

MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES DE UM AÇO RÁPIDO SINTERIZADO

ODÍLIA C.S. RIBEIRO⁽¹⁾

FRANCISCO AMBROZIO FILHO⁽²⁾

M. M. OLIVEIRA⁽³⁾

RESUMO

Este trabalho apresenta resultados de sinterização a vácuo e tratamentos térmicos de um aço rápido, com a seguinte composição:

C + 2,01; Cr = 4,10; V = 4,40; W = 11,40; Mo = 11,50 Co = 11,80

O pó utilizado foi obtido por atomização à água e a compactação das amostras feitas por prensagem uniaxial com pressão de 830 MPa. A sinterização foi realizada em temperaturas de 1180 a 1260°C por 60 minutos. Através da determinação das densidades e microestrutura do sinterizado, foi selecionada a temperatura mais adequada para sinterização desta liga. Utilizou-se os seguintes parâmetros no tratamento térmico deste aço: i) austenitização a 1150°C e 1200°C em banho de sal seguido de têmpera em óleo; ii) revenimentos triplos de 60 minutos em diferentes temperaturas (450 a 560°C); iii) levantamento das curvas relacionando-se temperatura versus dureza vickers. Através das curvas de revenimento selecionou-se as temperaturas de 525 e 560°C para determinação das propriedades mecânicas por ensaio de flexão em três pntos (TRS). Este foi efetuado de acordo com a norma ASTM B 528-76 e ASTM B-399-81. Caracterizou-se também as amostras por microscopia ótica e eletrônica de varredura. Os resultados mostraram que a liga obtida possui propriedades típicas para ser utilizada em ferramenta de corte e desgaste.

-
- (1) Membro da ABM - Bacharel em Química - Coord. de Eng. e Ciência dos Materiais, IPEN-CNEN/SP.
 - (2) Membro da ABM - Doutor em Eng.^a Metalúrgica - Coord. de Eng. e Ciência dos Materiais - IPEN-CNEN/SP.
 - (3) Pesquisadora - Chefe do Depto. de Tecnologia dos Materiais - Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial (LNATI), Portugal.

I. INTRODUÇÃO

Aços rápidos são aços ferramenta com elevados teores de elementos de liga, que, devido as suas características, concedem a eles alta resistência ao desgaste durante operações de corte. Os aços rápidos convencionais produzidos por lingotamento seguido de conformação mecânica apresentam segregações de carbonetos e heterogeneidades que faz com que em peças de maiores secções sejam necessárias grandes reduções durante o trabalho a quente resultando baixo rendimento do processo (1).

Os aços rápidos produzidos pela técnica de metalurgia do pó não apresentam esse problema, além de possuírem carbonetos mais finos com dispersão mais uniforme na matriz. Isto melhora a usinagem e evitam distorções provenientes dos tratamentos térmicos realizados na ferramenta em fase final de acabamento. Esta técnica permite também a introdução de composições com maiores quantidades de carbonetos na microestrutura do aço rápido. Outra vantagem é a redução dos custos de produção devido a diminuição de passos até a obtenção da ferramenta ou componente acabados (2).

A técnica de "compactação na forma quase definitiva" utiliza a compactação a frio e sinterização a vácuo de pó recozido e atomizado a água. A sinterização se dá na presença de fase líquida e é realizada em temperaturas entre 1220°C e 1300°C, dependendo da composição química do aço e tempo em torno de 60 minutos obtendo-se densidades acima de 98% da densidade teórica. Neste processo o problema é que a faixa de temperatura permitida durante sua execução é bastante reduzida entre o limite mínimo para ocorrer a densificação, e o máximo, onde não haja um crescimento excessivo de grão e de carbonetos (3).

Os aços rápidos convencionais são tratados termicamente após conformação mecânica (têmpera e revenido) e os fabricados pela metalurgia do pó devem ser submetidos a esses mesmos tratamentos. Os ciclos desses tratamentos são estabelecidos para cada composição química e método de fabricação.

A microestrutura dos aços rápidos comerciais, normalmente contém uma matriz de martensita revenida e carbonetos dispersos, sendo esses carbonetos do tipo MC, cujos elementos principais são vanádio, titânio e nióbio e, MeC constituído principalmente por Mo, W e Fe.

Este trabalho apresenta os resultados de fabricação por compactação, sinterização à vácuo e determinação de tratamento térmico de um aço rápido com a seguinte composição:

C = 2,01; Cr = 4,10; V = 4,40; W = 11,40; Mo = 11,50; Co = 11,80

Esta liga pode ser utilizada para produção de ferramentas para prensagem de cerâmicos, ferramentas de corte compactadas na forma quase definitiva, componentes para máquinas da indústria têxtil, etc. Sua fabricação somente é viável pela técnica da metalurgia do pó devido a alta concentração de elementos de liga presentes, os quais formam grande concentração de fases duras na matriz.

METODOLOGIA

A sequência de procedimento utilizado neste trabalho é apresentada no fluxograma da Fig. 1 com indicação dos parâmetros utilizados.

