



AÇOS INOXIDÁVEIS:

TIPOS,

PROPRIEDADES,

MICROESTRUTURAS

Introdução

A nossa preocupação com ensino e pesquisa em materiais, está direcionado ao estudo das propriedades específicas, tanto do material como do produto.

Propriedade específicas do material:

- Mecânicas: Depende da microestrutura
- Físicas: Independente da microestrurura
- Químicas: Corrosão; depende da microestrutura e do meio
- Biológicas: Biocompatibilidade e Bioadesão.

Propriedades específicas do produto (Técnicas de fabricação)

- Processo de fabricação: Primário / Secundário
- Custo:
- Aparência
- Disponibilidade

O Foco do Ensino e Pesquisa em Materiais é abordado:

- Determinando quais as propriedades são importantes e em seguida selecionar o material que tenha tais propriedades a menos custo;
- Adequando os parâmetros operacionais do produto às características intrínsecas dos materiais;
- Problemas de projeto que envolve materiais é assunto de responsabilidade do engenheiro de materiais: relacionando composição, microestrutura e processamento com as suas propriedades e uso;
- Passando do conhecimento de materiais para a produção;
- Relatando temas que foram objetos de trabalho do grupo de transformação de fases em materiais procuram exemplificar a nossa visão dado ao material "AÇO INOXIDÁVEL".

Breve Relato Histórico Sobre Aços Inoxidáveis

Classificados de acordo com as suas microestrutura em cinco tipos:

- Austeníticos,
- Ferríticos;
- Martensíticos;
- Duplex e Endurecidos por Precipitação.

Bons Produtos de Aços Inoxidáveis são Decorrentes de Processos Controlados

Tratamento térmico de solubilização – recozimento seguido de resfriamento adequado é a conduta a ser adotada aos vários tipos de aços inoxidáveis.

Precauções devem ser tomadas durante o uso em serviço destes aços, visto que precipitações (carbonetos, intermetálicos) podem ocorrer.

No estado recozido, o valor da tensão de escoamento dos aços inoxidáveis e semelhantes aos aços doce.

Elemento cromo:

- 1798 (Alemanha) isolou-se o elemento cromo proveniente do minério de FeCr_2O_4 - cromita. →
- 1921 (França) observou-se que conteúdos de cromo de 1,0 a 1,5% quando adicionado ao ferro, aumenta a resistência à corrosão quando em contato com meio ácido.

Para os metalurgistas o problema permanecia não resolvido, até o início do século XX.

“Objetos de ferro e aço não eram suficientemente resistente à corrosão”

A solução começou simultaneamente, através de vários países.

Inglaterra 1911 – Brearly

Pedido de patente envolvendo aços contendo 9 a 16% de cromo e menos 0,7 de carbono, estavam descobertos os aços inoxidáveis martensíticos.

Estados Unidos 1911 – Becket e Cristian

Estudo de ligas contendo 14 a 16% de cromo e baixo carbono, 0,007 a 0,015 estavam descobertos os aços inoxidáveis ferríticos.

Alemanha 1912 – F. Krupp (companhia)

Apresentou o pedido de patente “Fabricação de objetos que exigem alta resistência à corrosão”.

Duas classes de aços foram desenvolvidas:

- VM Aços (0,15%C, 14% Cr, 18Ni) – Aços inoxidáveis martensíticos.
- VA Aços (0,25%C, 20%Cr, 1,8%Ni) – Aços inoxidáveis austeníticos.

França 1927 – Bain e Griffiths

Reportaram seus resultados a respeito do sistema Fe-Cr-Ni e mencionaram a existência de dois campos de fases, austenita e ferrita.

Estados Unidos - 1940

Desenvolvimento de aços que apresentavam excelente resistência a corrosão e boas propriedades mecânicas. Iniciou-se o desenvolvimento dos aços endurecidos por precipitação

Tipo: Aço Inoxidável Austenístico

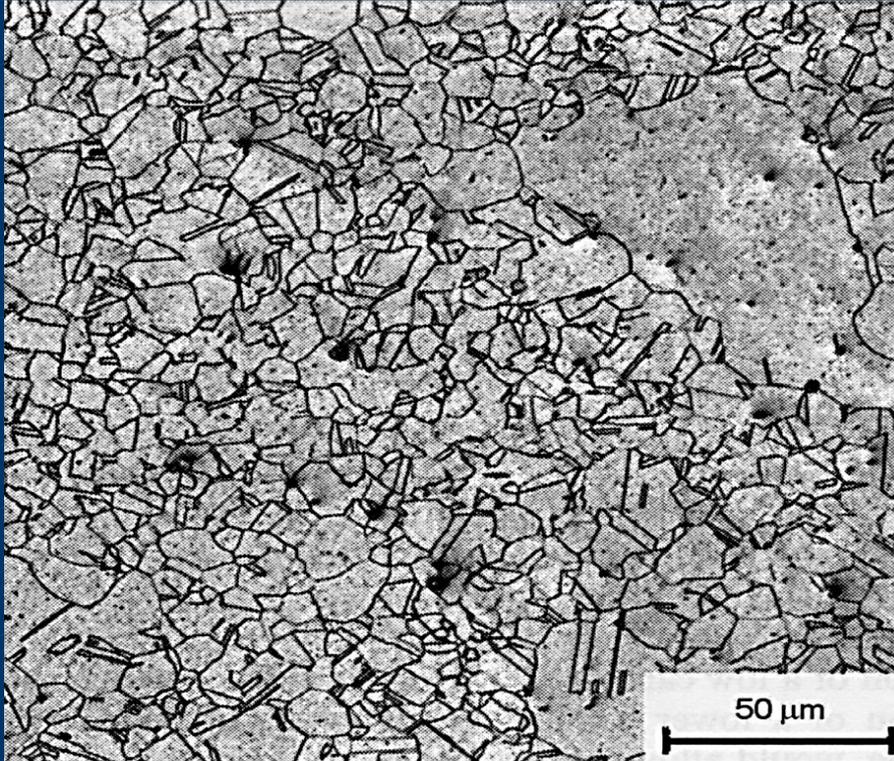


Fig. 1 – Microscopia ótica exibindo o início de recristalização secundária em um aço inoxidável austenítico estabilizado com titânio após tratamento de recozimento, ataque Vilella.

