



## ANÁLISE DE FALHA DO ELO DA SAPATA 4PA5

Omar Maluf<sup>2</sup>

Jéferson Aparecido Moreto<sup>3</sup>

Rosamel Melita Muñoz Riofano<sup>4</sup>

Jael Moutinho<sup>5</sup>

Jair Valfré<sup>6</sup>

Marcelo Tadeu Milan<sup>7</sup>

### Resumo

Este trabalho teve por objetivo investigar as possíveis causas de falha do elo da sapata 4PA5. O trabalho seguiu a metodologia usual empregada em análise de falhas, consistindo de análises visuais do componente, macrodureza Rockwell B, microscopia óptica, ensaios de impacto Charpy e de tração. A trinca nucleou a partir da ZTA da solda, propagando-se de maneira catastrófica em direção ao centro do elo durante a operação do equipamento. Dentre os fatores que atuaram sinergicamente para a falha, destacam-se: teor elevado de carbono que aumentou a temperabilidade da liga propiciando a formação de martensita de alta dureza na ZTA. Esta por sua vez, favoreceu o fenômeno de fragilização por hidrogênio e uma redução da tenacidade à fratura do material facilitando a propagação catastrófica. O excesso de alumínio residual favoreceu a precipitação de nitretos de alumínio e, conseqüentemente, aumento de fragilização do material base.

**Palavras chaves:** Sapata; ZTA; Nucleação; Propagação.

### FAILURE ANALYSIS IN THE 4 PA5 BEDPLATE

#### Abstract

This work aimed to investigate the possible causes of failure occurred in a 4PA5 bedplate. The work followed the usual methodology employed in failure analysis, including visual analysis of the component, Rockwell B macrohardness, optical microscopy, Charpy impact and tensile tests. Cracks initiated from the Heat Affected Zone (HAZ) and catastrophically propagated towards the center of the part during operation of the equipment. Among the factors that acted synergistically to cause the failure, emphasis is placed on the high carbon content which increased the hardenability of the alloy providing the martensite formation in the HAZ, favoring the phenomenon of hydrogen embrittlement and a reduction of the fracture toughness of the material. Excessive aluminum content favored the precipitation of aluminum nitride and, consequently, increase in the fragility of the base material.

**Key words:** Bedplate; HAZ; Nucleation; Propagation.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> PhD em Ciência e Engenharia de Materiais, Diretor Comercial MIB - Materials Institute of Brazil. Rua Paulino Botelho de Abreu Sampaio, 881, Jd. Bethânia, 13561-060, São Carlos-SP. omar@mib.eng.br

<sup>3</sup> Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, Depto. Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (SMM-EESC-USP). Avenida Trabalhador São-Carlense, 400, Pq. Arnold Schimidt, 13566-590, São Carlos-SP. Jmoreto@sc.usp.br

<sup>4</sup> PhD em Ciência e Engenharia de Materiais, Depto. Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (SMM-EESC-USP). Avenida Trabalhador São-Carlense, 400, Pq. Arnold Schimidt, 13566-590, São Carlos-SP. romemuri@sc.usp.br

<sup>5</sup> Técnico de Processo do Departamento de Gestão Estratégica de Insumos da CVRD, DIPE - Engenharia de Materiais, Prédio Oficina Elétrica, Térreo, Av. Dante Michelini, 5500, Ponta de Tubarão, 29090-900, Vitória-ES. jael.moutinho@vale.com

<sup>6</sup> Engenheiro Mecânico do Departamento de Gestão Estratégica da Vale. DIPE/GEEIP/GAMAPA. Engenharia de Materiais, Prédio Oficina Elétrica, Térreo, Av. Dante Michelini, 5500, Ponta de Tubarão, 29090-900, Vitória-ES. jair.valfre@vale.com

<sup>7</sup> PhD em Ciência e Engenharia de Materiais, Diretor Superintendente MIB - Materials Institute of Brazil. Rua Paulino Botelho de Abreu Sampaio, 881, Jd. Bethânia, 13561-060, São Carlos-SP. milan@mib.eng.br

## 1 INTRODUÇÃO

Este artigo trata da Análise de Falhas do elo da sapata 4PA5. A metodologia de Análise do Tipo e Efeito de Falha, conhecida como FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), é uma metodologia que objetiva avaliar e minimizar riscos por meio da análise das possíveis falhas (determinação da causa, efeito e risco de cada tipo de falha) e implantação de ações para aumentar a confiabilidade.

