

## EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO DE SOLUBILIZAÇÃO NA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES DE IMPACTO DO AÇO INOXIDÁVEL SUPERAUSTENÍTICO ASTM A 744 Gr. CN3MN

Márcio Ritoni <sup>1</sup>, Marcelo Martins <sup>1</sup>, Paulo Roberto Mei <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sulzer Brasil S.A., Jundiaí, SP, [marcio.ritoni@sulzer.com](mailto:marcio.ritoni@sulzer.com), [marcelo.martins@sulzer.com](mailto:marcelo.martins@sulzer.com)

<sup>2</sup> Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp, Campinas, SP, [pmei@fem.unicamp.br](mailto:pmei@fem.unicamp.br)

### Resumo

O aço inoxidável superaustenítico ASTM A 744 Gr. CN3MN é aplicado na fabricação de equipamentos que trabalham em ambientes sob corrosão severa com solicitação mecânica. Neste trabalho investigou-se a influência do tratamento térmico de solubilização na microestrutura e propriedades desse tipo de material. Foram realizados tratamentos térmicos de solubilização na faixa de temperaturas entre 1100 e 1250°C. Ensaios de impacto (Charpy) em temperatura ambiente e a -46°C foram realizados nas amostras tratadas termicamente. As análises microestruturais foram feitas por meio de microscopia eletrônica de varredura, eletrônica de transmissão e difração de raios-X. Concluiu-se que, para maximizar a resistência ao impacto, a solubilização deve ser feita a 1200°C, que produz a menor fração volumétrica de precipitados. As amostras solubilizadas a 1200 e 1240°C apresentaram fase sigma ( $\sigma$ ) e carboneto  $M_6C$ .

*Palavras chaves:* aço inoxidável, aço superaustenítico, tratamento térmico, microestrutura, dureza, impacto.

### Abstract

The ASTM A 744 Gr. CN3MN stainless steel super-austenitic is employed in the manufacture equipment working in severely corrosive environments under mechanical loads. In this work, an investigation was made of the influence of heat treatments on the microstructure and properties of this type of material. Solution heat treatments were carried out at temperatures ranging from 1100 to 1250°C. Impact (Charpy) tests were conducted in the environment temperature and -46°C for all solution treated samples. The microstructural analyses were carried out by scanning electron microscopy, transmission electron microscopy and X-ray diffraction. It was concluded that, to maximize the material's impact strength, the solution heat treatment should be done at 1200°C, at which temperature the volumetric fraction of precipitates is lower than at other solution heat treatment temperatures. The samples solution heat treated at 1200 and 1240°C presented sigma ( $\sigma$ ) and  $M_6C$  carbide phases.

*Key Words:* Stainless steel, super-austenitic stainless steel, heat treatment, micro-structure, corrosion, precipitates.

## 1 - INTRODUÇÃO

O aço inoxidável superaustenítico ASTM A 744 Gr. CN3MN é bastante utilizado na fabricação de componentes para equipamentos que trabalham em ambiente sob corrosão severa. Os principais elementos de liga adicionados nesse aço são: o cromo para melhorar a resistência à corrosão, o níquel para estabilizar a austenita, o nitrogênio também é adicionado com objetivo de estabilizar a austenita e o molibdênio é introduzido para aumentar a resistência à corrosão por pite. Além de influenciar na resistência à corrosão, o nitrogênio e o molibdênio melhoram as propriedades mecânicas da liga. O termo superaustenítico relacionado aos aços inoxidáveis austeníticos, indica que possuem altas quantidades de cromo, níquel, molibdênio e nitrogênio [1].

Durante o processo de fabricação, cuidados devem ser tomados para evitar a

formação de alguns tipos de precipitados e fases de maneira que o material alcance as propriedades mecânicas e de resistência à corrosão desejadas. Embora a adição de nitrogênio ajude a retardar a formação de outras fases além da austenita, é inevitável a formação das mesmas, principalmente no processo de fundição de peças com grandes espessuras, onde o resfriamento é mais lento. Sabe-se que em temperaturas entre 650 e 980 °C vários precipitados surgem na estrutura austenítica [2].

