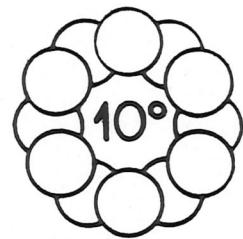




UNICAMP



cbecimat

10º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA  
E CIÊNCIA DOS MATERIAIS

**CBECIMAT**

Águas de Lindóia, SP - 6 a 9 de dezembro de 1992

---

**ANAIS**

**VOLUME II**



UNICAMP

## O EFEITO ENVELHECEDOR DO BERÍLIO EM AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

Isabel Cristina Buttignon - Aluna de Mestrado na Área de Engenharia Metalúrgica-EESC-USP  
 João M.D.A.Rollo-Prof.Assoc.-Depto.de Materiais-EESC-USP  
 Pedro L.Di Lorenzo-Tec.Espec.Depto.de Materiais-EESC-USP



Estudou-se o efeito do berílio como elemento envelhecedor nos aços inoxidáveis objetivando um material com boas propriedades mecânicas e resistência à corrosão. Os aços inoxidáveis experimentais foram submetidos a tratamentos térmicos, termomecânicos e envelhecidos à temperatura de 700°C. Curvas de polarização anódica e curvas de envelhecimento (dureza x tempo), quantificaram a resistência à corrosão e reações de envelhecimento. Testes dilatométricos indicaram as reações de envelhecimento presentes nos aços inoxidáveis austeníticos ao berílio.

### INTRODUÇÃO

É de fundamental importância a interação entre Cr-Ni para promoção da formação de austenita estável em aços com até 0,1%C, após o resfriamento a partir da temperatura típica de tratamento de solubilização de 1050°C-1100°C [1].

A respeito dos aços inoxidáveis austeníticos cerca de 12% Ni em sua composição é requerido para produzir uma estrutura completamente austenítica [1].

Esta classe de aços com estrutura puramente austenítica não é tratável termicamente, mas pode endurecer significativamente por deformação a frio, porém ocasiona uma diminuição na resistência à corrosão do aço.

O elemento químico berílio quando adicionado na faixa de 0,1% a 2,5% nos aços inoxidáveis exerce uma influência marcante na resistência mecânica destas ligas depois de trabalhadas a frio e envelhecidas quando comparado com os elementos alumínio e molibdênio [2].

Outras características do elemento químico berílio são: relativo baixo ponto de fusão (1270°C), alta relação módulo de rigidez/peso, estabilidade dimensional, alta absorção de calor e condutividade [3].

O berílio e suas ligas também têm outras aplicações industriais.

A liga de cobre como exemplo, contendo 0,5% a 0,2% de berílio, considerada liga mãe, é utilizada na indústria eletrônica, para fabricação de molas, conectores e instrumento de medição, etc. [2,3].

O Brasil é o 2º país mais rico em minério de berílio, tanto qualitativamente como quantitativamente [12,13], justificando desenvolvimentos tecnológicos a respeito da utilização deste elemento químico.

### MATERIAIS E MÉTODOS

Fusões de três ligas inoxidáveis experimentais contendo berílio foram feitas em forno de fusão a vácuo. Nas adições das cargas obedeceu-se as pressões de vapor dos seus componentes. O vazamento deu-se em lingoteiras de ferro fundido nodular, pintada com tinta à base de zirconita para evitar a aderência do metal.

O elemento berílio foi adicionado através do eutético Níquel-Berílio procedente da Brush Wellman Engineering Materials, Ohio, USA, sendo a composição da liga eutética:

Componentes	% Peso
Ni	Bal
Be	2,3
C	0,48
Co	0,04

com traços de Fe, Si, Al, Sn, Cr e Pb.

Para facilitar a descrição dos resultados, denominou-se de liga 1, como sendo a liga que possui em sua composição 0,16% em peso de berílio, liga 2, com 0,34% de berílio e liga 3, com 0,37% de berílio (tabela 1).

