

# EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO NA ESTRUTURA E NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO INOXIDÁVEL SUPERAUSTENÍTICO

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 austenítico superligado (22Cr-25Ni-7Mo-0,3N), conhecido comumente como superaustenítico, tem como principal característica a grande resistência à corrosão em ambientes severos, principalmente em água do mar. Além da resistência à corrosão, possui boas propriedades mecânicas e estabilidade térmica. Para alcançar as propriedades citadas, o material deve ser tratado termicamente visando a solubilização dos elementos de liga. Diferentes tratamentos térmicos foram testados neste trabalho: solubilização (de 1100 a 1250°C); alívio de tensões (500 a 800°C) e sensitização (900°C, variando-se o tempo em 1,5h, 12h, 24h e 48h). Foram realizados ensaios de dureza e impacto, além de metalografia ótica para se verificar a influência dos tratamentos térmicos na estrutura do material.

Observou-se que mesmo com temperaturas de solubilização extremamente altas (1240°C) não foi possível dissolver os precipitados formados durante a solidificação. Para maximizar a resistência ao impacto a solubilização deve ser feita entre 1150°C e 1200°C e o alívio de tensões até 500°C. Na temperatura de 900°C a resistência ao impacto (medida na temperatura ambiente) caiu de 25 J para 7 J quando o tempo de permanência foi elevado de 1,5 hora para 48 horas.

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

## 1 - INTRODUÇÃO

O aço inoxidável austenítico superligado (22Cr-25Ni-7Mo-0,3N) recebe o nome de superaustenítico devido sua alta resistência à corrosão, principalmente corrosão localizada (pite, fresta). Esses aços possuem uma resistência equivalente à corrosão por pites (PRE, pitting resistance equivalent) maior que 40, sendo PRE assim definido [1]:

$$PRE = Cr + 3,3 Mo + 16 N \text{ (porcentagens em peso)}$$

O aço inoxidável superaustenítico é aplicado em ambientes de corrosão severa, principalmente sob ação oxidante de soluções contendo altas concentrações do íon cloreto. A resistência à corrosão deste aço nestes ambientes é maior do que a do aço inoxidável superduplex e equivalente a de ligas de níquel, tornando-o uma opção de menor custo.

Durante o processo de fabricação, cuidados devem ser tomados para evitar a formação de fases secundárias e precipitados para que o material atinja as propriedades mecânicas e de resistência à corrosão desejadas. Embora a adição de nitrogênio ajude a retardar a formação de fases secundárias e precipitados, é inevitável a formação das mesmas, principalmente no processo de fundição de peças de grande espessura, onde o resfriamento é mais lento. Sabe-se que em temperaturas entre 650 e 980°C vários precipitados surgem na estrutura austenítica [2].

Observa-se na Figura 1 que o tempo para precipitação de fases secundárias é menor para os aços austeníticos e superausteníticos com maiores teores de cromo e molibdênio. Para o aço 254SMO o tempo para início da precipitação entre 800 e 900°C é inferior a um minuto, enquanto que para o aço 316 é de, aproximadamente, 30 minutos [3].

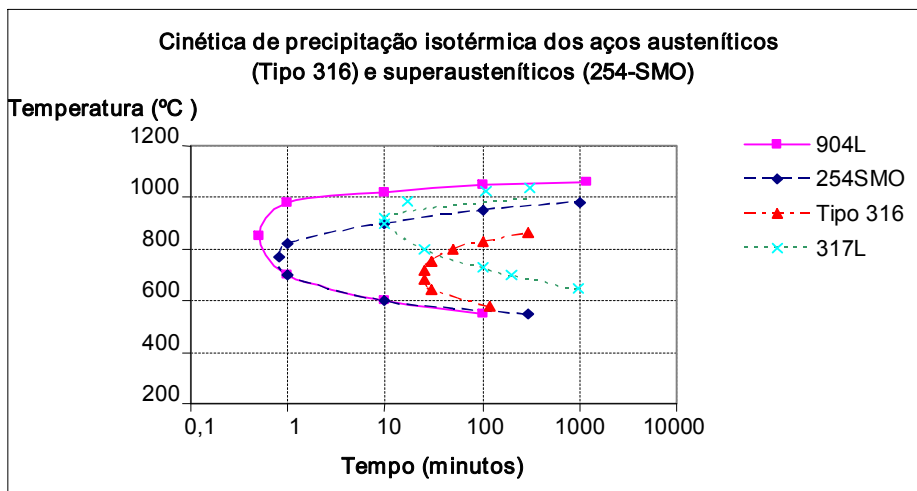


FIG.1: Cinética de precipitação isotérmica nos aços inoxidáveis austeníticos e superausteníticos [3]

Composição química (porcentagens em peso) dos principais elementos dos materiais relacionados na Figura 1.

