fabricação utilizado foi o forjamento.

Figura 12: Região do bocal 5A do vaso separador de gás, a seta azul evidencia a região onde foi soldado o braço do turco para movimentação da tampa da boca de visita



Fonte Bernasconi, 2015

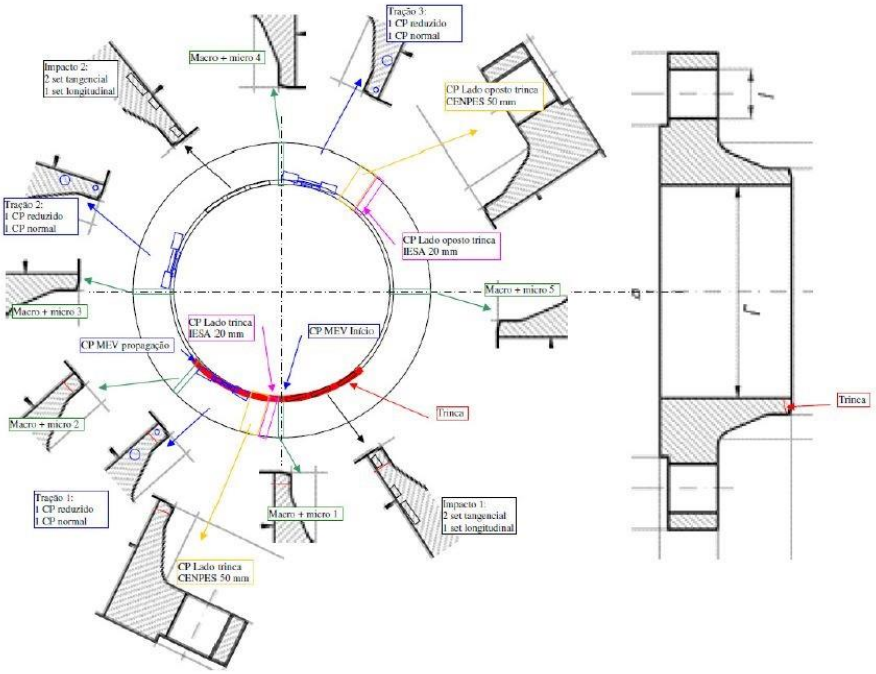
Figura 13: : Região da geratriz inferior do bocal 5A do vaso separador de gás, a elipse vermelha evidencia a região onde foi detectada a trinca



Fonte Bernasconi, 2015

Foram extraídos corpos de prova do flange do bocal 5A conforme pode ser visto na Figura 14, abaixo.

Figura 14: Mapa esquemático com as regiões onde foram removidos os corpos de prova para realização de ensaios mecânicos e metalúrgicos



Fonte Bernasconi, 2015

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - MICROGRAFIA

A análise metalográfica apresentado no relatório N° 44940 emitido pela empresa LABOTEST, avaliou as regiões do metal de base, metal de solda e a região da zona afetada termicamente (ZTA). Abaixo são apresentadas imagens da região “Macro + micro1”. Na Figura 15 é apresentada a condição microestrutural da zona termicamente afetada, na Figura 16 é possível ver a condição do metal de solda e na Figura 17 é possível ver a condição da microestrutural do metal base. A amostra da região “Macro + micro1” foi removida da região onde ocorreu a trinca, conforme pode ser visto na Figura 14

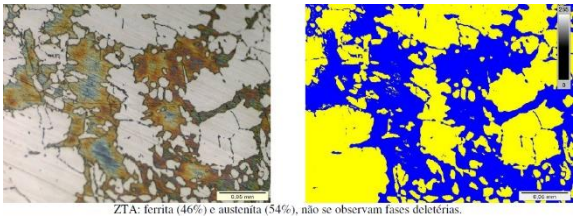
Nas imagens da região “Macro + micro2”, esta amostra compreende regiões onde ocorreu o trincamento, conforme pode ser visto na Figura 14. A microestrutura da zona afetada termicamente pode ser vista na Figura 18, nota-se uma distribuição homogênea de fases e um balanço de 50% entre ferrita e austenita. A microestrutura do metal de solda pode ser vista na Figura 19, não foram registradas fases frágeis ou um desbalanço entre as fases presentes. A microestrutura do metal de base pode ser vista na Figura 20, nota-se a presença de fases frágeis e um desbalanço entre a proporção de ferrita e austenita.