Propriedades:

- Sensitização: tratamento de solubilização
- Endurecimento por trabalho a frio
- Mecanismo de resistência
- Recozimento para alívio de tensão e brilhante
- Apresenta excelente combinação de resistência à corrosão, ductilidade, tenacidade e soldabilidade – monitoramento da cinética de precipitação.
- Formação da martensita
- Transformação durante o resfriamento
- Transformação induzida por plasticidade
- Recozido: tensão de escoamento 200 – 250 Mpa - Descarbonetação

Tipo: Aço inoxidável ferrítico

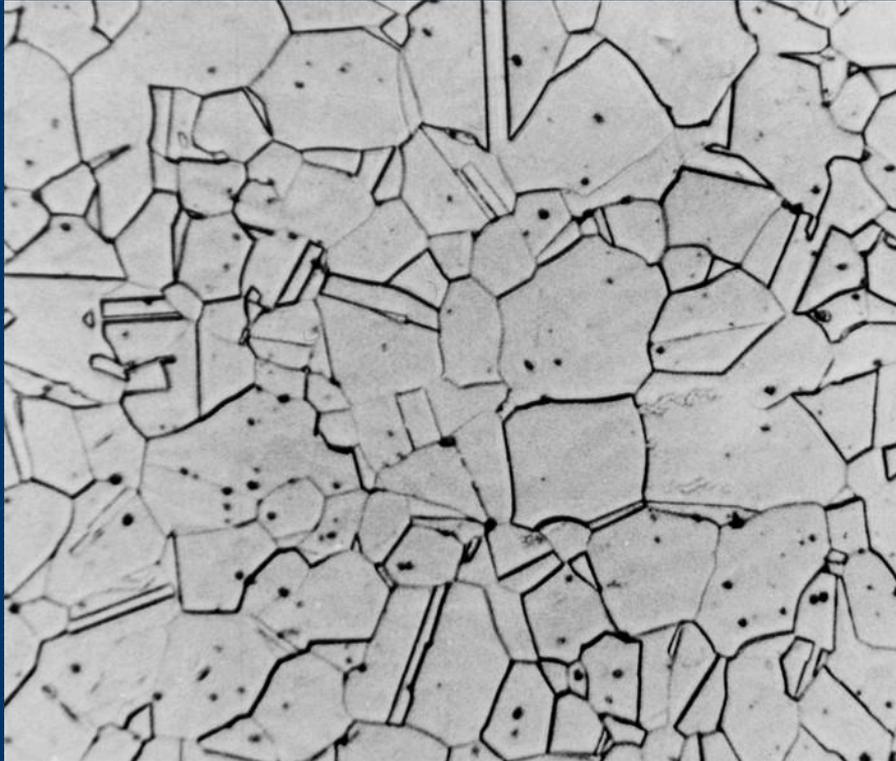


Fig. 2 - Microestrutura típica ferrítica, ataque água-régia 50 x

Classificação segundo a sua geração

- Quando o processo de descarboxidação era insuficiente; carbono e cromo relativamente alto Ex. AISI 430;
- Com baixo carbono e nitrogênio, Ex. AISI409, contendo Ti, Nb e Mo;
- Processo VOD/AOD, redução de carbono anulando os efeitos de descarboxidação;
- Ex. AISI 444, $C \leq 0,002$ $Mn \leq 1,0$ $Si \leq 1,0$ $Cr 17,5 - 19,5$ $Mo = 1,75 - 2,50$ $Ni \leq 1,0$, $Nb + Ti \geq 0,20 + 4(C + N)$;
- Estabilidade microestrutural
- Fragilidade 475 C. Precipitação de fases α' ;
- Fases σ , χ (x);
- Escolha da temperatura e tempo em que a cinética é fornecida;
- Propriedades desejadas, ganho de resistência mecânica sem perda de ductilidade e tenacidade

Tipo: Aço Inoxidável Martensítico

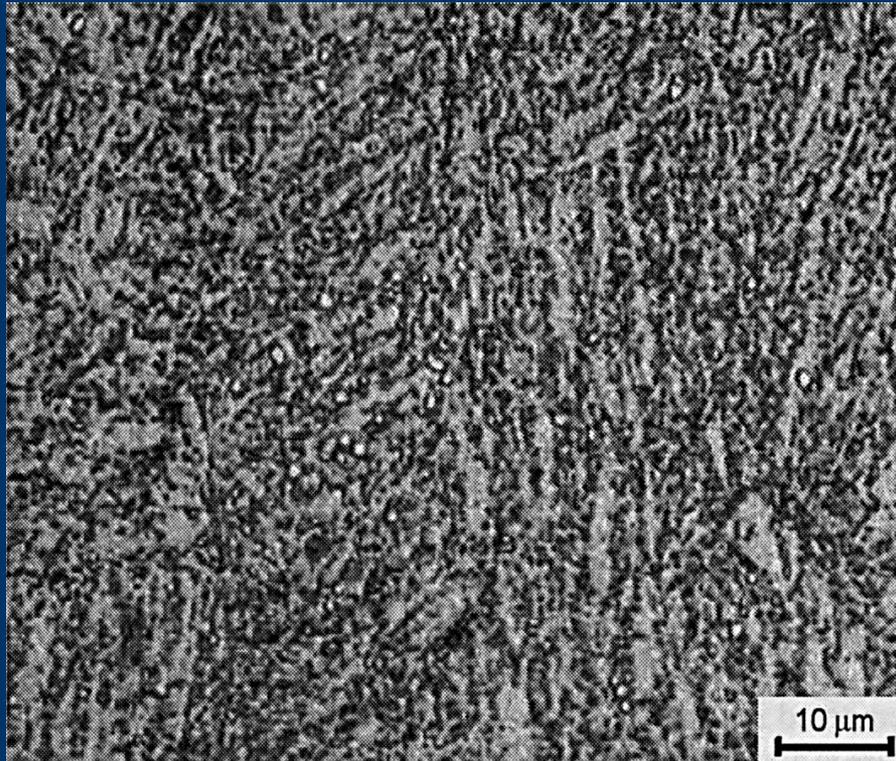


Fig. 3 – Aço inoxidável martensítico AISI 410 temperado e revenido 20 HRC. Microestrutura de martensita revenida com finos carbonetos precipitados. Microscopia ótica. Ataque Villela

- São ligas do sistema Fe-Cr-Ni contendo cromo 11,5 a 18% e carbono 0,1 a 1,2%, e são austenísticos a alta temperaturas 950° C, e necessitam estabilizar esta fase devido a presença de cromo, que é um elemento alfa-gênico.
- Aço inoxidável de baixo carbono;
- Aço inoxidável de médio carbono. Ex. AISI 420;