De acordo com o fluxograma da Fig. 1 os pós foram obtidos por atomização a água em atomizador com capacidade para produção de 6 -

8 kg de pó. A fusão da liga foi feita em forno de indução usando-se ferro-ligas e metais puros. Após atomizado o pó foi seco em estufa a vácuo (80°C/6h) e, por peneiramento, separou-se a fração menor que 125µm pra utilização em todo o processamento posterior (81% em peso do pó atomizado). As temperaturas de transformações alotrópicas do aço (alfa e gama) foram determinadas pelo ensaio dilatométrico que estabeleceu a temperatura de recozimento a vácuo do pó em 900°C durante 3 horas. O resfriamento foi realizado com velocidade de 3°C/minuto até 600°C, sendo o forno desligado nesta temperatura. Após recozido, o pó foi desagregado e repassado na peneira 125µm. A composição química e características físicas do pó nesta etapa são apresentadas na Tabela I e II.

TABELA I - Composição química do pó recozido (%).

C	S	P	O	N	Si	Mn	Cr
2,01	0,037	0,011	0,017	0,023	0,30	0,16	4,10
W	Mo	V	Co	Cu	Zn	Ni	Al
11,4	11,5	4,40	11,8	0,12	0,001	0,10	0,07

TABELA II - Características físicas do pó recozido ($<125\mu\text{m}$).

Distribuição granulométrica (μm)	
-125 + 90	47%
- 90 + 63	24,4%
- 63 + 45	16,3%
- 45 + 36	7,6%
- 36	4,7%
Densidade aparente (g/cm^3)	1,9
Densidade batida (g/cm^3)	2,55
Escoabilidade (50g/seg)	53
Microdureza HV ₍₀₁₉₎	337
Área específica (g/cm^2)	0,876
Diâmetro fisher (μm)	9,05

A pressão de compactação foi determinada através da curva de compressibilidade do pó recozido, relacionando-se pressão em função da densidade a verde medida geometricamente. A Fig. 2 apresenta a curva de compressibilidade do pó recozido. Selecionou-se a pressão de 830 MPa e a compactação foi efetuada em prensa hidráulica unidirecional.

A sinterabilidade em fase líquida foi estudada na liga básica e com adições de 0,1 e 0,2% carbono, em forma de grafite. Determinou-se as curvas de sinterização relacionando-se temperatura e densidades obtidas (método arquimedes). Variou-se as temperaturas entre 1180 e 1260°C, sendo o tempo fixado em 60 minutos. Utilizou-se sempre o mesmo ciclo de aquecimento durante as operações de sinterização, conforme Fig. 3.

Os tratamentos térmicos de austenização e revenido triplo foram realizados na liga básica, sinterizada a 1240°C. As

temperaturas de austenização para têmpera foram 1150°C e 1200°C. A sequência de aquecimento foi: pré-aquecimento a 550°C por 13 minutos, imersão em banho de sal por 1 minuto na temperatura de tratamento, imersão em óleo e resfriamento até a temperatura ambiente. Determinou-se a curva de revenido para revenimentos triplos de 60 minutos entre 450 e 560°C. As amostras foram revenidas em forno mufla e determinadas as microdurezas Vickers após tratamento.

Após determinação das curvas de revenido, relacionando-se temperatura versus dureza, selecionou-se as temperaturas para revenimento em seis corpos de prova tratados e selecionados para o ensaio de flexão em três pontos (Ensaio de Resistência à Ruptura transversal). Este ensaio seguiu as Normas ASTM B 528-76 e ASTM B 399-82.

Caracterizou-se as amostras em todas as etapas do processamento por microscopia ótica e eletrônica de varredura e determinação de dureza vickers, onde utilizou-se carga de 30 kg, ampliação de 140x e identificações em três pontos da amostra. O ataque das amostras para metalografia foi feito com Nital 5%.

III - RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela III e Fig. 4 apresentam os resultados de dureza encontrados na sinterização nas diferentes temperaturas. Estes resultados mostram que o aumento de temperatura provocou um aumento rápido na densidade até atingir um valor da ordem de 98% da densidade teórica e se mantém neste nível. A adição de carbono provocou uma diminuição na temperatura de início do patamar de sinterização. Para o pó sem adição de carbono o início foi à 1230°C

e para os pós com adição de 0,1 e 0,2% o início foi a 1220 e 1210°C respectivamente. Este resultado era esperado, pois, o aumento do teor de carbono diminui a temperatura de formação da fase líquida o que deve acelerar a densificação. Nestas temperaturas indicadas o material atinge praticamente o valor máximo de densidade.