O tratamento térmico de solubilização tem o objetivo de deixar o material na melhor condição para aplicação, dissolvendo grande parte dos precipitados formados durante o processo de solidificação e mantendo os elementos de liga em solução sólida na matriz austenítica. A Tabela 1 apresenta diferentes especificações de temperatura de tratamento térmico de solubilização para o aço superaustenítico ASTM A 744 Gr. CN3MN.

Tabela 1: Principais normas e respectivas condições de tratamento térmico de solubilização.

Referência	Temperatura de patamar (°C)	Tempo de patamar (minutos/cm)	Meio de resfriamento
Metals Handbook vol. 4 (1982), p.1697 [3]	1150 a 1205	2,0	Água
ASTM A 744 Gr. CN3MN (1998) [4]	1150 mínima	--	Água
DIN EN 10283 Gr. 1.4593 (1998) [5]	1170 mínima	2,4	Água
Norsk Standard M-630 MDS R16 Rev.3 (2004) [6]	1225 mínima	--	--

## 2 - MATERIAIS E MÉTODOS

Corpos de prova com diâmetro de 50 mm e comprimento de 260 mm foram moldados no processo cura a frio (areia aglomerada com resina orgânica) e preenchidos com o aço inoxidável ASTM A 744 Gr. CN3MN fundido em forno de indução a vácuo. A análise química foi realizada em amostras sólidas no espectrômetro de emissão óptica marca ARL 3460 Metals Analyzer.

Foram usinados corpos de prova com 38 mm de diâmetro e submetidos a tratamentos

térmicos de solubilização com resfriamento em água. As temperaturas e tempo de patamar estão mostrados na Tabela 2.

Para a análise da microestrutura foram cortadas amostras de 20 mm de diâmetro por 20 mm de espessura, lixadas e polidas com pasta de diamante. As amostras foram atacadas com água régia modificada (60 ml de HCL, 20 ml HNO<sub>3</sub> e 20 ml de H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) por, aproximadamente, 3 minutos. Os ensaios por meio de microscopia ótica foram realizados num microscópio modelo Union Met 800X e a fração volumétrica de precipitados foi determinada com uma rede de

pontos sobre uma determinada área da microestrutura conforme a norma E 562 [7]. Utilizou-se um Microscópio Eletrônico de Varredura LEO Stereoscan 440, com resolução de 4,5 nm a 30 kV, para observação da estrutura. As microanálises foram realizadas em Microscópio Eletrônico de Varredura, Philips XL30FEG, com resolução de 2 nm a 30 kV, acoplado a um equipamento de microanálise por Raios-X Oxford, Link ISIS 300, com janela fina de diamante com capacidade de detecção até o elemento boro.

TABELA 2 – Tratamentos térmicos realizados nos corpos de prova usinados.

Solubilização	
Temperatura (°C)	Tempo de patamar (h)
1250	1,5
1240	1,5
1225	1,5
1215	1,5
1200	1,5
1170	1,5
1150	1,5
1100	1,5

O ensaio de impacto (Charpy) foi realizado num equipamento OTTO WOLPERT com a metodologia descrita na norma ASTM A

## 3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1) Análise Química

A composição química do aço utilizado é apresentada na Tabela 3 e foi balanceada de maneira a atender a especificação da norma ASTM A 744 Gr.CN3MN e ao valor mínimo do PRE, conforme especificado na própria tabela.

### 3.2) Ensaio de impacto (Charpy)

A energia absorvida no ensaio de impacto apresenta variação em função das diferentes temperaturas de tratamento térmico de solubilização conforme mostrado na Tabela 4

370 (1997) [8]. Os corpos de prova foram usinados na geometria exigida, com entalhe em V, conforme norma ASTM A 370 – item 19, fig. 11. Foram realizados quatro ensaios na temperatura ambiente e quatro ensaios na temperatura de -46°C para cada amostra.