Nas imagens da região “Macro + micro3”, esta amostra compreende regiões onde não ocorreu o trincamento, conforme pode ser visto na Figura 14. A microestrutura da zona afetada pelo calor pode ser vista na Figura 21, ela encontra-se isenta de fases frágeis e com um bom equilíbrio entre ferrita e austenita. A microestrutura do metal de solda, apresenta característica bruta de fusão, compatível, não há indicação de fases frágeis, conforme pode ser visto na Figura 22. O metal base apresenta um desbalanço entre a proporção de ferrita e austenita, além de uma proporção significativa de fases frágeis, conforme pode ser visto na Figura 23

Nas imagens da região “Macro + micro4”, esta amostra compreende regiões onde não ocorreu o trincamento, conforme pode ser visto na Figura 14. Esta amostra foi removida na posição horário de 12 h, numa região imediatamente aposta ao local onde ocorreu a trinca. A zona afetada termicamente encontra-se com bom balanço entre as fases ferrita e austenita, conforme pode ser visto na Figura 24. O metal de solda encontra-se com microestrutura característica, isento de fases frágeis e com balanço adequada entre as fases ferrita e austenita, conforme pode ser visto na Figura 25. A condição do metal base, pode ser vista na Figura 26, nota-se uma elevada fração volumétrica de fase sigma e um desbalanço entre o teor de ferrita e austenita.

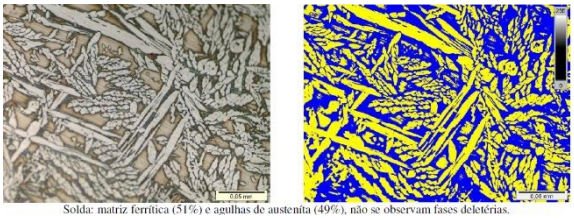
Nas imagens da região “Macro + micro5”, esta amostra compreende regiões onde não ocorreu o trincamento, conforme pode ser visto na Figura 14. A zona afetada termicamente encontra-se com bom balanço entre a fase ferrita e a austenita e isenta de fases frágeis, conforme pode ser visto na Figura 27. O metal de solda apresenta microestrutura típica de zona fundida, com balanço entre ferrita e austenita adequado e isenta de fase sigma, conforme pode ser visto na Figura 28. O metal base encontra-se com desvio no balanço entre a ferrita e a austenita e uma fração de fase sigma elevada, mas inferior ao valor apresentado pelas outras amostras, conforme pode ser visto na Figura 29.

Figura 15: Pode ser observada um balanço entre ferrita e austenita compatível com as especificações técnicas



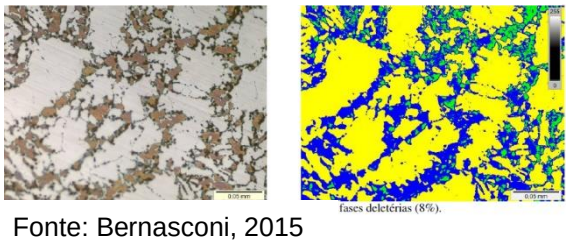
Fonte: Bernasconi, 2015

Figura 16: Nota-se uma microestrutura bruta de fusão, típica de metal de solda, isenta de fases frágeis



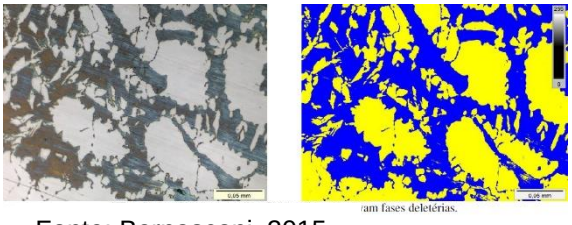
Fonte: Bernasconi, 2015

Figura 17: A fase na cor verde na figura da direita é a fase sigma. Nota-se um desequilíbrio entre na fração volumétrica da ferrita e da austenita.



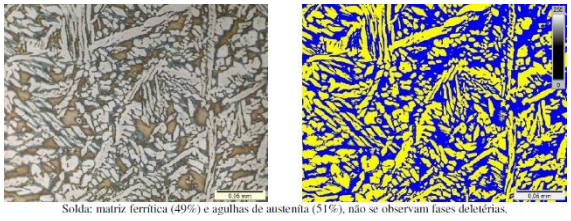
Fonte: Bernasconi, 2015

Figura 18. Pode ser observada um balanço entre ferrita e austenita compatível com as especificações técnicas



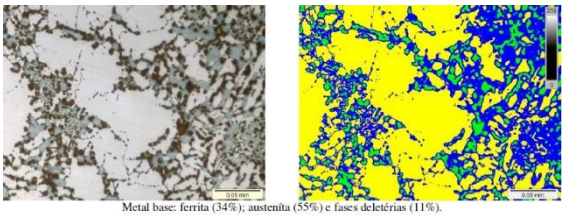
Fonte: Bernasconi, 2015

Figura 19: Nota-se uma microestrutura bruta de fusão, típica de metal de solda, isenta de fases frágeis.