Material	C	N	Cr	Ni	Mo	Cu
904L	0,02	--	19,0-23,0	23,8-28,0	4,0-5,0	1,0-2,0
254SMO	0,02	0,18-0,22	19,5-20,5	17,5-18,5	6,0-6,5	0,5-1,0
TIPO 316	0,03	0,10	16,0-18,0	10,0-14,0	2,0-3,0	--
TIPO 317L	0,03	0,10	18,0-20,0	11,0-15,0	3,0-4,0	--

Os precipitados eutéticos, que se formam durante a solidificação, não se dissolvem com tratamento térmico de solubilização [4].

As normas ASTM A 744 Gr. CN3MN, DIN EN 10283 Gr 1.4593 e Norsok M-630 Rev. 4 MDS R16 especificam diferentes temperaturas para o tratamento térmico de solubilização de material fundido da liga 22Cr-25Ni-7Mo-0,3N [5, 6, 7].

O objetivo deste trabalho foi o de investigar a influência das diferentes temperaturas de tratamento térmico na morfologia dos precipitados e nas propriedades mecânicas do aço inoxidável superaustenítico 22Cr-25Ni-7Mo-0,3N com base na norma ASTM A 744 Gr CN3MN.

## 2 - MATERIAIS E MÉTODOS

Foram fundidos corpos de prova com diâmetro de 50 mm e comprimento de 260 mm do aço ASTM A 744 Gr CN3MN em forno de indução a vácuo, utilizando refratário à base de óxido de magnésio.

A análise química foi realizada em amostras sólidas no espectrômetro de emissão óptica marca ARL 3460 Metals Analyzer e o resultado é mostrado na Tabela 1.

TABELA 1: Composição química do aço utilizado neste trabalho e os valores previstos pela norma ASTM A 744 Gr CN3MN (porcentagens em peso).

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	PRE
Norma	0,030*	2,00*	1,00*	0,04*	0,01*	20,0-22,0	23,5-25,5	6,0-7,0	0,75*	0,18-0,26	≥40
Aço utilizado	0,019	0,88	0,69	0,02	0,006	21,98	24,84	6,35	0,010	0,23	46,6

\* Valores máximos permitidos pela norma ASTM A 744 Gr CN3MN

Foram usinados corpos de prova com 38mm de diâmetro, os quais foram submetidos a diferentes tratamentos térmicos (Tabela 2).

Para o exame 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 HC<sub>2</sub>H<sub>3</sub>O<sub>2</sub>) por, aproximadamente, 3 minutos, ou com o reagente de Beraha (50 ml de H<sub>2</sub>O, 50 ml de HCL e 1g de K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub>).

A dureza foi obtida conforme a norma ASTM A 370 [8], empregando-se uma esfera de 1/16 polegadas e carga de 100 kgf (resultado em Rockwell B). Para conversão da dureza Rockwell B para Brinell utilizou-se a norma ASTM E140 [9]. Foram realizadas quatro medidas para cada temperatura de tratamento térmico.

O ensaio de impacto foi realizado em corpos de prova com entalhe em V utilizando-se um equipamento OTTO WOLPERT e a metodologia descrita na norma ASTM A370. Foram realizados quatro ensaios na temperatura ambiente e quatro ensaios na temperatura de -46°C para cada temperatura de tratamento térmico.

TABELA 2 – Tratamentos térmicos realizados

Tratamento Térmico	Solubilização		Tratamento isotérmico	
	Temperatura (°C)	Tempo de patamar (horas)	Temperatura (°C)	Tempo de patamar (horas)
Solubilização	1250	1,5		
	1240	1,5	--	--
	1225	1,5	--	--
	1215	1,5		
	1200	1,5	--	--
	1170	1,5	--	--
	1150	1,5	--	--
Alívio de Tensões	1170	1,5	800	4,0
	1170	1,5	740	4,0
	1170	1,5	680	4,0
	1170	1,5	620	4,0
	1170	1,5	550	4,0
	1170	1,5	500	4,0
Sensitização	1170	1,5	900	1,5
	1170	1,5	900	12
	1170	1,5	900	24
	1170	1,5	900	36,0
	1170	1,5	900	48,0

Obs.: Todos os resfriamentos foram feitos em água entre 25°C e 50°C.