A composição química das ligas, com exceção do berílio e molibdênio, estão classificadas segundo a norma ABNT/NBR 5601 dos aços inoxidáveis [4], classificação por composição química do tipo 316, do tipo 384, e sendo a terceira puramente experimental, onde a percentagem do carbono é superior à faixa permitida a classe dos aços inoxidáveis austeníticos.

TABELA 1 - Composição química em % peso das ligas experimentais

Elementos Químicos	Liga 1	Liga 2	Liga 3
C	0,065	0,115	0,067
Si	0,80	0,73	0,92
Mn	1,50	1,41	1,70
P	0,024	0,025	0,020
S	0,010	0,005	0,010
Cr	17,90	16,96	15,92
Ni	12,70	17,60	16,50
Mo	3,60	3,57	2,55
Be	0,16	0,34	0,37
Fe	Bal	Bal	Bal

### Tratamento Termomecânico

Inicialmente, os lingotes de aproximadamente 3 quilos (Tabela 1) foram solubilizados (1200°C por 4 horas) e, posteriormente, forjados em condições industriais (temperatura entre 950 a 1200°C), com redução de 50%.

Após esta etapa, com objetivo de verificar dentre as três ligas propostas a que apresentasse maiores picos de dureza, confecionou-se para averiguação, corpos de prova de formato retangular e submetidos a tratamentos térmicos e mecânicos obedecendo a seguinte sequência:

I - Os corpos de prova das ligas 1, 2 e 3 solubilizadas a 1150°C durante 1 hora e resfriadas em água.

SYSNO	848952
PROD	000 1131
ACERVO EESC	

I.a - Em seguida, parte dos corpos de prova das ligas 1, 2 e 3, somente envelhecidas a 700°C, variando o tempo de envelhecimento e resfriados em água.

I.b - Outra parte dos corpos de prova das ligas 1, 2 e 3, foram deformados a frio, com redução de 30% e, em seguida foram envelhecidos a 700°C, variando o tempo de envelhecimento e resfriados em água.

#### Análise Metalográfica

A técnica de ataque para revelação da microestrutura do aço inoxidável austenítico utilizado foi preparada com os seguintes reagentes:

Ácido nítrico - 10 ml

Ácido acético - 10 ml

Ácido clorídrico - 15 ml

Glicerina - 4 gotas

O ataque foi feito por fricção do reagente aproximadamente 4 min. [7], após preparação de rotina de lixamento e polimento.

#### Ensaios: Microdureza, Tração, Eletroquímico

Nos ensaios de microdureza Vickers para todas as ligas termicamente tratadas, utilizou-se um aparelho "Vickers Limite Gray Fort Kent", com carga aplicada de 2,5 kg.

Os ensaios de tração foram conduzidos conforme a norma ABNT-MB-4-1977 [8], utilizando-se uma máquina de ensaios mecânicos Instron modelo TTDM-L.

Traçou-se as curvas de polarização anódica das amostras termicamente tratadas, que tiveram em destaque maior dureza, por meio de um registrador  $E \times \log I/cm^2$ , impondo-se uma velocidade de varredura de 50 mV a cada 5 min conforme as normas ASTM G5-78 [5] e G3-77 [6], a partir de um potencial pré-estabelecido de -700 mV.

#### Ensaios Dilatométricos

Procurou-se, através do método de estudo das transformações de fase em materiais sujeitos a variadas taxas de aquecimento e resfriamento (dilatometria), os pontos de transformações de fase das ligas, onde as variações de comprimento  $\Delta L$  de uma amostra de dimensões padronizadas ( $\theta = 0,2\text{mm} \times L = 12\text{ mm}$ ) são registradas em um diagrama  $dL/Lo = f(\theta)$ , temperaturada em °C [11].

Para tal ensaio, utilizou-se um dilatômetro de temperatura rápida modelo DT-1000 proveniente da Adamel-Lhomargy.