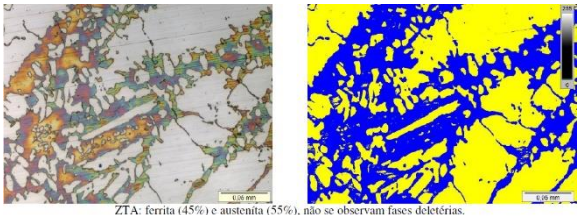
Fonte: Bernasconi, 2015

Figura 20. A fase na cor ver na figura da direita é a fase sigma. Nota-se um desequilíbrio entre na fração volumétrica da ferrita e da austenita.



Fonte: Bernasconi, 2015

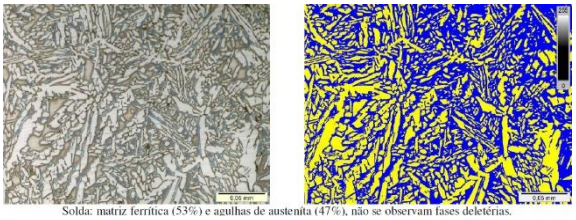
Figura 21: Pode ser observada um balanço entre ferrita e austenita compatível com as especificações técnicas



ZTA: ferrita (45%) e austenita (55%), não se observam fases deletérias.

Fonte: Bernasconi, 2015

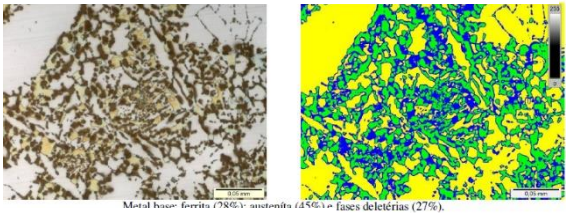
Figura 22: Nota-se uma microestrutura bruta de fusão, típica de metal de solda, isenta de fases frágeis.



Solda: matriz ferrítica (53%) e agulhas de austenita (47%), não se observam fases deletérias.

Fonte: Bernasconi, 2015

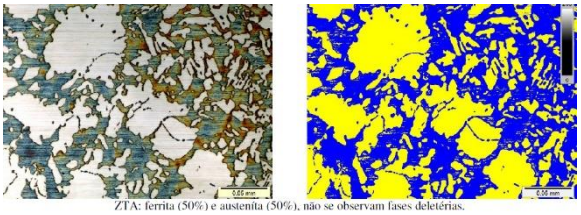
Figura 23: A fase na cor ver na figura da direita é a fase sigma. Nota-se um desequilíbrio entre na fração volumétrica da ferrita e da austenita.



Metal base: ferrita (28%); austenita (45%) e fases deletérias (27%).

Fonte: Bernasconi, 2015

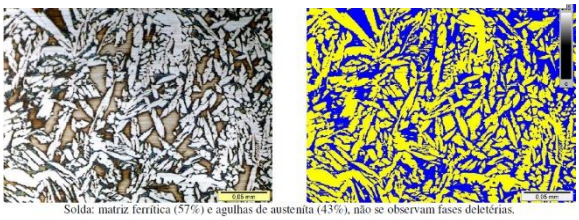
Figura 24: Pode ser observada um balanço entre ferrita e austenita compatível com as especificações técnicas.



ZTA: ferrita (50%) e austenita (50%), não se observam fases deletérias.

Fonte: Bernasconi, 2015

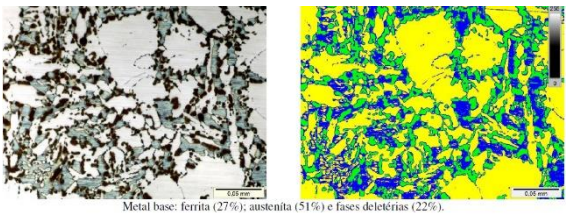
Figura 25: Nota-se uma microestrutura bruta de fusão, típica de metal de solda, isenta de fases frágeis



Solda: matriz ferrítica (57%) e agulhas de austenita (43%), não se observam fases deletérias.

Fonte: Bernasconi, 2015

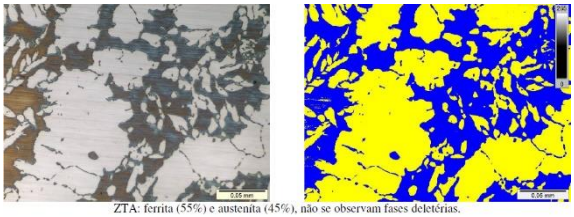
Figura 26: A fase na cor ver na figura da direita é a fase sigma. Nota-se um desequilíbrio entre na fração volumétrica da ferrita e da austenita.



Metal base: ferrita (27%); austenita (51%) e fases deletérias (22%).