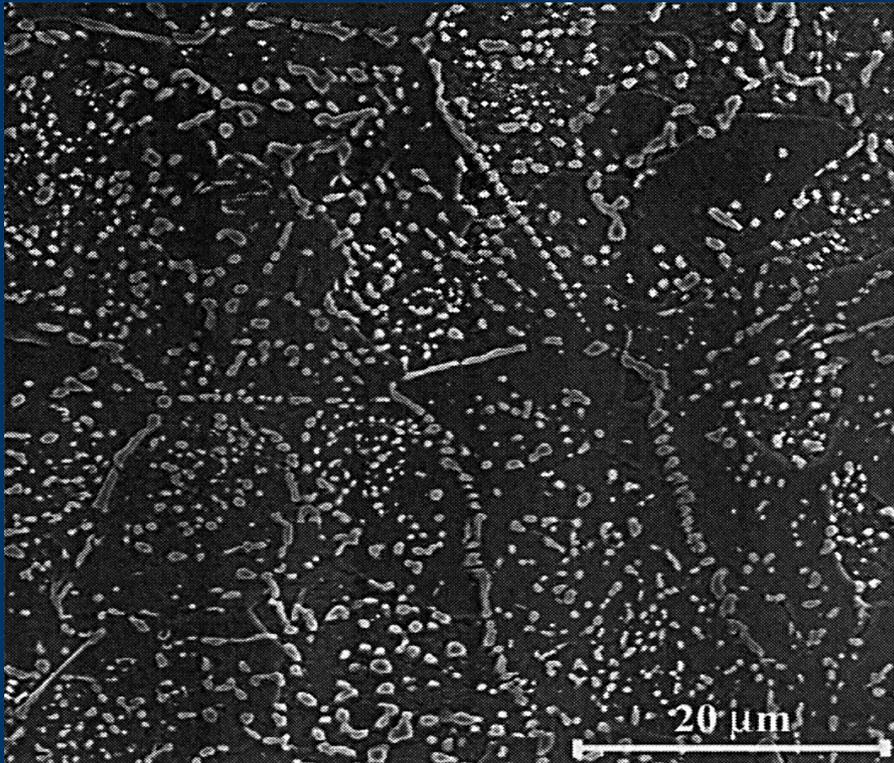


Fig. 4 – Aço inoxidável martensítico do tipo AISI 420. Microestrutura de martensita revenida com precipitados intergranular e intragranular. MEV usando eletrons secundários. Ataque Villela

- Altas temperaturas de austenitização conduzem a possibilidade de precipitação de $M_{23}C_6$, em contornos de grão. Empregado em cutelaria instrumental cirúrgico

Tipo: Aços inoxidáveis duplex



Fig. 5 – Microestrutura típica de aço inoxidável duplex: Austenita-Ferrita.

Com a introdução no sistema de refino VOD e AOD foi possível produzir aços com baixos percentagens de carbono, atenuando a fragilidade, porém isto foi à 50 anos atrás.

1. Fragilidade causada pela presença da rede de carboreto, particularmente na austenita em ligas com alto carbono: $0,3 \leq C \leq 0,5\%$ utilizado no estado bruto de fusão após o recozimento.
2. Fragilidade causada pela precipitação da fase alfa primo, fragilidade da 475°C da ferrita.
3. Fragilidade causada pela precipitação da fase sigma (σ), particularmente dentro da ferrita.

Tipo: Aços inoxidáveis endurecidos por precipitação

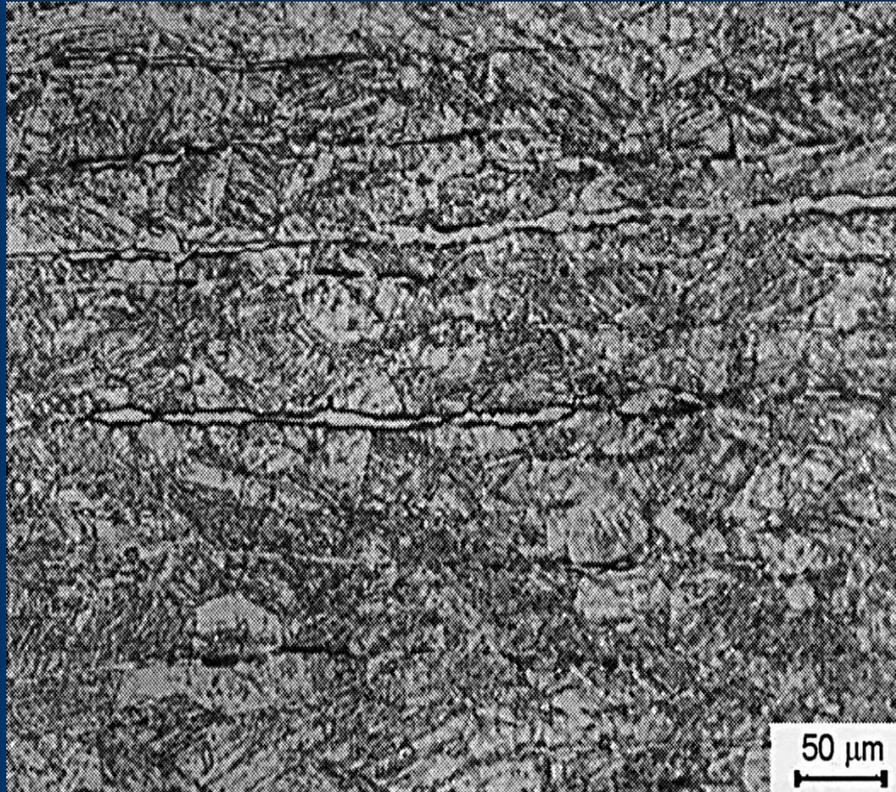


Fig. 6 – Aço Inoxidável 17-7 PH, resfriado e revenido a 510° C. Microscopia ótica evidenciando ferrita em linhas e carbonetos finamente disperso em uma matriz martensítica, ataque Villela.

Temos três sub-classes

1. Austeníticos: 600 a 700 MPa de tensão de escoamento. Ex. 17-10 PH
2. Martensítico: 1100 a 1600 MPa de tensão de escoamento. Ex. 17 – 4 PH
3. Semi-Austeníticos: 1200 a 1800 MPa de tensão de escoamento. Ex. 17-7-PH.

Oferece alta resistência e razoável tenacidade, com resistência a corrosão superior quando comparados com aços inoxidáveis martensíticos do sistema Fe-Cr-C

Aços Inoxidáveis: Tipos, Microestruturas e Propriedades, Será Abordado Analisando Composições Químicas de Aços Inoxidáveis que Foram Objetos de Estudo do Grupo de Transformação de Fases em Materiais.