#### RESULTADOS

Os resultados experimentais indicam que a liga 2 (tabela 1) possui significativas reações de envelhecimento. Os resultados abaixo correspondem a liga no estado solubilizado (1150°C por 1 hora) e envelhecido (700°C por 50 min.), e liga 2, no estado solubilizado (1150°C por 1 hora), deformado a frio (redução de 30% e envelhecido (700°C por 25 min.).

#### Análise Metalográfica

As figuras 1 a 4 representam as micrografias da liga 2 nos estados: solubilizado a 1150°C por 1 hora e envelhecido a 700°C por 50 min. e solubilizado a 1150°C por 1 hora, deformado com redução de 30% e envelhecido a 700°C por 25 min.

#### Ensaios de Microdureza e Tração

Os resultados obtidos da liga 2 (Tabela 1), no estado solubilizado e envelhecido e no estado solubilizado, deformado 30% e envelhecido, estão representados na Tabela 2, como também os valores do aço inoxidável austenítico 316L no estado trabalhado a frio e recocido [10], utilizado como material comparativo.

TABELA 2 - Resultados dos ensaios de microdureza e tração

Aço	$\sigma_r$ (MPa)	$\sigma_e$ (MPa)	A(%)	E(%)	Dureza(HV)
316L	620	310	40	30	-
Sol/Env	760	435	30,95	45,8	250
Sol/Def/Env	1182	1066	15,65	31,85	354

#### Análise Eletroquímica

As curvas de polarização anódica da liga 2 no estado solubilizado e envelhecido, e, no estado solubilizado, deformado de 30% e envelhecido estão representados pelas figuras 5 e 6, respectivamente.

Os resultados foram conduzidos a respeito da localização dos parâmetros de corrosão e indicaram, que a liga 2 no estado deformado e apresentando precipitados finamente dispersos reuniu um maior número de parâmetro favorável de resistência à corrosão. Porém, temos que destacar que tais curvas assemelham-se.

#### Ensaios Dilatométricos

As curvas dos ensaios dilatométricos da liga no estado solubilizado e envelhecido estão representadas nas figuras 7 e 8.

Para a liga no estado solubilizado, deformado 30% e envelhecido estão representadas nas figuras 9 e 10.

Conforme as curvas ( $dL/Lo \times t$ ), figuras 8 e 10, traduzem graficamente reações de envelhecimento previamente obtidos. Para a liga solubilizada e envelhecida, maiores reações de envelhecimento foram indicadas nos tempos 29 a 40 min. (ver flechas). Para a liga solubilizada, deformada 30% e envelhecida maiores reações de envelhecimento são indicadas nos tempos de 15 a 20 min. (ver flechas).

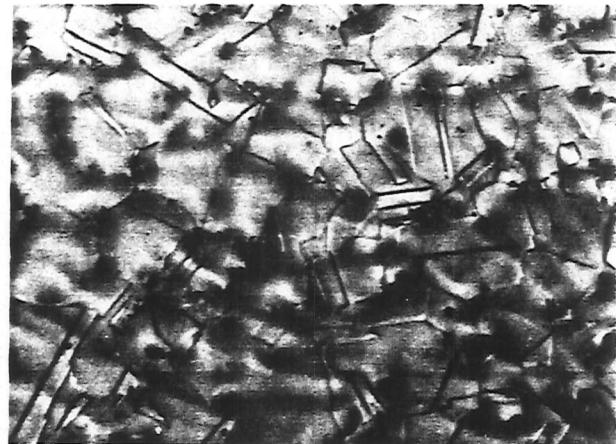


FIGURA 1 - Fotomicrografia da liga 2 no estado solubilizado; observa-se matrizes de deformação e precipitados em toda extensão. 175X.