Fonte: Bernasconi, 2015

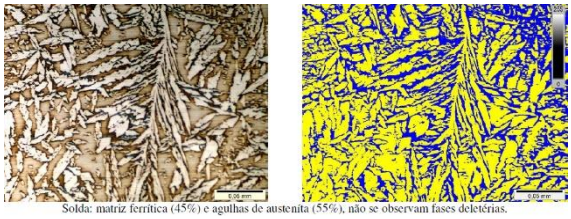
Figura 27: Pode ser observada um balanço entre ferrita e austenita compatível com as especificações técnicas.



ZTA: ferrita (55%) e austenita (45%), não se observam fases deletérias.

Fonte: Bernasconi, 2015

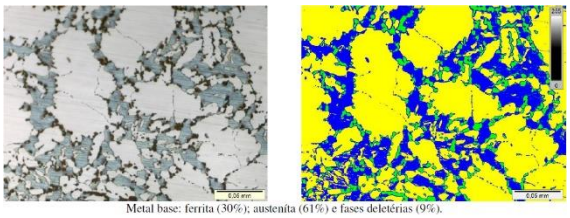
Figura 28: Nota-se uma microestrutura bruta de fusão, típica de metal de solda, isenta de fases frágeis.



Solda: matriz ferrítica (45%) e agulhas de austenita (55%), não se observam fases deletérias.

Fonte: Bernasconi, 2015

Figura 29: A fase na cor ver na figura da direita é a fase sigma. Nota-se um desequilíbrio entre na fração volumétrica da ferrita e da austenita.



Metal base: ferrita (30%); austenita (61%) e fases deletérias (9%).

Fonte: Bernasconi, 2015

Foram removidos trechos da amostra do flange 5A e confeccionados corpos de prova para realização de vários ensaios, um dos ensaios realizados, foi o ensaio de impacto. Foram confeccionados corpos de prova de seção de 10 x 5 cm e entalhe em V, o ensaio foi conduzido à temperatura de 23°C. Os valores obtidos são apresentados abaixo na Figura 30.

Figura 30: Valores obtidos no ensaio de impacto das amostras extraídas do flange 5A do vaso separador de gás, trecho do relatório Labotest N° 44940

Lado	CP	Local do entalhe e orientação	Energia absorvida J	
			Valor individual	Média
1	1.1	Solda / ZTA tangencial	9	11
	1.2		16	
	1.3		8	
	2.1	MB tangencial	2	2
	2.2		2	
	2.3		2	
	3.1	MB longitudinal	1	1
	3.2		2	
	3.3		1	
2	1.1	Solda / ZTA tangencial	6	8
	1.2		2	
	1.3		17	
	2.1	MB tangencial	1	1
	2.2		1	
	2.3		1	
	3.1	MB longitudinal	1	1
	3.2		1	
	3.3		2	

Fonte: Bernasconi, 2015

Geralmente, as falhas em componentes de aços inoxidáveis do tipo duplex e superduplex são associadas aos problemas na junta soldada, contudo durante a análise metalográfica do metal base, ficou evidente a presença de elevadas frações volumétricas de fase sigma no metal base. O ensaio de impacto que foi realizado em uma parte do flange do bocal 5A, mostrou, conforme pode ser visto na Figura 30, que os menores valores de energia absorvida ocorreram no metal base.
As considerações finais da análise de falha no flange do bocal 5A do vaso separador de gás, mostraram que os ciclos de tratamento térmico realizado no material após o forjamento, não foram adequados para solubilizar o material base e deixá-lo isento de fases frágeis. A presença de fases frágeis levou à falha do flange antes da entrada em operação, dez meses após a fabricação do vaso em questão (Bernasconi, 2015). Uma das recomendações da análise de falha, foi execução de uma abrangência nos flanges fornecidos pelo mesmo fabricante. Devido às falhas e inconsistências observadas no processo de tratamento térmico do material (Bernasconi, 2015).

4.2 - AVALIAÇÃO DE FLANGES DE AÇO INOXIDÁVEL SUPERDUPLEX COM INDICAÇÃO DE FASE SIGMA PELA TÉCNICA DE CORRENTES PARASITAS

A análise de falha realizada no flange do bocal 5A do vaso separador de gás indicou a necessidade de abrangência, foram identificados 390 (trezentos e noventa) componentes entre flanges e flanges cegos que haviam sido fabricados pela mesma empresa que confeccionou o flange do bocal 5A do equipamento que apresentou falha devido à presença de fases deletérias.
Devido ao grande volume de componentes que necessitavam ser avaliados, foi traçado uma estratégia para avaliação dos componentes com suspeita de desvio de qualidade no fornecimento. A técnica selecionada para inspeção dos flanges foram as

correntes parasitas, também conhecidas por seu termo em inglês Eddy Current (EC). O critério de aceitação adotado foi descrito na Tabela 1, abaixo:

Tabela 1 Critério para aceitação do teor de fases secundárias (sigma) em flanges de superduplex (PETROBRAS, 2016)