### 3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1) Ensaio de dureza

Analisando-se a Figura 2, nota-se que a dureza do aço tende a aumentar com a elevação da temperatura de solubilização a partir de 1200 °C. Provavelmente os precipitados grosseiros que foram dissolvidos na solubilização, reprecipitam como precipitados finos durante o resfriamento, aumentando a dureza do aço.

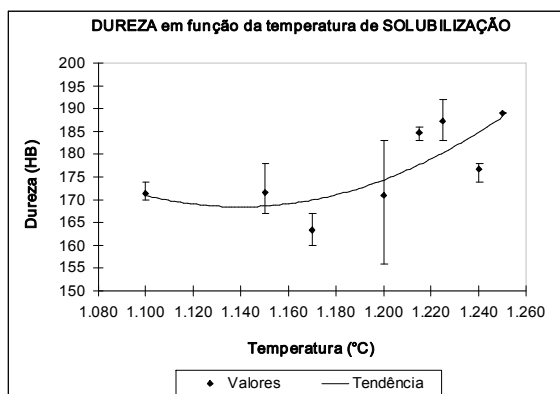


FIG.2: Influência da temperatura de solubilização na dureza

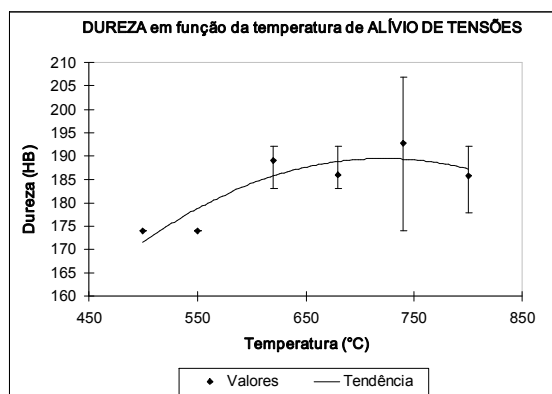


FIG.3: Influência da temperatura de alívio de tensões na dureza

Para o tratamento térmico de alívio de tensões o pico de dureza na temperatura de 740°C (Figura 3). Neste caso o aço foi previamente solubilizado a 1170 °C, o que dissolveu parte de seus precipitados grosseiros e que pouco contribuem para a dureza. Ao ser reaquecido entre 500 e 800°C houve a reprecipitação de carbonetos finos, elevando a dureza do aço.

Na Figura 4 observa-se que quanto maior o tempo de patamar a 900 °C, mais elevada foi a dureza obtida. Neste caso os precipitados grosseiros que foram dissolvidos na solubilização, reprecipitam como precipitados finos tanto no contorno como no interior dos grãos austeníticos aumentando a dureza do material. O aumento contínuo da dureza com o tempo indica que mesmo com 48 horas ainda não havia ocorrido o superenvelhecimento dos precipitados.

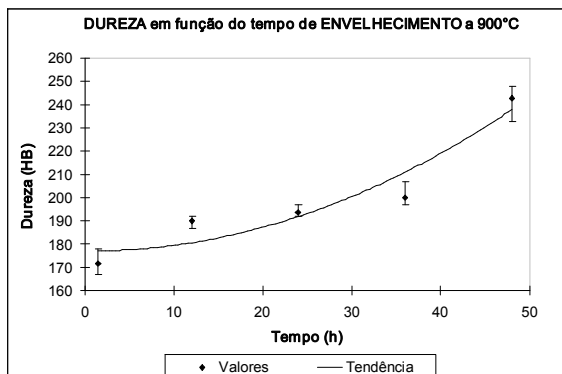


FIG.4: Influência do tempo de envelhecimento à temperatura de 900°C na dureza

### 3.2) Ensaio de impacto

Analisando-se a Figura 5, nota-se que o aço apresentou um aumento na resistência ao impacto com o aumento da temperatura de solubilização até um valor máximo na temperatura de 1170°C voltando a diminuir nas temperaturas acima desta. O valor máximo de impacto correspondeu ao mínimo de dureza obtido no material (Figura 2), o que era de se esperar. Isso ocorreu tanto para a medida de impacto na temperatura ambiente como para -46 °C.