O principal objetivo da análise de falhas é evitar novas falhas. A investigação deve determinar as causas básicas da falha e essa informação deve ser utilizada para permitir a introdução de ações corretivas e/ou preventivas que impeçam a recorrência do problema.

Esta dimensão da qualidade, a confiabilidade, tem se tornado cada vez mais importante para os consumidores, pois, a falha de um produto, mesmo que prontamente reparada pelo serviço de assistência técnica e totalmente coberta por termos de garantia, causa, no mínimo, uma insatisfação ao consumidor ao privá-lo do uso do produto por determinado tempo. Além disso, cada vez mais são lançados produtos em que determinados tipos de falhas podem ter conseqüências drásticas para o consumidor.

A função do componente ou do equipamento deve ser considerada na análise, uma vez que conceituamos falha como a ocasião em que o componente ou equipamento não é mais capaz de executar a sua função com segurança. Analisar uma falha é interpretar as características de um sistema ou componente deteriorado para determinar porque ele não mais executa sua função com segurança.

O material dos elos consiste de aço GS 25 Mn Cr 44, com limite de resistência de 65-75 kg/mm<sup>2</sup>, limite de escoamento mínimo de 40 kg/mm<sup>2</sup> e alongamento mínimo de 15%. O material foi fundido e recozido para alívio de tensões. Não foram fornecidas informações sobre os parâmetros utilizados na execução da soldagem, nem de tratamentos térmicos eventualmente efetuados após a mesma.

## 2 EXPERIMENTAL

Foi realizada uma inspeção visual do componente (limpeza, registro fotográfico e identificação dos aspectos de falha). A análise química foi realizada em um espectrômetro de emissão óptica por centelhamento. As análises microestruturais foram realizadas via Microscopia Ótica (MO). As amostras foram preparadas utilizando-se a técnica convencional (lixamento + polimento). O ataque químico utilizado foi nital 2%. Foram efetuados ensaios de dureza na escala Rockwell C, utilizando uma carga de 150 Kgf e penetrador cônico de diamante. Os perfis de microdureza foram determinados utilizando uma carga de 200 gf, penetrador piramidal de diamante.

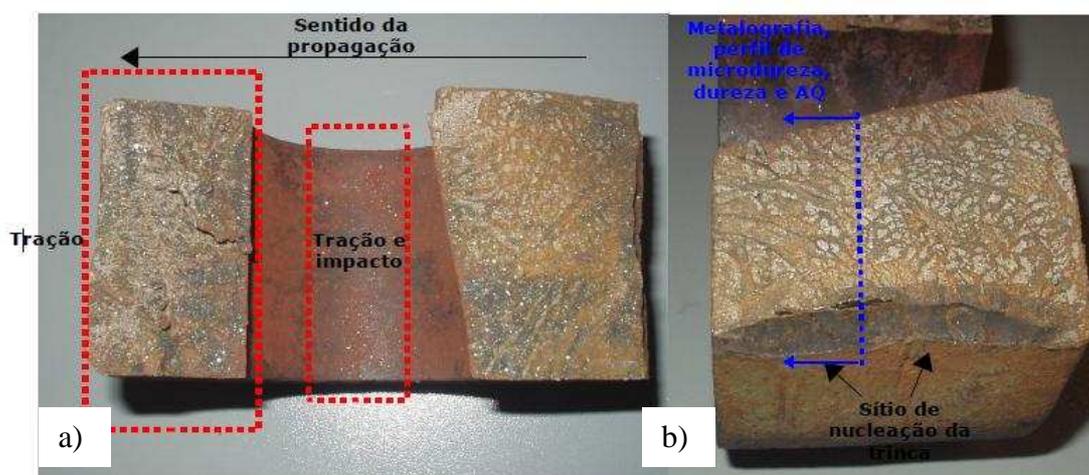
Ensaio de impacto Charpy tipo A foram realizados de acordo com a norma ASTM E-23<sup>(1)</sup> em uma máquina Time JB 300, martelo de 150 J à temperatura ambiente.