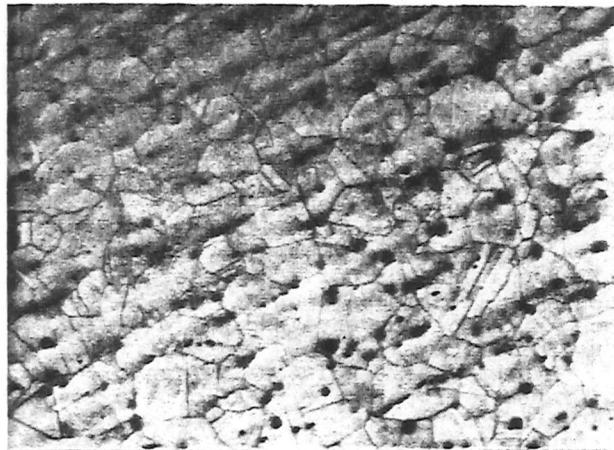


FIGURA 2 - Fotomicrografia da liga 2 no estado solubilizado e envelhecido; observa-se uma recristalização do material e precipitados alongados provavelmente ricos em berílio. 175X.



FIGURA 3 - Fotomicrografia da liga 2 no estado solubilizado e deformado 30%; observa-se uma estrutura bastante deformada com precipitados em evidência em toda superfície. 175X.

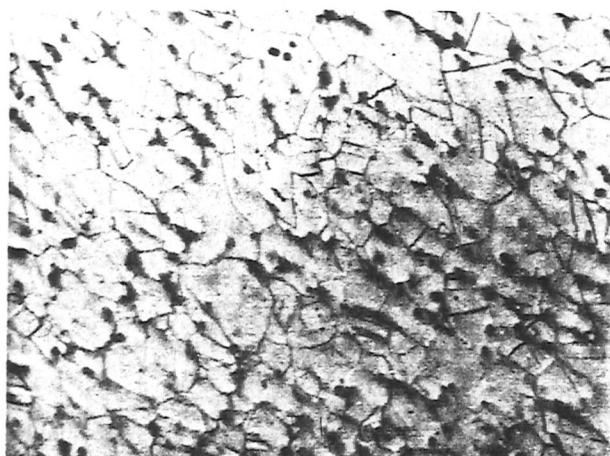


FIGURA 4 - Fotomicrografia da liga 2 no estado solubilizado, deformado 30% e envelhecido; observa-se uma estrutura com certo grau de recristalização e apresentando precipitados mais finamente dispersos. 175X.

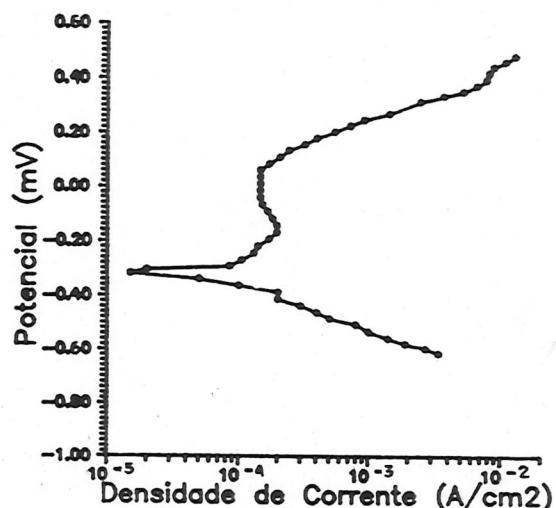


FIGURA 5 - Curva de polarização anódica da liga 2 no estado solubilizado e envelhecido. Meio 1N  $\text{H}_2\text{SO}_4$  + 0,5N NaCl (temperatura ambiente).