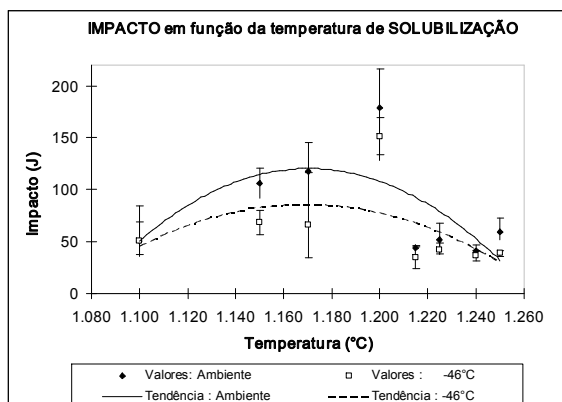


FIG.5: Influência da temperatura de solubilização na energia absorvida no ensaio de impacto

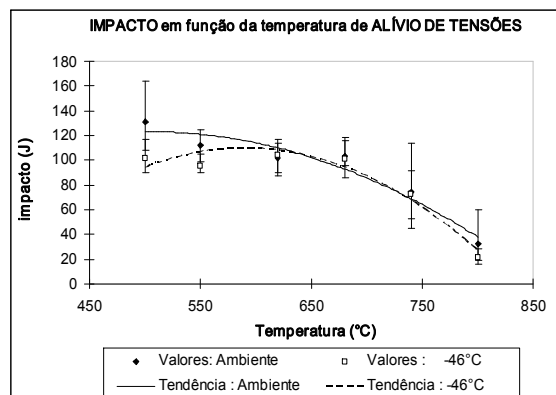


FIG.6: Influência da temperatura de alívio de tensões na energia absorvida no ensaio de impacto

Para o tratamento térmico de alívio de tensões, a resistência ao impacto diminuiu com a elevação da temperatura (figura 6), tanto para a medida de impacto na temperatura ambiente como para  $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$ , numa tendência inversa ao aumento de dureza observado na figura 3.

Na figura 7 observa-se que quanto maior foi o tempo de aquecimento do aço a  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  menor foi a resistência ao impacto obtida, tanto para a medida de impacto na temperatura ambiente como para  $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$ , de maneira contrária ao observado com a dureza na figura 4. O valor obtido para a energia absorvida no impacto foi sempre igual ou menor a  $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$  do que na temperatura ambiente, como era de se esperar.

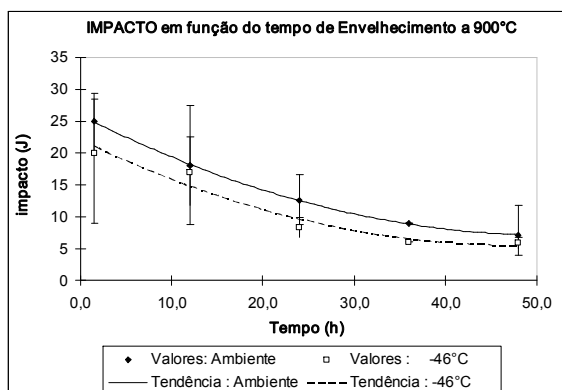


FIG.7: Influência da temperatura de alívio de tensões na energia absorvida no ensaio de impacto

Analisando-se as figuras 8a, 8b e 8c, observa-se que para todas as condições de tratamento térmico, o valor da energia absorvida no ensaio de impacto é inversamente proporcional ao resultado do ensaio de dureza. A solubilização de precipitados grosseiros com posterior reprecipitação como precipitados finos aumenta a dureza e a resistência mecânica do material, porém compromete sua tenacidade (energia absorvida no ensaio de impacto), como era de se esperar. Os dados obtidos são importantes, pois permitem prever a correlação entre a resistência mecânica e a resistência ao impacto destes aços.

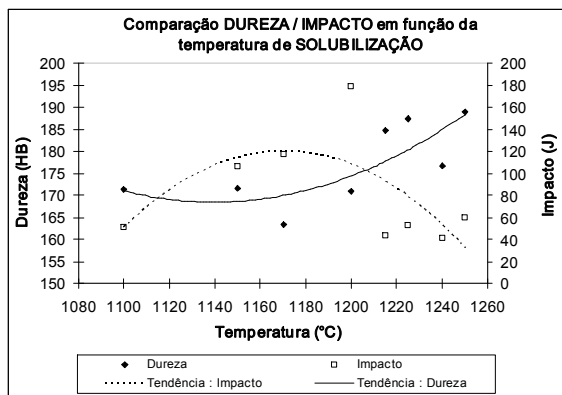


FIG.8a : Influência da temperatura de alívio de tensões na dureza e na energia absorvida no ensaio de impacto