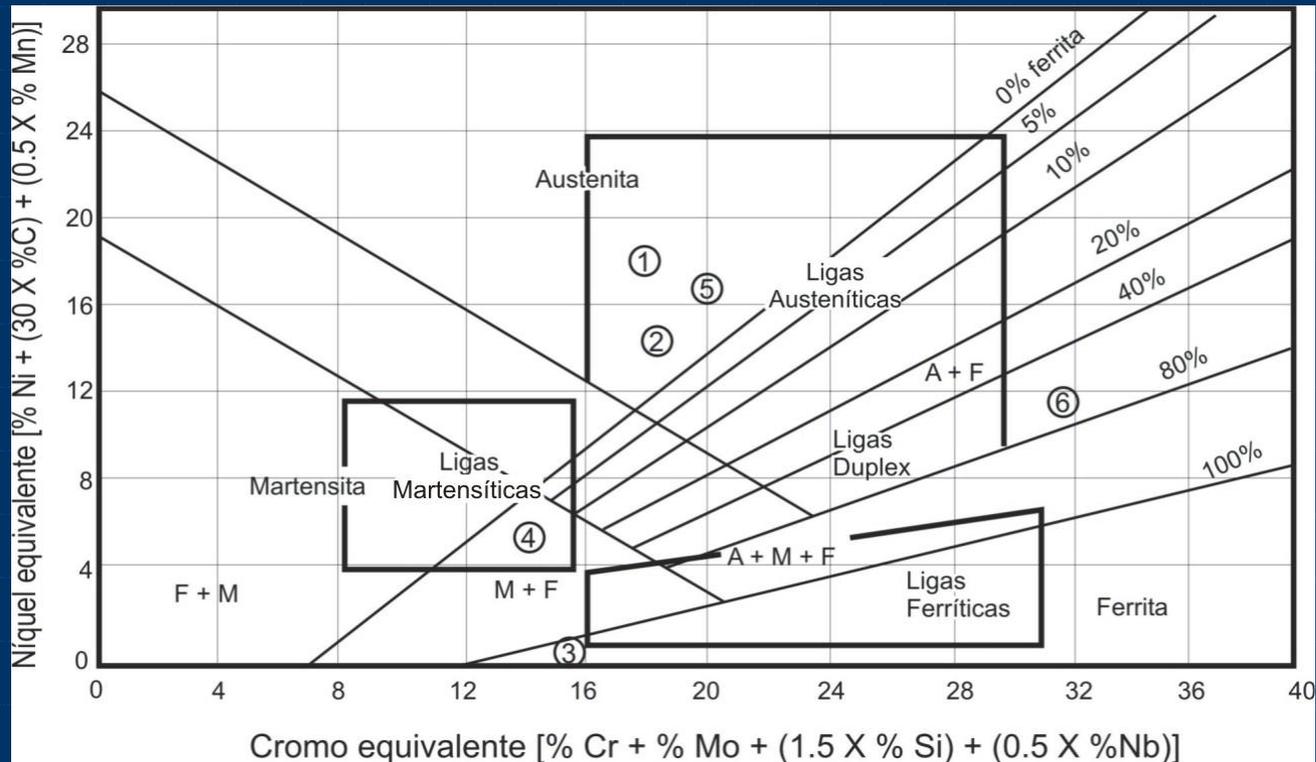


Fig. 7 - Constituição do diagrama de Schaeffer para Aços Inoxidáveis.

A faixa de composição típica dos aços inoxidáveis ferríticos, martensíticos, austenísticos, duplex e endurecidos por precipitação, estão superpostos sobre este diagrama, com a indicação, por número, dos temas que serão discutidos.

Tema 1 – CHAPA FINAS DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍSTICOS

(espessura = 0,2 mm)

Aplicação: Estampagem profunda

Sugestão de um produto: Corôas Ortodônticas

Composição: Matriz do Aço Inoxidável AISI 316-L, modificada.

Elemento	Função
Nb = 0,34	Forma carbonetos/retardando a cristalização e promovendo o ancoramento dos contornos dos grãos austeníticos.
Mo = 0,95%	Substituição parcial
Cr = 16,4%	Teor mais baixo, aumenta a difusibilidade do Nb
Ni = 128%	Teor superior o da matriz, objetivando aumentar a solubilidade do Nb na austenita

Reaquecimento da composição – Temperatura = 1220° C

Tratamento de solubilização sem crescimento dos grãos.

Laminação de desbaste – refino da microestrutura – deformação / recristalização

Laminação de acabamento. Abaixo de TNR – Grãos achatados em panqueamento

Propriedades:

Ensaio Erichsen = 12,2 (mm) estampagem extra profunda

Índice de laminação = 17,5

TG > 8 segundo ASTM

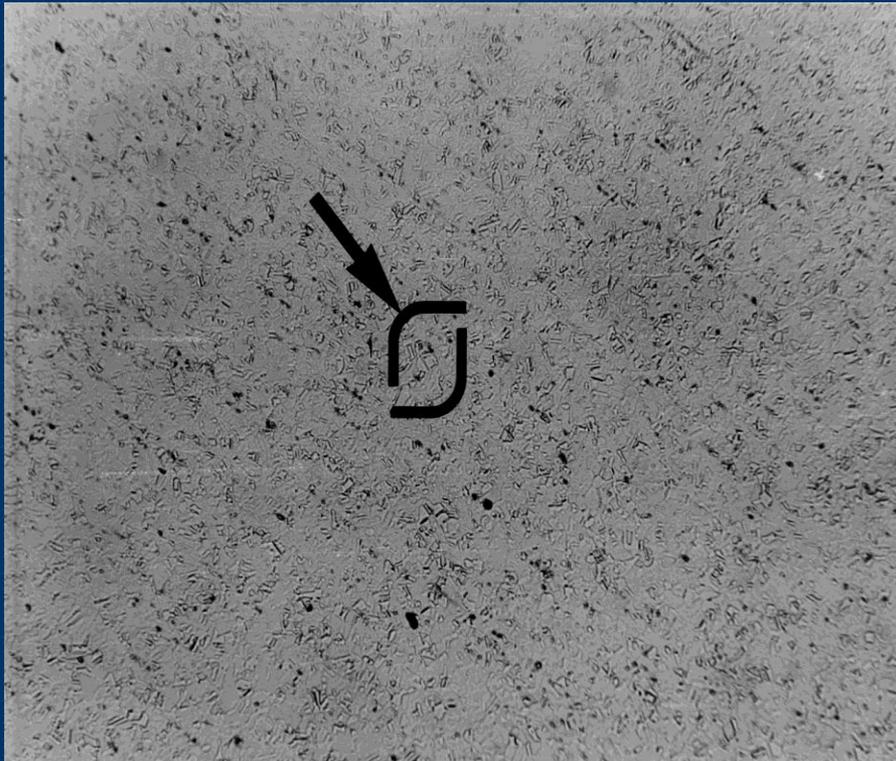


Fig. 8 - Fotografia do material após laminação controlada
Ataque: Água Régia – Aumento 100x