Exames por difração de raios-X foram realizados a partir de amostras cortadas com 20 mm de diâmetro por 20 mm de espessura, lixadas e polidas com pasta de diamante de granulometria 1µm. Os ensaios foram realizados em equipamento Rigaku Rotaflex, modelo RU200B e câmara multiproposier, utilizando a radiação do cobre Kα1 com comprimento de onda 1,54056 Å. Os resultados foram comparados com as fichas padrão de cada estrutura com base no banco de dados internacional JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards).

Como técnicas complementares foram realizadas análises por meio de microscopia eletrônica de transmissão (MET) em amostras solubilizadas a 1200 e a 1240°C, para identificar a estrutura cristalina dos precipitados através de difração de elétrons em área selecionada (SAEDP). A preparação das amostras foi feita da seguinte maneira: corte, lixamento e polimento eletrolítico ou polimento por feixe de íons. As análises foram realizadas em microscópio de transmissão Philips CM120.

e Figura 1. Nota-se, que, com o tratamento térmico de solubilização, a energia absorvida ao impacto aumenta a medida que a temperatura de solubilização aumenta até a temperatura de 1200°C. A partir de 1200°C, a energia absorvida no ensaio de impacto diminui bruscamente. O comportamento do material referente às propriedades de impacto é similar nas duas temperaturas de ensaio (ambiente e -46°C).

Tabela 3: Composição química do aço utilizado.

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	PRE*
CN3MN (norma)	0,03 max	2,00 max	1,00 max	0,04 max	0,01 max	20,0-22,0	23,5-25,5	6,0-7,0	0,75 max	0,18-0,26	≥40
Amostra	0,019	0,88	0,69	0,02	0,006	21,98	24,84	6,35	0,010	0,23	46,6

\*PRE=Cr%+3,3Mo%+16N% (ASTM A890/A890M, 1991) [9]

Tabela 4: Influência das temperaturas de solubilização na absorção de energia ao impacto.

Temperatura de solubilização (°C)	Impacto temp. ambiente (J)	Desvio Padrão	Impacto temp. -46° (J)	Desvio Padrão
1.100	39,8	5	50,5	8,1
1.150	106,2	9,1	69,1	10,3
1.170	127,7	6,7	84	9,6
1.200	196,3	12,7	151,1	15,7
1.215	43,7	2,8	34,3	9,1
1.225	52	7,1	42,4	4,9
1.240	41,2	5,6	36,1	4,5
1.250	59,6	9	38,8	2,6

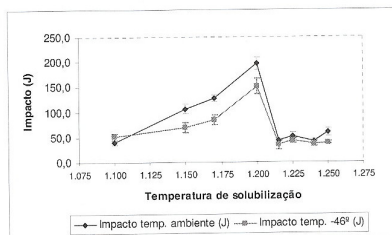


Figura 1: Influência das temperaturas de solubilização na absorção de energia ao impacto.

### 3.3) Análise microestrutural

O aço inoxidável superaustenítico possui matriz austenítica com precipitados de diferentes morfologias. A Figura 2 apresenta a microestrutura bruta de fundição de uma amostra que foi resfriada no molde de areia até a temperatura ambiente.

Nota-se na Figura 2a que existem precipitados dispersos pela matriz nos espaços interdendríticos e nos contornos de grão. A Figura 2b mostra em detalhes a morfologia dos precipitados encontrados na estrutura bruta de fundição.

Nota-se na Figura 3, que mesmo com tratamento térmico de solubilização a 1200°C e 1240°C, os precipitados continuam presentes na matriz austenítica. A morfologia dos precipitados encontrados nas microestruturas das amostras solubilizadas (Figuras 3a e 3b) é similar às encontradas na amostra bruta de fundição (Figura 2b). Na amostra solubilizada a 1200°C não foram encontrados precipitados nos contornos de grãos.