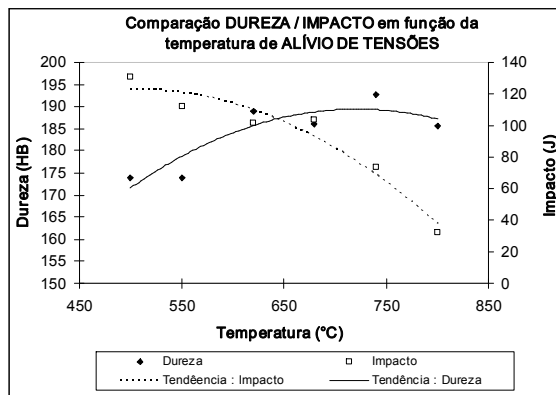


FIG.8b : Influência da temperatura de alívio de tensões na dureza e na energia absorvida no ensaio de impacto

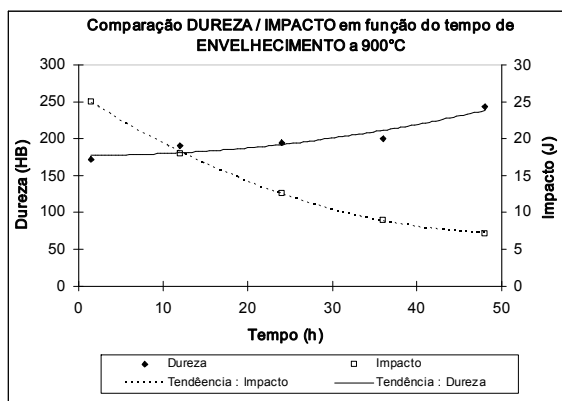


FIG.8c : Influência da temperatura de alívio de tensões na dureza e na energia absorvida no ensaio de impacto

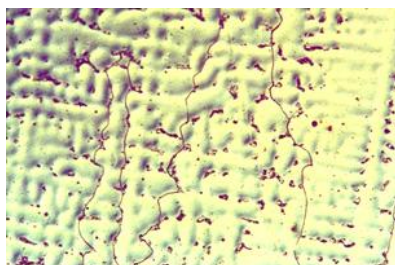
### 3.3) Análise microestrutural

Neste artigo são apresentadas apenas as micrografias que se entende serem as mais importantes para auxiliar na compreensão dos resultados de dureza e impacto obtidos.

Embora até mesmo na maior das temperaturas utilizadas (1250°C) apareçam precipitados, sua distribuição e morfologia diferem, por exemplo, dos de uma amostra bruta de fundição, onde os precipitados se concentram no contorno de grão austenítico.

Um ponto interessante a destacar é que os precipitados que aparecem na amostra tratada a 1240°C (Figura 9-b), são, provavelmente, de origem eutética, pois não se modificaram durante os vários tratamentos térmicos executados.

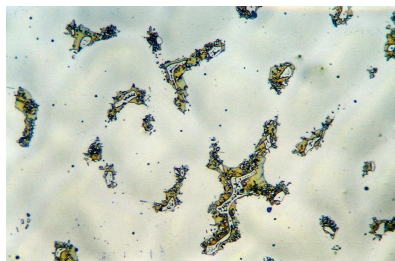
A análise dos precipitados encontrados em cada amostra está sendo realizada por difração de raios-X e será publicada futuramente.