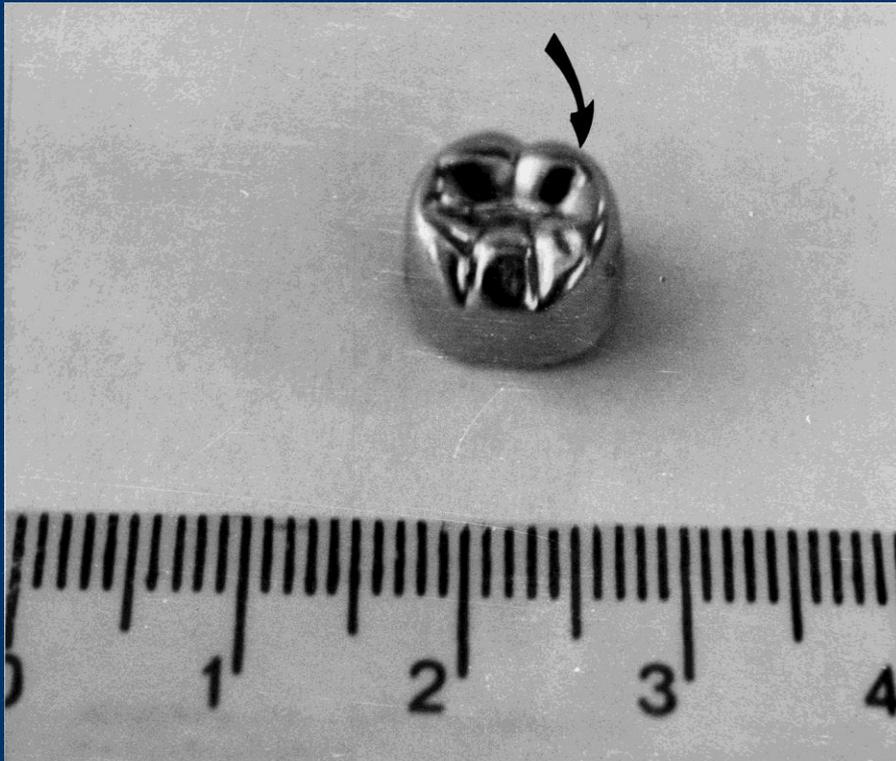


Fig. 9 - Vista superior da corôa estampada, escala 1:4

Tema 2 – AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO, FUNDIDO PELO PROCESSO DE CERA PERDIDA

Aplicação: Restauração dentárias, coroas totais.

Composição: Matriz do aço AISI 316-L com nióbio, adicionado hiper estequiométrico.

C = 0,012% Mn = 1,16 % Si = 0,73% P = 0,015%

S = 0,009%

Ni = 12,6% Facilita a solubilidade sólida

Cr = 16,0% Adicionado na faixa compatível para a fusão em cera perdida

Mo = 1,0 Nb = 0,84

Quando aquecida ao ar e a altas temperaturas material propicia a migração crescente dos elementos: Mn, Fe, CR, Ni, Nb e Mo

Propriedades mais relevantes

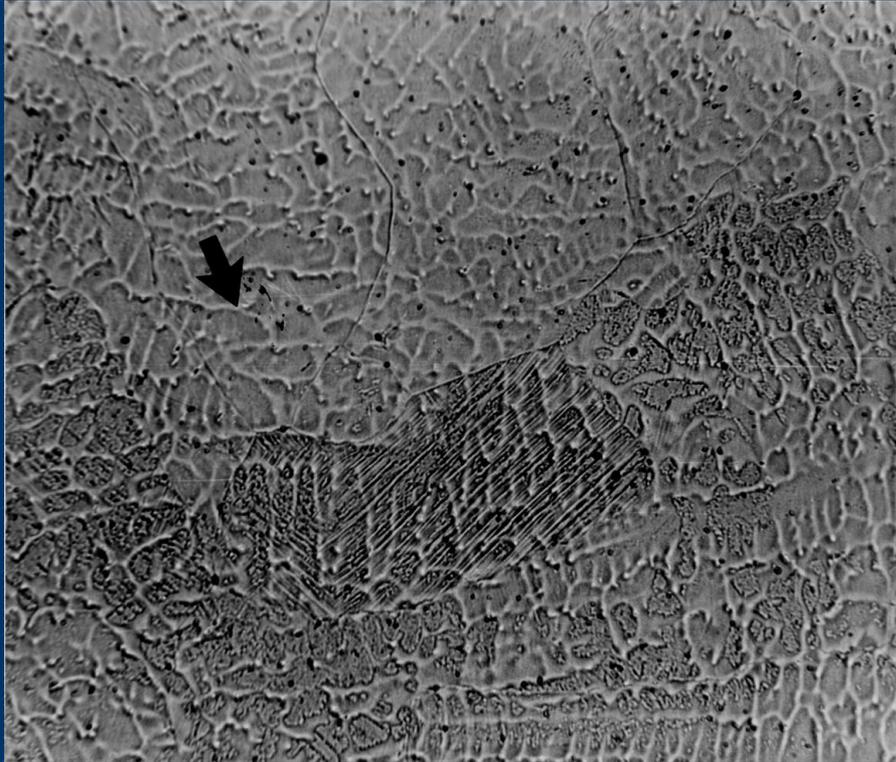


Fig. 10 - Fotomicrografia do material fundido por cera perdida ataque: água-régia – aumento 110 x.

Observa-se grãos dendríticos de solução sólida, em uma matriz de eutítico binário.

- ◆ Diminuição do ponto de fusão
- ◆ Menor contração de fundição
- ◆ Baixa tendência ao molhamento, acarretando um aumento na fluidez
- ◆ Boa resistência à oxidação.



Fig. 11 - Fundição por cera perdida de uma coroa total oca e uma incrustação. Escala 3:1

Tema 3 – AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO DO TIPO 409 NO ESTADO LAMINADO PLANO

Aplicação: Tubo de sistemas de exaustão (veículos)

Tipo de microestrutura: Matriz com grãos ferríticos finos e equiaxiais, contendo precipitados finamente dispersos

Problema: Esfoliação ocorre durante o processo de ligotamento contínuo, apresentando intensos lascamentos na superfície do lingote.

Composição:

C = 0,008% → Nível baixo, reage com o oxigênio formando CO ou Co₂, que ao se desprender destrói a carepa ou a torna porosa, deixa o metal susceptível a oxidação.

Cr = 11,75 → Resistência à oxidação; forma uma película de S₁O₂ na interfa e oxidometal.

Ti = 024 → Melhora a conformabilidade e previne a diminuição da ductilidade após a oxidação do aço.

Nb = 032 → Atenua a esfoliação.