As quantidades de precipitados variam nas amostras com diferentes temperaturas de tratamento térmico de solubilização conforme mostrado na Tabela 5 e Figura 4. Nota-se, que, com o tratamento térmico de solubilização, a fração volumétrica de precipitados diminui nas temperaturas acima de 1170°C apresenta valor mínimo a 1200°C (2,1%) e volta a aumentar nas temperaturas acima de 1200°C chegando a um patamar maior que 7%.

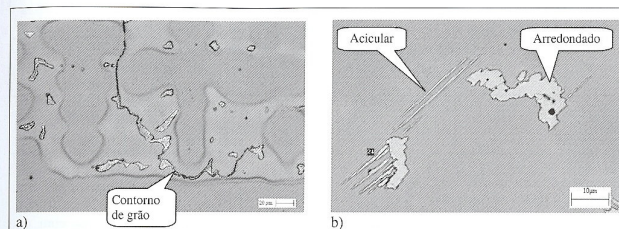


Figura 2: Amostra bruta de fundição – MEV – ataque com água régia.

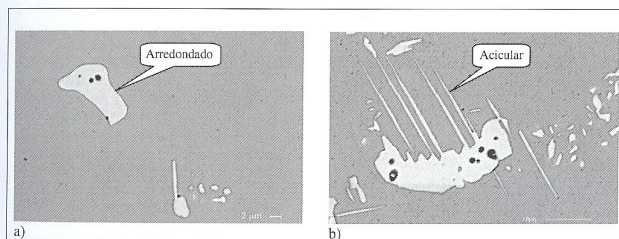


Figura 3: a) Amostra solubilizada a 1200°C, b) Amostra solubilizada a 1240°C. MEV – ataque com água régia.

### 3.4) Análise química dos precipitados

Tabela 5: Influência da temperatura de solubilização nas frações volumétricas de precipitados.

Temperatura de solubilização (°C)	% Precipitado encontrado	Desvio Padrão
1.100	4,8	0,56
1.150	4,7	0,40
1.170	5,2	0,60
1.200	2,1	0,24
1.215	4,1	0,48
1.225	7,4	0,65
1.240	7,2	0,71
1.250	7,4	0,48

As Figuras 5 e 6 mostram o percentual em peso dos principais elementos de liga presentes nos precipitados analisados nas amostras solubilizadas a 1200 e 1240°C. Estas duas temperaturas foram escolhidas para a microanálise por representarem o ponto de inversão dos valores das energias absorvidas no ensaio de impacto conforme ilustra o

gráfico da Figura 1. Nota-se que os precipitados são ricos em molibdênio e cromo. Os precipitados de contornos de grãos encontrados na amostra solubilizada a 1240°C apresentam teor de molibdênio de 25%, sendo ligeiramente maior que os outros formatos da mesma amostra. A Tabela 6 apresenta uma comparação entre a composição química dos precipitados das amostras solubilizadas a 1200 e 1240°C, com a composição química média de precipitados encontrados em trabalhos realizados por outros autores em materiais similares.

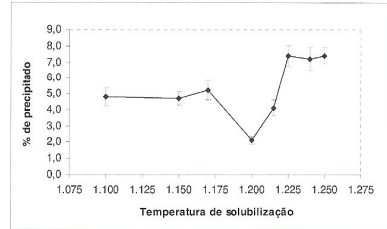


Figura 4: Influência da temperatura de solubilização nas frações volumétricas de precipitados.

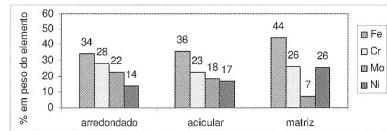


Figura 5: Composições químicas dos precipitados (arredondados e aciculares) encontrados na amostra solubilizada a 1200°C em comparação com a matriz austenítica.