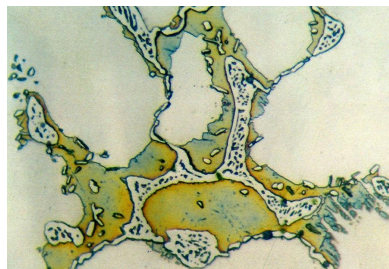
9.a: Bruto de fundição-100X



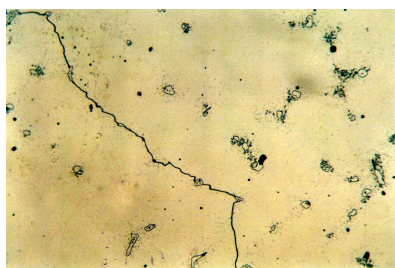
9.b: Solubilizado a 1240°C - 200X



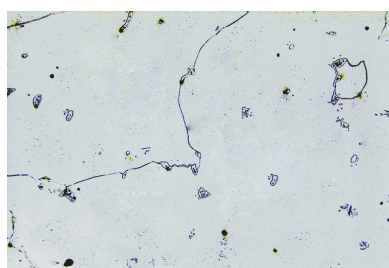
9.c: Solubilizado a 1100°C. 200X



9.d: Solubilizado a 1100°C. 400X



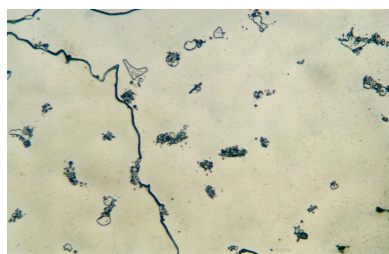
9.e: Alívio de tensões a 800°C. 200X



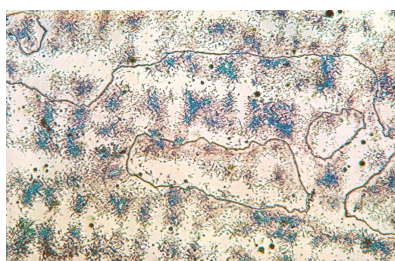
9.f: Alívio de tensões a 680°C. 200X



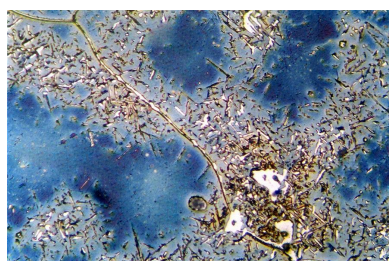
9.g: Alívio de tensões a 550°C. 50X



9.h: Envelhecimento a 900°C por 1 h/pol. 200X



9.i: Envelhecimento a 900°C por 32 h/pol. 100X



9.j: Envelhecimento a 900°C por 32 h/pol. 400X

Figura 9 – Microestruturas obtidas na amostra antes e após os diversos tratamentos térmicos. Ataques utilizados: amostras 9.a, 9.b, 9.e, 9.f, 9.g, 9.h e 9.i (água régia); amostras 9.c, 9.d e 9.j (Reagente de Beraha).



#### 4 – CONCLUSÕES

Para o aço inoxidável superaustenítico 22Cr-25Ni-7Mo-0,3N (NORMA ASTM A 744 Gr CN3MN) submetido a diferentes tratamentos térmicos de solubilização, alívio de tensões e sensibilização conclui-se que:

- Mesmo com elevadas temperaturas de solubilização (1240°C) não é possível dissolver os precipitados eutéticos formados durante a solidificação.

- Para maximizar a resistência ao impacto, a solubilização deve ser feita entre as temperaturas de 1150°C e 1200°C.

- Alívio de tensões acima de 500°C acarretará perda da tenacidade ao impacto, embora até 750°C ainda fique acima do estabelecido pela norma DIN EN 10283 Gr.1.4593 (50 J à temperatura ambiente).

- Na temperatura de 900°C a resistência ao impacto (medida na temperatura ambiente) caiu de 25 para 7 J quando o tempo de permanência foi elevado de 1,5 hora para 48 horas de patamar.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASTM A890/A890M – 91. **Standard practice for castings, iron-chromium-nickel-molybdenum corrosion-resistant, duplex (Austenitic/ferritic) for general application.** American Society for Testing and Materials. Easton. V.01.02. Ferrous Castings; Ferroalloys, p.556-569.
- [2] J. F. Grubb, D. E. Deemer, **AL-6XN Alloy**, Allegheny Ludlum, USA, p. 2-7, 2002.
- [3] J. F. Curtis W. Kovach, **High Performance Stainless Steel**, Níquel Development Institute, USA, p. 17, 2002.
- [4] A. F. Padilha; P. R. Rios, **Decomposition of Austenite in Austenitic Stainless Steel**, USP – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, BR, p. 325-337, 2002.
- [5] ASTM A744 / A744M. **Standard Specification for Casting, Iron-Chromium, Iron-Chromium-nickel, Corrosion Resistant, for General Application.** American Society for Testing and Materials, U.S.A, 1998, p.1-6.
- [6] European Standard EN 10283. **Corrosion-resistant Steel Casting.** DIN Deutsches Institute fur Normung, Germany, Berlin, 1998, p.8.
- [7] Norsok Standard M-630 MDS R16. **Material Data Sheets for Piping.** Standards Norway, Norway, 2004.
- [8] ASTM A370. **Standard Test Methods and Definition for Mechanical Testing of Steel Products.** American Society for Testing and Materials, U.S.A, 1997, p.7-10.
- [9] ASTM E 140. **Standard Hardness Conversion Tables for Metals.** American Society for Testing and Materials, U.S.A, 2002, p.893.