Critério	Percentual de Fase Sigma (detectado por correntes parasitas)	Ação
A	Maior ou Igual a 4%	Substituir o componente
B	Menor que 4% e maior ou igual a 2%	Avaliar cada caso
C	Menor que 2%	Aprovado

Fonte: Petrobras, 2016

Dentro do critério A foram enquadrados 107 componentes, sendo 90 flanges e 17 flanges cegos, estes componentes foram removidos dos respectivos locais onde estavam instalados, tratados termicamente, inspecionados por correntes parasitas e reinstalados. Vale ressaltar que a reinstalação destes componentes quando se tratava de flanges, implicou na execução do plano de inspeção e testes associado à junta soldada do vaso de pressão associado.

Dentro do critério B foram enquadrados 91 componentes, sendo 89 flanges e 2 flanges cegos.

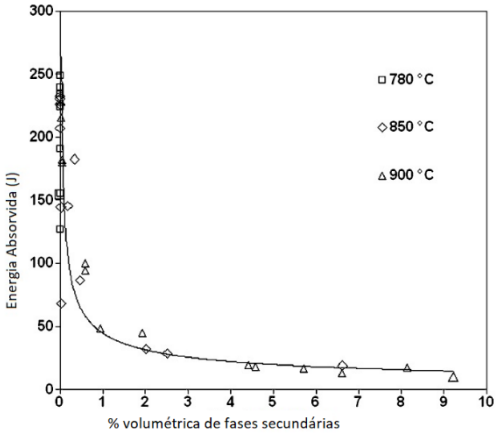
Dentro do critério C foram aprovados 192 flanges, cujo teor de fase sigma detectado pela técnica de correntes parasitas foi menor que 2%.

Para tratar o caso dos flanges que estavam com concentração de fase sigma entre 2 e 4%, foi realizada uma análise de mecânica da fratura utilizando a metodologia da norma API 579, visando avaliar se a fração volumétrica de 4% de fase sigma nos componentes, poderia levar os flanges à fratura frágil. A análise realizada não será reproduzida aqui, contudo os resultados mostraram que não havia o risco de fratura frágil e então os flanges com até 4% de fase sigma também foram considerados aptos a operar (PETROBRAS, 2016).

4.2 - EFEITOS DA PRESENÇA DE FASES FRÁGEIS NAS PROPRIEDADES DOS AID E AISD

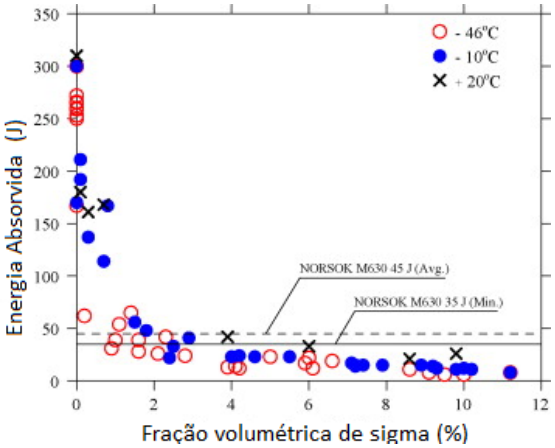
Calliari et al. (2006) examinaram a influência de fases secundárias, incluindo a fase sigma, na energia absorvida em ensaios de impacto de aço inoxidável duplex SAF 2205. Frações de apenas 0,5% de fase sigma reduziram a energia em 100 J, enquanto frações entre 1,5% e 2% causaram quedas ainda mais significativas. A Figura 31 apresenta os efeitos de tratamentos isotérmicos de 10 a 40 minutos em temperaturas de 850°C, 900°C e, no caso de 780°C, em intervalos de 25 a 40 minutos. Borvik et al. (2010) analisaram componentes de tubulações de aço inoxidável superduplex SAF 2205, comparando amostras sem fase sigma e outras com frações de 1% a 10%. A Figura 32 ilustra a variação na energia absorvida conforme o aumento da fração de fase sigma, evidenciando o impacto negativo nas propriedades mecânicas.

Figura 31: Efeito da fração volumétrica de fases secundárias na energia absorvida no impacto para o aço inoxidável duplex SAF 2205



Fonte: Calliari, 2006).

Figura 32: Efeito da fração volumétrica de fase sigma em componentes de tubulação de aço inoxidável superduplex 2205.



Fonte: Borvik, 2010

4.3 - TÉCNICAS PARA DETECÇÃO DE FASES FRÁGEIS EM AÇOS INOXIDÁVEIS

O uso de técnicas de ensaio não destrutivos para detecção e quantificação de fases frágeis em aços inoxidáveis duplex e super duplex aparece na literatura científica visando avaliar a variação de propriedades magnéticas e ultrassom em função da fração volumétrica de fases frágeis, entre elas a fase sigma (Biezma, et al., 2021).