Fig. 12 – Aspecto superficial do aço AISI 409, com nióbio e titânio, após laminação convencional MEV 1000X

Tema 4 – AÇO INOXIDÁVEL SUPERMARTENSÍTICO

Aplicação: Ferramental Cirúrgico, Indústria do Petrólio

Tipo de microestrutura: Baseado no sistema Fe-Cr-Ni-Mo, com baixa quantidade de carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre ($C \leq 0,02$ e $N, P, S \leq 0,003$)

Proposta: Substituir o aço inoxidável AISI 420, contendo 13% a 0,2% C

Composição Química: Cr = 12,50 Ni = 5,4 Mo = 2,1 C = 0,017 Mn = 0,30
Si = 0,30 S = 0,003 P = 0,005 Ti = 0,13.

Tratamento térmico: Solubilizado 1000° C, temperado ao ar (30° C/S), revenido a 570° C por 45 minutos; valor de dureza 29 Rc, Elongação = 15%

Microestrutruura: Refinada composta de matriz martensítica com partículas de carbonitreto de titânio Ti (C, N), com 70 nm



Fig. 13 – Microscopia ótica obtida a 1150° C, matriz austenítica, com tamanho de grão ASTM 10

Tema 5 – CHAPAS COM BOA RESISTÊNCIA MECÂNICA E DUCTILIDADE. AÇOS TRIP

Uso: Componentes que requerem **baixo peso estrutural**

Tipo de microestrutura: Martensita α originada da austenita instável, apresentando um aspecto alongado, seguindo direção da laminação.

Composição:

C = 0,24% → formadores de carbonetos

Si = 0,4%

Mn = 0,27%

P = 0,003% → baixo, evitar fragilidade no revenido

S = 0,005% → baixo, evitar a formação de inclusões não metálicas e sulfetos

Cr = 17,48% → resistência à corrosão, porém em porcentagens que não catalizem a formação da ferrita δ e fase σ

Ni = 9,5% → Estabilizar a austenita

Nb = 1,99% → formadores de carbonetos de Nb, não catalizando a formação de ferrita δ e fase σ

Abaixo de MS → A rede espontaneamente cisalha para uma estrutura martensita, sem a influência de tensão ou deformação

Acima de MS → Sob a ação **deformações mecânicas**, a transformação martensita também pode ocorrer. É definida então uma **temperatura limite** Md

Processamento termomecânico Convencional

Necessito **subir** Md, em nível da **temperatura ambiente**

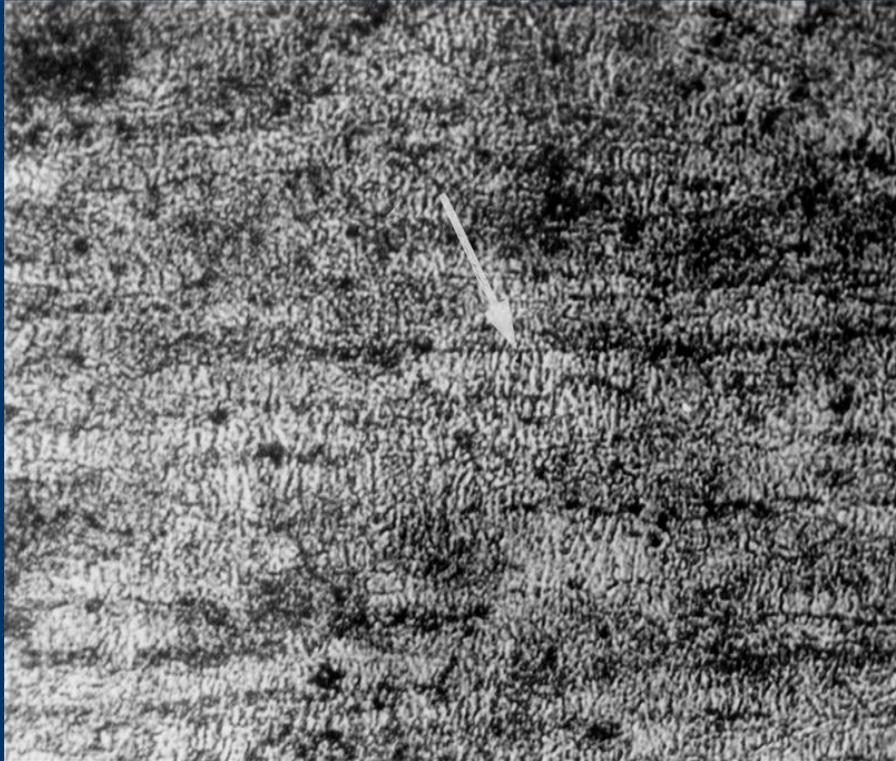


Fig. 14 – Fotomicrografia do material após plasticidade induzida por deformação. Martensita α (ccc, magnética) carbonetos precipitados, alinhados na direção de laminação. Deformada (80% a 450°C + 15% a temperatura ambiente). Ataque: cloreto ferrítico – aumento: 250 X.

Método:

- 1) Impor 80% de deformação a 450°C, propiciando a **precipitação dos carbonetos**, subindo Md.
- 2) Laminar a temperatura ambiente para obter a **plasticidade induzida por deformação**, transformar $\gamma \rightarrow$ martensita α .

Propriedades mais relevantes do material TRIP ao nióbio.

$\sigma_e = 1120$ MPa

$\sigma_r = 1268$ Mpa

A% = 14,4

Rureza Rc = 44,6

Tema 6 – AÇO INOXIDÁVEL AUSTENO-FERRÍTICO → ENTENDIMENTO DA METALURGIA E CINÉTICA DA PRECIPITAÇÃO DE FASES

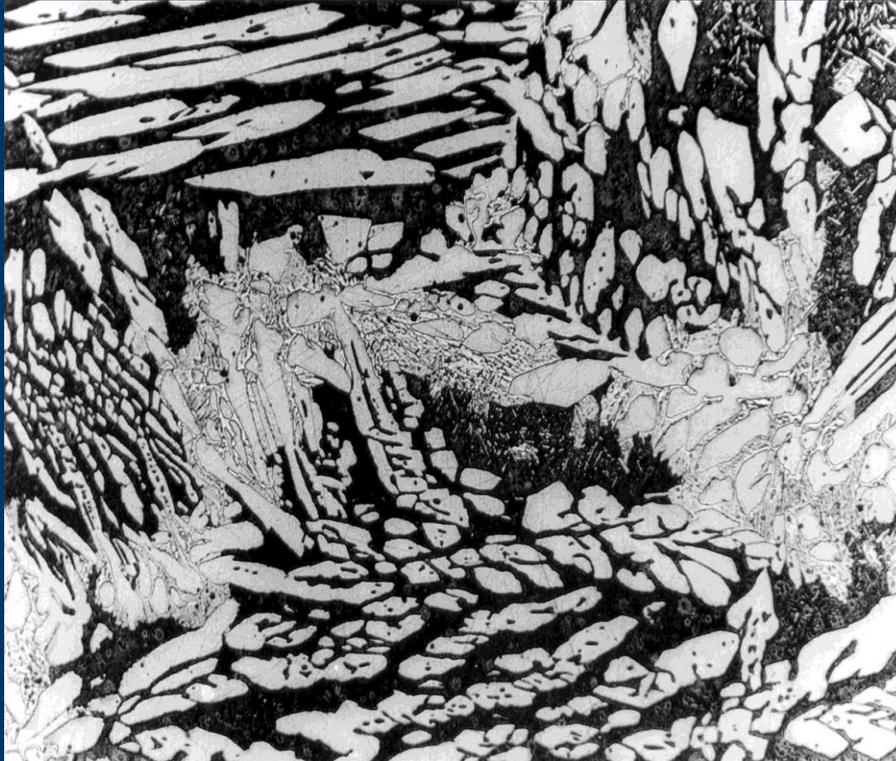
Uso: No estado fundido, componentes de bombas centrífugas para transporte de produtos corrosivos nas indústrias químicas