Ensaio de tração foram realizados em ar e à temperatura ambiente em uma máquina Instron 2382 (100 kN capacidade), com uma velocidade de 0,5 mm/min (até  $\sigma_{0,2}$ ) e 2 mm/min (até a fratura) de acordo com a norma ASTM A370.<sup>(2)</sup> As fractografias foram reveladas via microscopia eletrônica de varredura. Espectroscopia de energia dispersiva de raios - X (EDX) foi utilizada para determinação de elementos na superfície de fratura.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Análise Macrográfica

A análise macrográfica mostra que a fratura iniciou-se junto à região termicamente afetada pela solda (ZTA), uma vez que o cordão de solda foi completamente destacado do material base (Figura 1). Em seguida, a trinca avançou em direção ao centro do elo, resultando em uma superfície de fratura totalmente plana, com aspecto frágil, diversas facetas brilhantes sem indícios de deformação plástica. O cordão de solda está presente em uma região da peça que aparentemente, de acordo com o desenho, não deveria ser soldada.



**Figura 1.** (a) Detalhe do esquema de seccionamento para retirada de sub-amostras; (b) visão geral da região de nucleação da trinca, mostrando que o cordão de solda foi destacado.

#### 3.2 Análise Química

De acordo com os resultados de análise química, pode-se afirmar que o material apresenta teor de carbono acima do valor máximo permitido, o que afeta a soldabilidade do material (Tabela 1). Os demais elementos encontram-se dentro dos valores especificados. Porém, destaca-se o alto valor de Al residual que pode favorecer a fragilização do aço fundido pela precipitação de nitretos de alumínio durante o resfriamento lento da peça.

**Tabela 1.** Análise química (% em peso)

Amostra	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Nb	Al	Cu	Sn	As	Fé
09-0339	0,42	0,61	1,38	0,023	0,024	1,05	0,15	0,04	0,010	0,006	0,027	0,090	0,088	0,083	0,004	Bal
Especificado	0,30 Máx	0,70 Máx	1,70 Máx	0,035 Máx	0,035 Máx	0,50- 1,20	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	Bal

#### 3.3 Análise Micrográfica Óptica

A análise micrográfica óptica da ZTA, perto da fratura (Figura 2), mostra uma microestrutura martensítica. A transição ZTA-Metal base é bastante brusca e bem definida, facilitando o destacamento do cordão de solda. O metal base apresenta

uma microestrutura de perlita e ferrita. A fração volumétrica de perlita é maior do que a de um aço médio carbono comum devido ao alto teor de manganês da liga e da presença de cromo. Ambos têm o efeito de diminuir o teor de carbono no ponto eutetóide, resultando em uma perlita de mais baixo teor de carbono e espaçamento interlamelar menor do que os aços-carbono comuns não ligados.