No estudo conduzido pelo CENPES para avaliação de fases frágeis em flanges de super duplex, a técnica de corrente parasitas foi a técnica selecionada para quantificação do teor de fase sigma nos componentes de tubulação que pertenciam ao mesmo fabricante que forneceu o bocal 5A que falhou no vaso separador de gás. A técnica de correntes parasitas permitiu avaliar de forma rápida diversos componentes. A técnica de correntes parasitas, já havia sido utilizada em outras trabalhos para determinação de fases frágeis em aços inoxidáveis bifásicos (Camerini, et al.).

4.4 - REQUISITOS DA NORMA ASTM A182

A norma para fabricação de componentes de tubulação, ASTM A182 estabelece os critérios de temperatura para tratamento térmico de componentes de tubulação, conforme pode ser visto na Figura 33. As taxas de aquecimento e resfriamento e o intervalo a ser mantido na temperatura de solubilização será definido pelo fabricante, o resultado do tratamento térmico deve permitir que o componente atenda aos requisitos da tabela-3 da norma ASTM A182 (ASTM INTERNATIONAL, 2021). Durante a fase de fabricação, o controle de qualidade do lote de componentes é realizado através do ensaio de dureza.

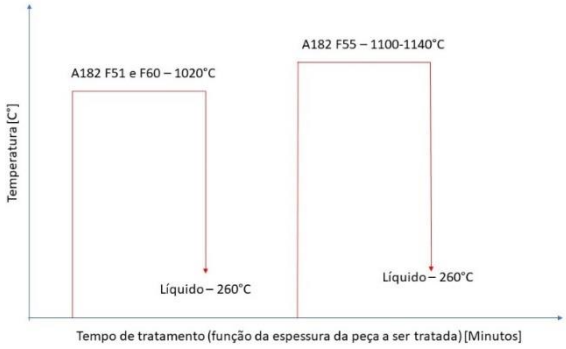
Calliari (Calliari, et al., 2006) relatou que os valores de dureza de aços bifásicos, permanecem praticamente constantes com frações volumétricas de até 8% de fase sigma. A variação da dureza Brinnel em função da fração volumétrica da fase sigma, também foi mostrada por Normando (Normando, et al., 2010), neste trabalho foram conduzidos tratamentos isotérmicos e a quantidade de fase sigma foi quantificada, conforme pode ser visto na Figura 34, em seguida foi realizada a medição de dureza em função do tempo de tratamento isotérmico, conforme pode

ser visto na Figura 35. Mesmo após tratamentos isotérmicos que produziram quantidade de fase sigma suficiente para fragilizar o material, os valores de dureza Brinnel ainda permanecem dentro do especificado pela norma ASTM A182 (ASTM INTERNATIONAL, 2021).

Dentro do escopo da norma ASTM A182 existem também os requisitos suplementares, estes devem ser acordados entre o fabricante do componente e o seu comprador. O requisito suplementar S12 permite a quantificação de fases frágeis, a norma de referência é a ASTM A923.

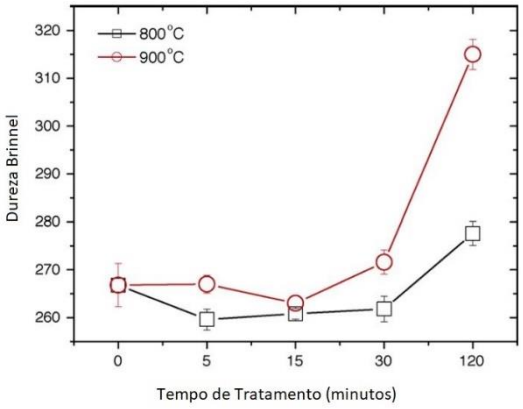
Figura 33: Requisitos para tratamento térmico para aço inoxidável bifásico.

Figura 33: Requisitos para tratamento térmico para aço inoxidável bifásico.



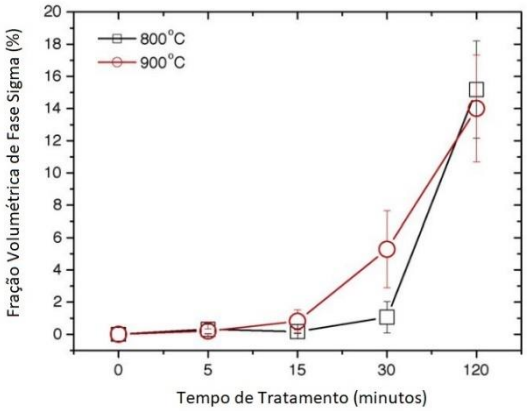
Fonte: ASTM Internacional, 2021

Figura 34: Fração volumétrica de fase sigma em função do tempo de tratamento térmico, para um aço UNS S31803