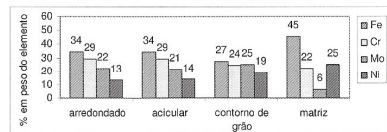


Figura 6: Composições químicas dos precipitados (arredondados, aciculares e de contorno de grão) encontrados na amostra solubilizada a 1240°C em comparação com a matriz austenítica.

A composição química dos precipitados das fases sigma e chi foram as que mais se aproximaram. Isso é um indicio de que os precipitados que existem nas amostras podem ser destas duas fases.

### 3.5 Difração de raios-X

A Figura 7 apresenta os ângulos de difração de raios-X da amostra solubilizada a 1200 °C nas faixas do espectro compreendida entre os ângulos que possuem maior intensidade de difração. Nota-se que os cinco picos identificados coincidem exatamente com os planos de difração da austenita. O pico referente ao ângulo 95,94 plano (222) não ficou evidente no ensaio. Apesar de existirem precipitados na amostra solubilizada a 1200 °C, conforme mostrado nos exames micrográficos, a pequena fração volumétrica (2,1%) dificulta a identificação pela técnica de raios-X.

As Figuras 8 e 9 apresentam os ângulos de difração de raios-X da amostra solubilizada a 1240°C nas faixas do espectro compreendida entre os ângulos que possuem maior intensidade de difração. Os planos da austenita foram identificados dentro do espectro difratado, porém os ângulos 50,67 e 90,67 referentes aos planos (220) e (311) respectivamente, não ficaram evidentes no ensaio. Além da austenita, surgiram outros planos difratados que pertence a fase sigma, porém não foram encontrados todos os planos pertencentes a esta fase na faixa do espectro difratado. Embora a comparação da composição química dos

Tabela 6: Comparação dos resultados da micro-análise com valores da literatura.

Elemento químico	Ferro	Cromo	Molibdênio	Níquel
Composição química das fases encontradas neste trabalho (mín. e máx. % em peso), liga 22Cr-25Ni-7Mo-0,3N.	27 a 36	23 a 31	18 a 25	12 a 19
Composição química da fase chi (χ) encontrada por Heino (1999a), (% em peso), liga 24Cr-22Ni-7Mo-0,5N [10].	36,0	27,5	21,8	10,8
Composição química da fase sigma (σ) encontrada por Heino (1999b), (% em peso), liga 20Cr-18Ni-6Mo-0,2N [11].	33,7	29,0	27,0	8,3

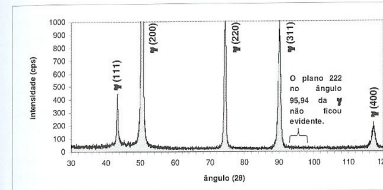


Figura 7: Difração de raios-X da amostra solubilizada a 1200°C, na faixa do espectro compreendida entre os ângulos de difração 40 a 120°.

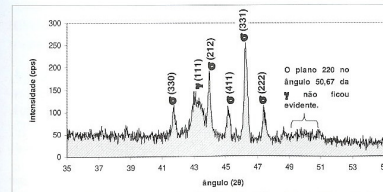


Figura 8: Difração de raios-X da amostra solubilizada a 1240°C, na faixa do espectro compreendida entre os ângulos de difração 35 a 55°.

precipitados feita na Tabela 6 mostra a possibilidade de existir fase chi, a mesma não foi encontrada pela técnica de difração de raios-X.

### 3.6 Microscopia eletrônica de transmissão (MET)

As observações por MET foram efetuadas principalmente em campo claro (BF) tentando identificar as fases precipitadas com tamanhos que permitissem obter um SAEDP (difração de elétrons em área selecionada) representativo. As Figuras 10 e 11 apresentam precipitados referentes às amostras solubilizadas a 1200 e 1240°C respectivamente. Os precipitados foram identificados como carboneto M<sub>6</sub>C (Figura 10) e fase sigma (Figura 11).