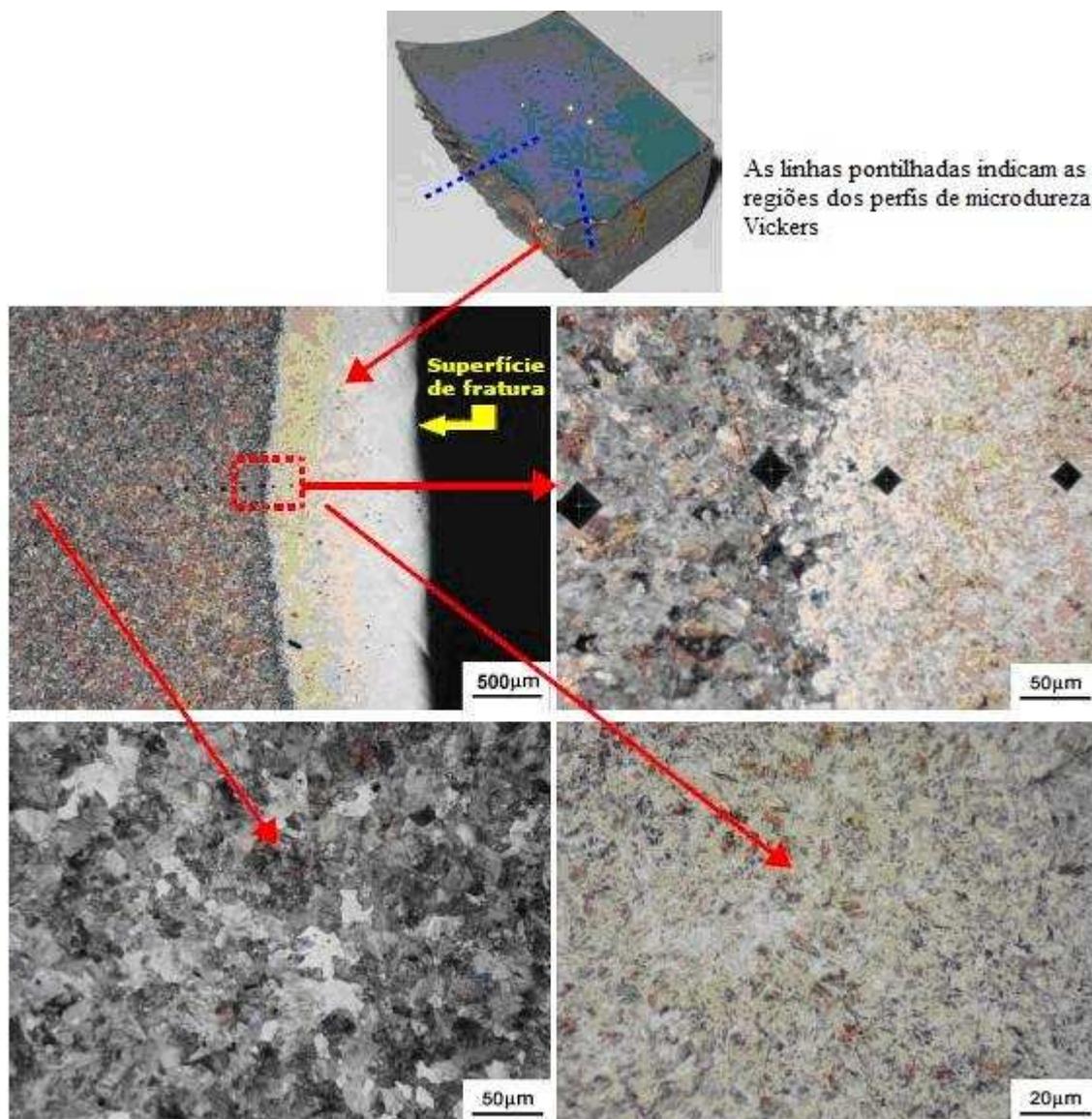


Figura 2. Micrografias ópticas da região ZTA-Metal base, próxima à superfície de fratura.

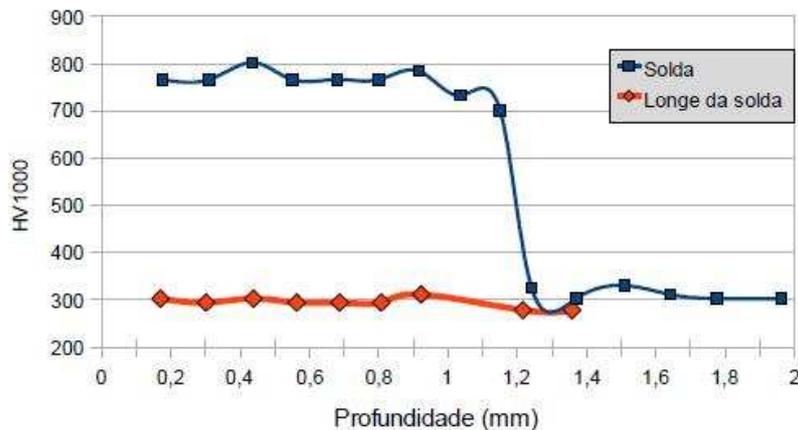
### 3.4 Dureza e Perfil de Microdureza

A dureza média do núcleo do elo foi de 25,6 HRC, compatível com a microestrutura perlítica / ferrítica e com a composição química do material base e considerando-se um resfriamento lento. Perfis de microdureza a partir da superfície de fratura em direção ao núcleo da peça são apresentados na Figura 3. Observa-se que quando a medida é feita longe da solda, a dureza se mantém constante, em torno de 300 HV. Porém, quando o perfil é traçado a partir da ZTA da solda, observa-se inicialmente um alto valor de dureza (acima de 700 HV) correspondente à martensita presente na ZTA. Assim que se atravessa a interface ZTA-Metal base, a dureza cai bruscamente para o nível de 300 HV. A alta dureza da martensita na ZTA sugere que o material

não recebeu pré-aquecimento adequado e/ou tratamento térmico posterior à solda, levando-se em conta o teor mais elevado de carbono. Assim sendo, é grande a possibilidade de que o material nesta região possa estar susceptível ao fenômeno de fragilização por hidrogênio, resultando em uma região localmente fragilizada e propícia à nucleação de trincas. A Tabela 2 apresenta os resultados de microdureza.