Fonte: Normando, 2010

Figura 35: Efeito do tempo de tratamento térmico na dureza de um aço UNS S31803



Fonte: Normando, 2010

4.5 - APLICAÇÕES DE FLANGES DE DUPLEX E SUPER DUPLEX EM SISTEMAS DE TUBULAÇÕES

Apesar do caso de falha apresentado estar relacionado ao flange do bocal de um vaso de pressão, hoje nas plataformas, a maior quantidade de flanges de aço inoxidável duplex e super duplex encontra-se instalada nos sistemas de tubulações. O controle de qualidade de componentes de aço inoxidável duplex e super duplex é realizado de acordo com a norma PETROBRAS N-115, que estabelece a realização de ensaio para medição do teor de ferrita em todos os componentes de tubulação na etapa de recebimento do material (PETROBRAS, 2019). A medição de ferrita nos componentes, antes da soldagem permitiria a identificação dos componentes com desbalanço na fração volumétrica entre a ferrita e a austenita, a norma PETROBRAS N-133 estabelece que o metal base de aço inoxidável duplex ou super duplex deve apresentar cerca de 50% de austenita e 50% de ferrita, para o metal de solda é aceita uma variação e o teor de ferrita pode ficar entre 35 e 65% na zona fundida (PETROBRAS, 2017). A análise metalográfica das regiões indicadas na Figura 14, mostrou que a região indicada na Figura 26 foi detectado apenas 27% de ferrita, este valor poderia ter sido utilizado como um indicativo de problemas no metal base no caso da falha ocorrida no flange do bocal 5A do vaso separador de gás.

5 CONCLUSÃO

A falha apresentada no bocal 5A do vaso separador de gás foi analisada e a mesma ocorreu devido a erros no processo de tratamento térmico do flange do bocal. Foi realizada abrangência em 390 (trezentos e noventa) componentes fornecidos pelo mesmo fabricante e os casos identificados com problemas, conforme critério de aceitação, foram tratados, sendo os componentes considerados aptos a operar (PETROBRAS, 2016).

A análise dos relatórios emitidos pela empresa LABOTEST (Bernasconi, 2015) e pelo CENPES (PETROBRAS, 2016) permitem chegar as conclusões abaixo:

1. Para garantia dos requisitos de qualidade e ausência de fases frágeis, devem ser seguidos os requisitos complementares da norma ASTM A182, principalmente o item suplementar S12.
2. O atendimento aos requisitos de dureza da norma ASTM A182 não são suficientes para garantir a ausência de frações volumétricas de fases frágeis deletérias às propriedades mecânicas. Pois frações volumétricas acima de 4% são suficientes para comprometer as propriedades mecânicas, sem necessariamente afetar a dureza especificada pela norma ASMT A182.
3. O estudo conduzido pelo CENPES mostrou que a utilização da técnica de correntes parasitas pode ser aplicada de forma rápida para avaliação, quanto à presença de fases frágeis, em flanges e outros componentes de tubulação. A execução deste ensaio pode ser adicionada como requisito contratual para a aquisição de componentes de tubulação em aço inoxidável duplex e super duplex. Principalmente para componentes com classe de pressão igual ou maior que 600#, cuja pressão de operação geralmente é mais elevada, a criticidade torna-se maior e as consequências de uma eventual falha são mais severas.

REFERÊNCIAS

American Petroleum Institute - API API RECOMMENDED PRACTICE 571 - Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry [Journal]. - 2011.

ASME - AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS V - Nondestructive Examination [Journal]. - 2010.

ASTM INTERNATIONAL A182/A182 - Standard Specification for Forged or Rolled Alloy and Stainless Steel Pipe Flanges, Forged Fittings, and Valves and Parts for High-Temperature Service [Report]. - 2021. - p. 17.

ASTM INTERNATIONAL A790/A790M - Standart Specification for Seamless and Welded Ferritic/Austenitic Stainless Steel Pipe [Report]. - 2020. - p. 10.

Bernasconi Eduardo Rafael Relatório N° 44940 [Report] / LABOTEST CONSULTORIA E TECNOLOGIA EIRELI. - São Paulo : [s.n.], 2015. - p. 33.

Biezma M.V. [et al.] Non-destructive techniques for the detection of sigma phase in duplex stainless steel: A comprehensive review [Article] // Engineering Failure Analysis 122. - 2021.

Borvik T [et al.] Pipe fittings in duplex stainless steel with deviation in quality caused by [Journal] // Materials Science and Engineering A. - 2010. - pp. 6945-6955.

Calliari I., Zanesco M. and Ramous E. Influence of isothermal aging on secondary phases precipitation and toughness of a duplex stainless steel SAF 2205 [Article] // J. Mater Sci. - 2006. - pp. 7643-7649.