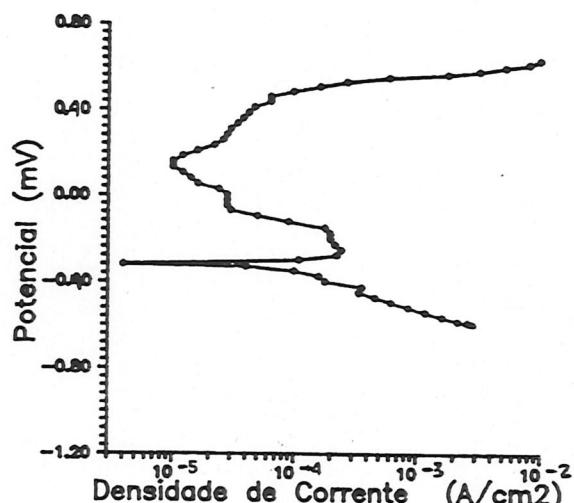


FIGURA 6 - Curva de polarização anódica da liga 2 no estado solubilizado, deformado 30%. Meio 1N  $\text{H}_2\text{SO}_4$  + 0,5N NaCl (temperatura ambiente).

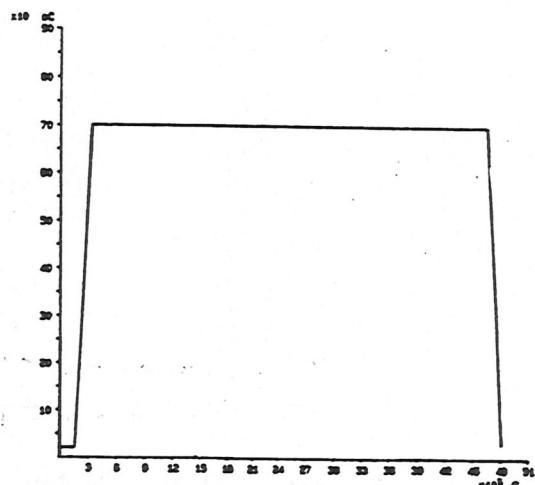


FIGURA 7 - Ciclo de envelhecimento da liga solubilizada. Liga 2 - Tabela 1.

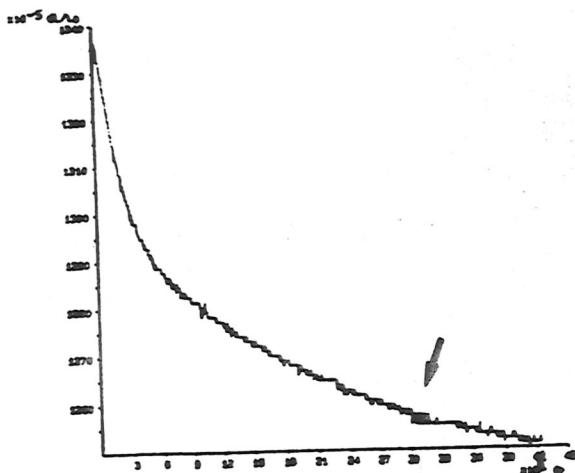


FIGURA 8 - Patamar isotérmico de 700°C por 1 hora da liga solubilizada e envelhecida. Liga 2 - Tabela 1.

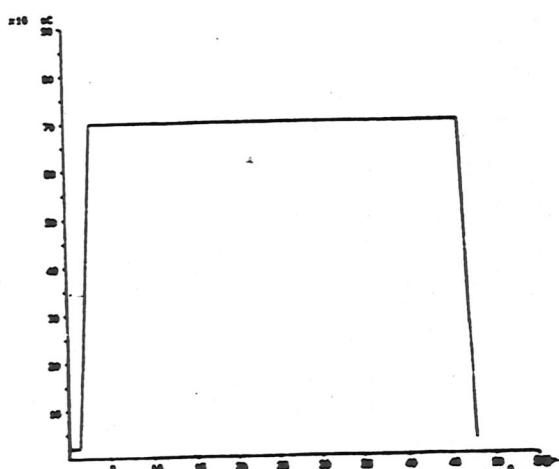


FIGURA 9 - Ciclo de envelhecimento da liga solubilizada e deformada 30%.