**Tabela 2.** Resultados de microdureza

Região	Medidas (HRC)					Média (HRC)
	25	26	26	25	26	
<b>Núcleo</b>	25	26	26	25	26	25,6



**Figura 3.** Perfis de microdureza medidos a partir da superfície de fratura, em duas regiões distintas: a partir da solda e em outra região distante da solda.

### 3.5 Ensaios de Impacto

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de impacto. O material apresenta energia de impacto muito baixa. A fratura é totalmente plana, com facetas brilhantes e aspecto frágil, sem bordas de cisalhamento (Figura 4).



**Figura 4.** Aspecto fractográfico do corpo de prova de impacto 09-0339-002.

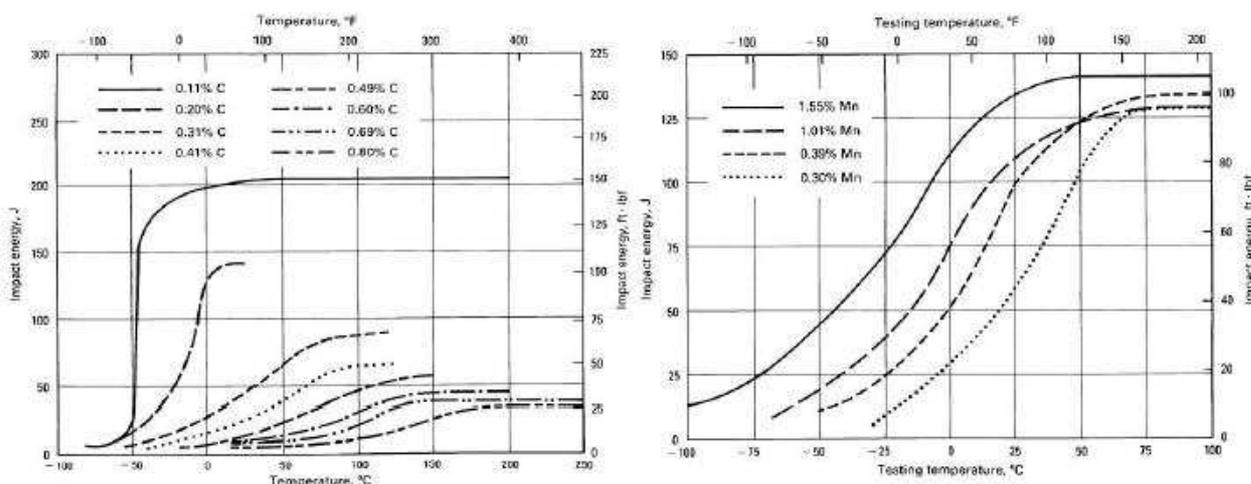
**Tabela 3.** Resultados dos ensaios de impacto

Amostra	Posição	E (J)	Média (J)
<b>09-0339-001</b>	Longe da fratura	2	2
<b>09-0339-002</b>		2	
<b>09-0339-003</b>		2	

Um aumento do teor de carbono resulta em uma diminuição dos valores de tenacidade à fratura e ao impacto, conforme a Figura 5a ilustra para aços carbono comuns normalizados. Entretanto, os resultados do material em análise são comparativamente baixos para um aço de 0,4% de C, que deveria apresentar uma energia de impacto em torno de 20 J – 25 J.

Assumindo que a adição de manganês aumenta a energia de impacto dos aços-carbono, conforme mostra a Figura 5b, fica mais evidente a perda de tenacidade do material. Por outro lado, deve-se ressaltar que a presença de cerca de 1% de Cr pode contribuir para uma redução das propriedades de impacto na condição normalizada, mas não ao nível observado.