Tipo de microestrutura: Bruto de fundição, austenita (γ) + Ferrita (α).

Composição:

(segundo DIN W Nr 14517)

26,0% Cr	→ propicia resistência à corrosão
6,4% Ni	→ propicia baixo custo, devido a “baixos” teores
3,2% MO	→ propicia resistência à corrosão por pite, generalizada em em frestas
3,0% Cu	→ propicia resistência à corrosão e endurecimento por precipitação
0,02% C	→ propicia resistência mecânica ao desgaste
0,21% N	→ propicia resistência mecânica e à corrosão por pites

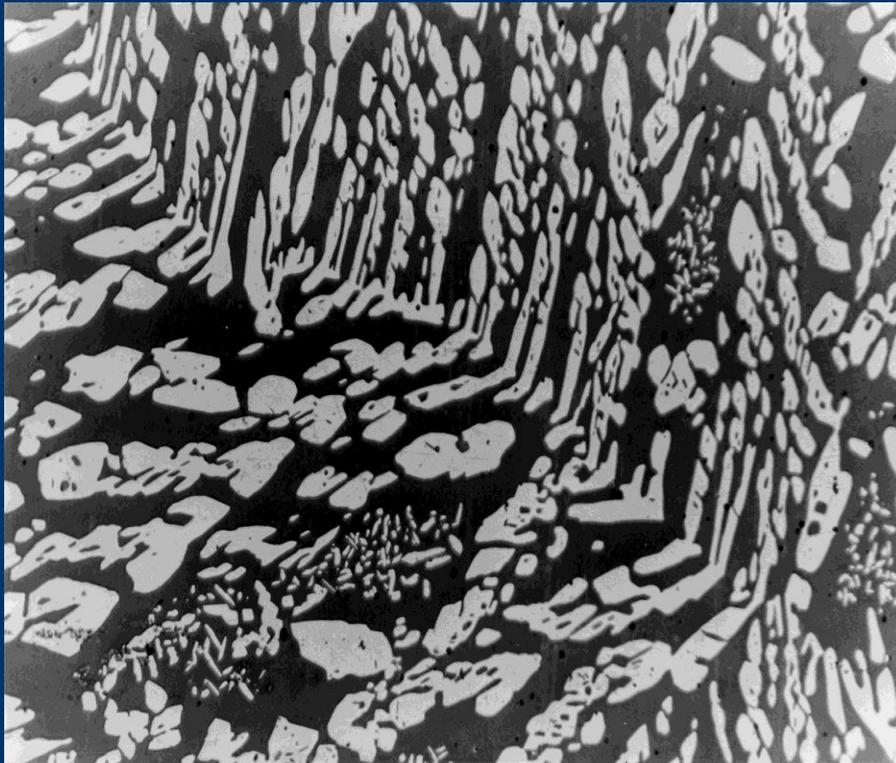


Microestrutrua austenita-ferrita das estruturas bruta de fundição: resfriados dentro do molde de areia aglomerada com resina fenólica-uretânica

Ataque: Behara – 27HRc – 120 X

Fig. 14 – 0% Nb: ferrita α (fase escura) austenita γ (fase branca) e fase eutetóide composta por $\sigma+\gamma^*$ na interface γ/α

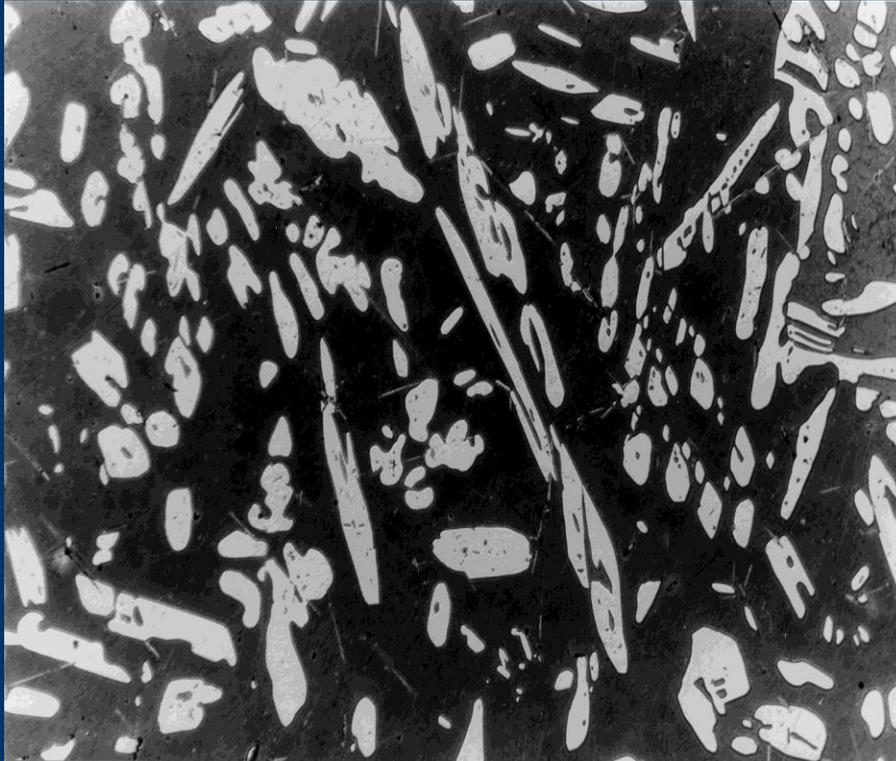
* A decomposição da ferrita é através de uma transformação do tipo eutetóide ($\sigma+\gamma$), em frações iguais de α e γ (secundário)