Camerini C. [et al.] Eddy Current techniques for super duplex stainless steel characterization [Journal] // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. - 2015. - pp. 96-100.

Camerini C.G. [et al.] SLOFEC (SATURATED LOW FREQUENCY EDDY CURRENT) PARA CARACTERIZAÇÃO DE FASES NO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX [Journal] // COTEQ - 13a.

Cattani M. and Vannuci A. Correntes de Foucault: Apectos Báscios (Eddy currents: Basic aspects) [Journal] // Revista Brasileira de Ensino de Física. - 2014. - Vol. 36.

Magnabosco R. Kinetics of Sigma Phase Formation In a Duplex Stainless Steel [Journal] // Materials Research. - 2009. - Vol. 12. - pp. 321-327.

Normando Paulo G. [et al.] Ultrasound, eddy current and magnetic Barlhausen noise as tools for sigma phase detection on a UNS S31803 duplex stainless steel [Article] // Materials Science and Engineering A 527. - 2010. - pp. 2886-2891.

NORSOK M-603 - Material data sheets and element data sheets for piping [Report]. - 2010. - p. 133.

NORSOK STANDARD M-001 - Materials selection [Report]. - 2002. - p. 34.

Padilha A. F., Aguiar D. J. M. and Plaut R. L. Duplex Stainless Stees: A Dozen of Significant Phase Transformations [Journal] // Defect and Diffusion Forum. - 2012. - Vol. 322. - pp. 163-174.

PETROBRAS CT TMEC N° 010/ 2016 - AVALIAÇÃO DE FLANGES DE AÇO INOXIDÁVEL SUPERDUPLEX COM INDICAÇÃO DE FASE SIGMA PELA TÉCNICA DE CORRENTES PARASITAS [Report] / CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO LEOPOLDO A. MIGUEZ DE MELLO - PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - Tecnologia de Materiais, Equipamentos e Corrosão. - 2016. - p. 33.

PETROBRAS N-115 - Fabricação e Montagem de Tubulações Metálicas [Report]. - 2019. - p. 140.

PETROBRAS N-133 - Soldagem [Report]. - 2017.

Silva André Luiz V. da Costa e and Mei Paulo Roberto Aços e Ligas Especiais [Book]. - São Paulo : Blucher, 2010. - 3a.

TUPI BV I-ET-3010.92-1400-200-KFB-001 [Report]. - 2015.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à PETROBRAS pela oportunidade e autorização para publicação dos dados, ao consultor da Petrobras Engenheiro Carlos Eduardo Aguiar Lima Rodrigues e aos docentes da ESCOLA SENAI “Nadir Dias de Figueiredo”.

SOBRE O(S)AUTOR(ES)

Sobre os autores:

_____

[i] Diego da Rocha Ramos

Possui graduação em Engenharia de Materiais pela Escola de Engenharia de Lorena - USP (2007), Pós-Graduado em Engenharia de Soldagem pela Faculdade de Tecnologia SENAI Nadir Dias de Figueiredo (2021). Tem experiência na área de Inspeção de Equipamentos Estáticos. É engenheiro de equipamentos na empresa PETROBRAS.

[ii] Fernando Antonio Corrêa, M.Sc.

Doutorando em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de São Carlos (PPGCEM), Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais e Engenheiro Mecânico. Pós-Graduado em Engenharia de Soldagem pela European Welding Federation/EWF, DVS-SLV Mannheim. Atualmente está como professor da Escola e Faculdade SENAI Nadir Dias de Figueiredo, lecionando disciplinas técnicas nos Cursos de Tecnologia em Processos Metalúrgicos e Pós-Graduação em Engenharia de Soldagem e Fundição.

[iii] Odilon de Moraes Junior

Possui graduação em Engenharia Metalúrgica pela Escola de Engenharia Mauá (1976) e Mestrado em Tecnologia Nuclear de Materiais pelo Instituto de Pesquisas Nucleares – IPEN – SP (2018). É Pós-Graduado com MBA em Gestão Empresarial pela FGV (2001). Atualmente é professor da Escola e Faculdade SENAI Nadir Dias de Figueiredo lecionando disciplinas nos Cursos Técnicos de Metalurgia, Tecnologia em Processos Metalúrgicos e Pós-Graduação em Engenharia de Fundição.

[iv] Mateus Botani de Souza Dias

Doutor, mestre e engenheiro em Engenharia de Materiais pela Universidade de São Paulo. Atualmente, estou como docente do Curso Superior de Tecnologia de Processos Metalúrgicos na Faculdade Senai de Tecnologia (Nadir Dias de Figueiredo). Meus temas de pesquisa são os materiais magnéticos aplicados nas tecnologias de transição energética, como aços elétricos e ímãs de NdFeB. https://orcid.org/0000-0001-6231-8880