O teor excessivo de alumínio e a presença de facetas brilhantes na superfície de fratura sugerem que um processo de fragilização pela formação de nitretos de alumínio atua sinergisticamente, reduzindo a tenacidade ao impacto do material.



**Figura 5 -** Curvas de energia de impacto em função da temperatura: (a) efeito do teor de carbono para aços-carbono comuns normalizados; (b) efeito da adição de manganês, para aços com 0,3% C, austenitizados a 900°C, resfriados a 14°C/min, microestrutura perlítica.

### 3.6 Ensaios de Tração

A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios de tração. O valor de alongamento total está muito abaixo do mínimo especificado, sugerindo a fragilização excessiva do material, em concordância com os resultados de impacto já apresentados.

**Tabela 4.** Resultados dos ensaios de tração

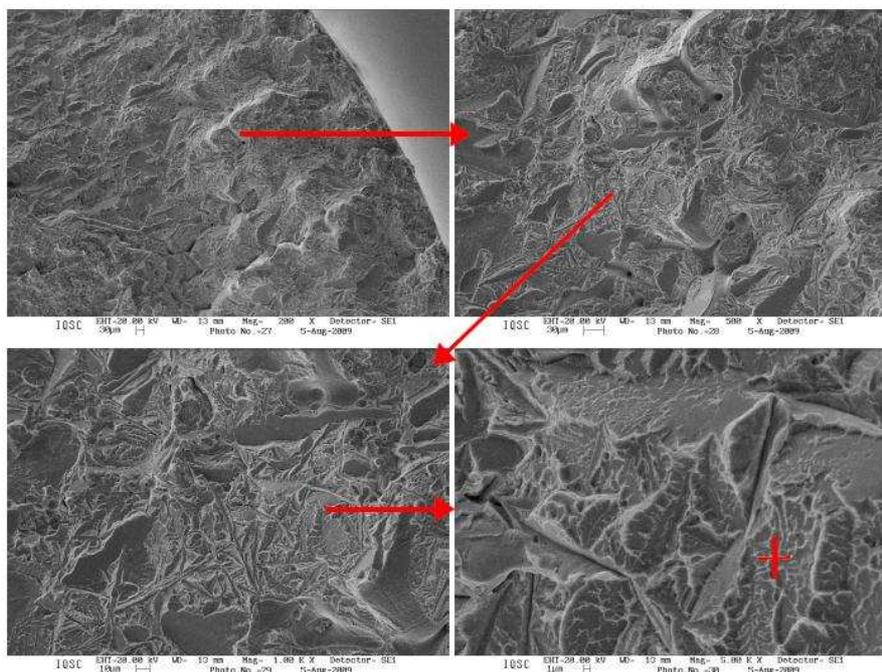
Corpo de prova	Posição	$S_e$ (MPa)	$S_r$ (MPa)	A (%)	RA (%)
09-0339-004	Perto da fratura	596,0	836,3	2,0	1,6
09-0339-005		422,7	761,6	1,6	1,0
09-0339-006	Longe da fratura	451,4	518,8	0,0	0,0
09-0339-007		485,4	752,7	2,9	2,9
09-0339-008		461,7	750,8	1,9	1,9
<b>Média</b>		<b>483,4</b>	<b>724</b>	<b>1,7</b>	<b>1,5</b>
<b>Especificado</b>		<b>392 min</b>	<b>637-735</b>	<b>15 min</b>	<b>-</b>

$S_e$  = limite de escoamento 0,2% offset;  $S_r$  = limite de resistência à tração; A = alongamento em 4D; RA = redução de área