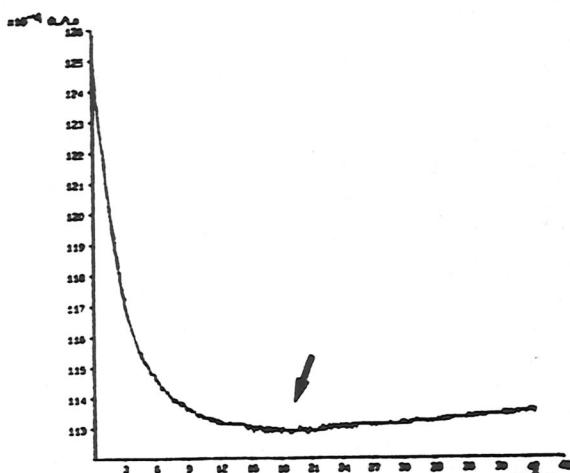


FIGURA 10 - Patamar isotérmico de 700°C por 1 hora da liga solubilizada, deformada 30% e envelhecida. Liga 2 - Tabela 1.

#### CONCLUSÕES

É possível adicionar o berílio como elemento de liga em aços inoxidáveis austeníticos. A presença do elemento químico berílio, produziu nos aços inoxidáveis austeníticos, após o envelhecimento boa resistência mecânica e ductilidade.

O grau de inoxidabilidade dos aços experimentais ao berílio manteve-se nos mesmos padrões dos do aço inoxidável sem berílio.

Pequena quantidade de trabalho a frio impostas as ligas experimentais com berílio favorece as reações de envelhecimento.

#### AGRADECIMENTOS

À Capes, pela Bolsa de Mestrado concedida e à FAPESP, Processo 89/1851-3, pelo equipamento Dilatômetro.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Pickering, F.B., "Physical Metallurgy and the Design of Steels", Applied Science Publishers, LTD, London (1978).
- [2] Isobe, S.N., et alii., "High Strength Stainless Steels", U.S. Patent, 4, 902, 472.
- [3] Preuss, O.P., "Historical Perspectives on the Uses and Health Risks of Beryllium", Fusion Technol., V.8, 1985.
- [4] Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR-5601/81. "Aços Inoxidáveis Classificação por Composição Química", Rio de Janeiro, 1981.
- [5] American Society for Testing and Materials, "ANSI/ASTM G5-78", Part 10, Philadelphia (1978).
- [6] American Society for Testing and Materials, "ANSI/ASTM G3-77", Part 10, Philadelphia (1978).
- [7] Vander Voort, G.F., "Metallurgy Principles and Practice", MacGraw-Hill, New York (1984).
- [8] Associação Brasileira de Normas Técnicas, "NB-4/77, "Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração de Materiais Metálicos" Rio de Janeiro (1977).
- [9] American Society for Metals, "Wrought Stainless Steels", Metals Handbook, Metals Park Ohio, V.3, 1985, pp.3-40.
- [10] Monteiro, W.F., "Processamento Termomecânico de Ligas Cu-Ni-Be", Anais CBECIMAT, V.2, 1990, pp.546-549.
- [11] Mittemeijer, E.J., et alii, "Analysis of Transformation Kinetics by Nonisothermal Dilatometry", Metallurgical Transactions A., V.17A, 1986, pp.1441-1445.
- [12] Chojnowski, E.A., "Berilio". Metal. ABM, V.21(88), 1965.
- [13] Souza Santos, T.D., "Um apanhado sobre o Estado Atual da Metalurgia do Berílio", Bol. ABM, V.5, 1949, pp.155-179.

#### SUMMARY

Beryllium effect as aging element was studied in austenitic stainless steel to find a material which had good mechanical properties and high corrosion resistance. The stainless steels were heat treated thermomechanically treated and aging at 700°C. Anodic polarization curves and aging curves (hardness x time) have quantified the corrosion resistance indicated the aging reactions in beryllium austenitic stainless steel.