Microestrutura austenita-ferrita das estruturas após solubilização (1.120°C/30 minutos) resfriamento em água → frações volumétricas similares de austenita e de ferrita são desejáveis

Ataque: Behara – 120 X

Fig. 15 – 0% Nb: ferrita α (fase escura formando a matriz) austenita γ (fase branca formando "ilhas sobre a matriz")

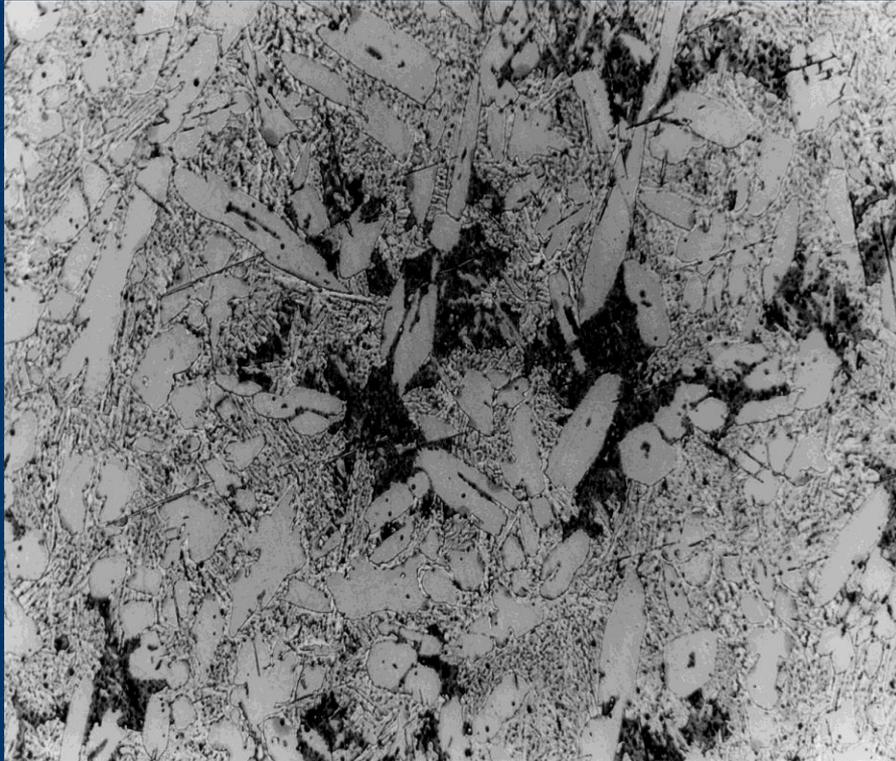


MATERIAL	0% Nb	0,5% NB
% AUSTENITA (γ)	40,9	30,8
% FERRITA (α)	59,1	69,2
PREC. AGULHA*	AUSENTE	PRESENTE

* Fase Laves: Cr_2Nb

Ataque: Behara – 120 X

Fig. 16 – 0,5% Nb: além das fases ferrita e austenita, presença de precipitados em formato de agulha, dispersos na matriz. Observa-se a ausência da fase , porém na amostra contendo Nb, o tratamento de solubilização não consegue dissolver os precipitados em forma de agulha, fase Laves.



MATERIAL	0% Nb	0,5% NB
% AUSTENITA (γ)	59,23	36,0
% FERRITA (α)	35,3	14,8
% SIGMA (σ)*	5,5	49,2

*incluindo austenita secundária

Ataque: Behara – 41 HRc - 120 X

Fig. 17 – 0,5% Nb: mesmas fases, porém com maior quantidade da fase eutetóide, e presença de precipitados em forma de agulhas.

Referências Bibliográficas

CANALE, L.C.F; ROLLO, J.M.D.A. Aços inoxidáveis de transformação controlada. *Metalurgia e Materiais*, São Paulo, SP, v. 49, n. 413, p. 23-27, 1993.

ITMAN FILHO, A; SILVA, R. V; TARPANI, J.R; ROLLO, J.M.D.A. The niobium effect on the SEW 410 Nr. 14517 stainless steel mechanical properties. In: PROCEEDINGS OF XIX CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE MICROSCOPIA E MICROANÁLISE, 2003. Caxambu. CD-ROM.

RODRIGUES, C. A. D; ENOKIBARA, F; LEIVA, T.P; NUNES, I.A.; ROLLO, J.M.D.A. Estudo do aço inoxidável martensítico usado na confecção de ferramentais cirúrgico. 62º Congresso anual da abm, Vitória/ES, 2007.

RODRIGUES, C. A. D; LORENZO, P. L. D; SOKOLOWSKI, A; BARBOSA, C. A; ROLLO, J.M.D.A. Titanium and molybdenum content in supermartensitic stainless steel. *Materials Science & Engineering A*, v. 460-461, p. 149-152, 2007. Available online at: <<http://www.elsevier.com/locate/msea>>.

ROLLO, J.M.D.A . Processo de fabricação de fios inoxidáveis duplex para aplicação em ortodontia. *Revista de Propriedade Industrial RPI* n 1799 de 28/06/2005, v. 1, 2005.

ROLLO, J.M.D.A BUTTIGNON, I.C.; LORENZO, P.L. O emprego do berílio em aços inoxidáveis austeníticos da série 300. *Metalurgia e Materiais - ABM*, São Paulo, SP, v. 51, n. 447, p. 952-954, 1995. Qualis C. Área de Avaliação: Engenharias IV / Multidisciplinar. ISSN: 0104-0898.

ROLLO, J.M.D.A. Uma nova liga para prótese. *Revista Gaúcha de Odontologia*, v. 40, n. 1, p. 49-51, 1992. Qualis A. Área de Avaliação: Engenharias II / Multidisciplinar. ISSN: 0034-9542.



ROLLO, J.M.D.A. Aço inoxidável liga didática. *Revista Odontólogo Moderno*, São Paulo, SP, v. XVII, n. 6, p. 6-8, 1990.

ROSSITTI, S.M; ROLLO J.M.D.A. Precipitação de fases em aço inoxidável duplex fundido contendo nióbio. *Metalurgia & Materiais*, São Paulo, SP, v. 54, n. 477, p. 293-302, 1998.

PADILHA, A. F; PLAUT, R. L. RIOS, P. R. Stainles steel heat treatment. *Metallurgy and Technologies*. Cap. 12, pags. 695-696, 2007.

SOUZA, E. C; ROSSITI, S; ROLLO, J.M.D.A. Estudo da corrosão por pite em aços inoxidáveis duplex com vários teores de ferrita em meio contendo íons cloreto em diferentes temperaturas. 62° Congresso anual da abm, Vitória/ES, 2007.