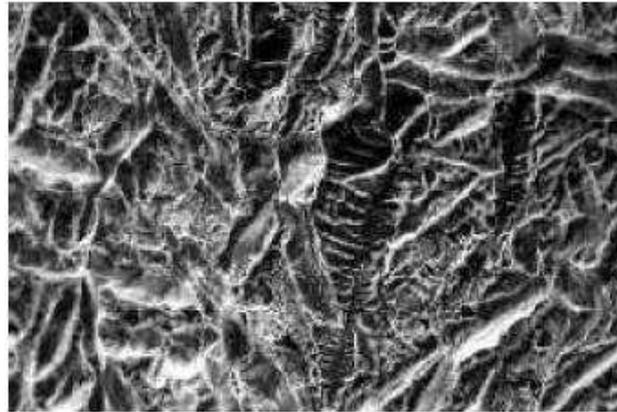
### 3.7 MEV e EDX

A análise fratógráfica de um dos corpos de prova de tração fraturados mostra um aspecto de fratura totalmente frágil, intergranular, com a presença de nitretos de alumínio com morfologia predominantemente dendrítica (Figura 7). Conforme comentado anteriormente, a presença de tais nitretos resulta numa perda significativa de tenacidade do material, contribuindo decisivamente para a falha do componente. A análise geral por EDX confirma a presença de alumínio e nitrogênio na superfície de fratura (Figura 8 e Tabela 5).

a)



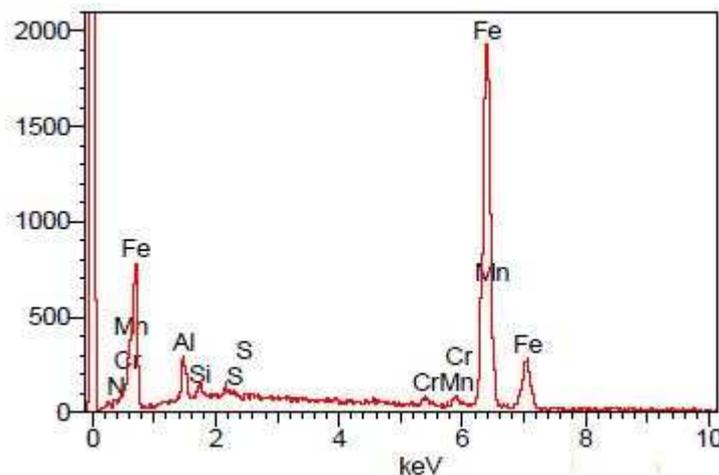
b)



**Figura 7** - (a) Análise fractográfica de um dos corpos de prova de tração mostrando nitretos de alumínio com morfologia dendrítica; (b) fractografia de referência mostrando também a mesma morfologia dos nitretos em fratura intergranular.

**Tabela 5.** Análise geral semi-quantitativa por EDX da superfície de fratura (% em peso)

Medida	N	Al	Si	Mn	Cr	Fé
1	1,01	2,03	0,60	1,70	0,98	Bal
2	1,97	1,89	0,52	1,53	0,82	Bal
3	3,58	2,41	0,67	1,31	0,77	Bal



**Figura 8.** Análise geral por EDX da superfície de fratura do corpo de prova de tração.

#### 4 CONCLUSÕES

A trinca nucleou a partir da ZTA da solda, propagando-se de maneira catastrófica em direção ao centro do elo durante a operação do equipamento. Dentre os fatores que atuaram sinergisticamente para a falha, destacam-se:

- Teor elevado de carbono que aumenta a temperabilidade da liga propiciando a formação de martensita de alta dureza na ZTA. Esta por sua vez, favorece o fenômeno de fragilização por hidrogênio, especialmente se cuidados de pré e pós aquecimento não foram devidamente tomados. Teor mais elevado de carbono também favorece uma redução da tenacidade à fratura do material base facilitando a propagação catastrófica.

- Excesso de alumínio residual, favorecendo a provável precipitação de nitretos de alumínio e conseqüente aumento da fragilização do material base.

## 5 RECOMENDAÇÕES

- Reduzir o teor de carbono abaixo de 0,3%;
- Reduzir o teor de alumínio residual, usando Fe-Si-Zr para desoxidação;
- Utilização de Ti em pequenas concentrações para estabilizar o alumínio residual, após a desoxidação do banho;
- Reavaliar o pré-aquecimento no processo de soldagem, para diminuir a taxa de resfriamento e minimizar a presença de martensita na ZTA;
- Efetuar tratamento térmico de alívio de tensões após a soldagem, o qual também tem o efeito de eliminar hidrogênio por difusão para a atmosfera e reaver a ZTA.

## REFERÊNCIAS

- 1 ASTM E 23 A (2002). American Society for Testing and Materials. “*Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*”.
- 2 ASTM E A370 (2007). American Society for Testing and Materials. “*Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*”.