**TABELA III- Densidades e durezas obtidas na sinterização.
(Temperatura: 1180-1260°C).**

Temperatura de sinterização (°C)	Sem adição de C		Adição de 0,1%C		Adição de 0,2%C	
	densidade (g/cm ³)	dureza (Hv30)	densidade	Hv30	densidade	Hv30
1180°C	6,43	233	6,80	228	7,0	256
1200°C	6,97	328	6,06	589	6,20	594
1210°C	6,03	567	6,41	709	6,47	722
1220°C	6,40	676	6,52	716	6,48	631
1230°C	6,56	707	6,55	703	6,39	615
1240°C	6,56	697	6,46	672	6,37	593
1250°C	6,52	697	6,46	684	6,40	529
1260°C	6,51	670	6,50	684	6,35	642

Verifica-se também pelos resultados da tabela III e Fig. 4 que a dureza dos sinterizados também cresce com o aumento da temperatura de sinterização, de maneira similar a densificação. No entanto nota-se um decréscimo desta dureza após se atingir o máximo que é maior para teores maiores de carbono adicionado.. Este decréscimo de dureza deve estar associado a mudanças microestruturais no sinterizado. É visível um aumento do tamanho

dos carbonetos a medida que se aumenta o teor de carbono adicionado, para uma mesma temperatura de sinterização. Além disto o aumento do tamanho de carboneto é mais rápido quando se aumenta a temperatura, nas amostras com porcentagens mais altas de carbono. Isto por si só explica uma queda na dureza, mas pode haver também diferenças não visíveis na matriz.

Estes fatos microestruturais descritos acima podem ser observados nas Figs. 5 e 6 onde são apresentadas microscopias eletrônicas de varredura. A Fig. 5 apresenta a evolução de microestrutura para a liga sem adição de carbono em função da temperatura de sinterização. Nota-se nas baixas temperaturas a existência de porosidade enquanto que nas maiores temperaturas é visível a formação de eutéticos devido a grande quantidade de líquido formado. Esta evolução de microestrutura confirma os resultados de medidas de densidades. Esta sequência mostra ainda o crescimento do tamanho do carboneto com o aumento da temperatura. Nestas microestruturas tem-se uma matriz e carbonetos tipo MC (fase mais escura e mais arredondada) e tipo M₆C (fase clara e mais alongada). Na sinterização com a adição de carbono tem-se evolução semelhante, sendo que a densificação e aumento do tamanho de carbonetos ocorre em temperaturas menores.

A Fig. 6 apresenta microestruturas eletrônicas de varredura de sinterizados nas mesmas temperaturas com diferentes adições de carbono. Esta figura mostra que numa mesma temperatura de sinterização a adição de carbono aumenta o tamanho do carboneto.

Se por um lado a densificação estabelece a temperatura mínima de sinterização, o tamanho de carbonetos e a presença de eutéticos na microestrutura limita a temperatura máxima de sinterização. Tendo em vista estes fatos estabeleceu-se como temperaturas de

sinterização 1240°C para o aço sem adição de carbono, 1230°C para o aço com adição de 0,1% e 1220°C para o aço com adição de 0,2% de carbono.

As amostras sinterizadas nestas condições tem aproximadamente a mesma microestrutura conforme apresenta a Fig. 7.

Após tempera a amostras apresentaram as seguintes medidas de dureza:

têmpera a 1150°C = 890 Hv₉₀.

têmpera a 1200°C = 790 Hv₉₀.

TABELA IV - Durezas em função da temperatura de austenitização e revenido.

Temperatura de Revenido(°C)	1° Revenido		2° Revenido		3° Revenido	
	Dureza (Hv ₉₀)		Dureza (Hv ₉₀)		Dureza (Hv ₉₀)	
	A=1150°C	A=1200°C	A=1150°C	A=1200°C	A=1150°C	A=1200°C
450	987	871	994	901	1085	1014
465	1067	1037	1098	1108	1109	1128
475	1074	1060	1110	1120	1109	1148
485	1082	1063	1106	1103	1094	1120
500	1010	1036	1051	1060	1039	1037
525	1030	1054	1085	1051	1025	1051
550	985	1002	1031	1052	1016	1057
560	950	977	954	993	950	958

A tabela IV apresenta os resultados de dureza em função das temperaturas de têmpera e revenido. As curvas de revenido são apresentadas na Fig. 8. As microestruturas de tratamentos térmicos

são apresentadas na Fig. 9. No estado temperado tem-se os carbonetos (MC e M₆C) dispersos numa matriz de martensita contendo austenita retida. No estado revenido a matriz se torna totalmente martensita revenida mostrando ainda alguns carbonetos secundários.

TABELA V - Resultados dos ensaios de ruptura transversal.

Temperatura de tratamento	n° amostras	TRS (MPa)	Hv _{0.05}
$\theta\gamma = 1150^{\circ}\text{C}$ $\theta R = 525^{\circ}\text{C}$	6	1782 ± 42	1025 ± 12
$\theta\gamma = 1150^{\circ}\text{C}$ $\theta R = 560^{\circ}\text{C}$	6	1878 ± 50	950 ± 16
$\theta\gamma = 1200^{\circ}\text{C}$ $\theta R = 525^{\circ}\text{C}$	6	1452 ± 160	1040 ± 08
$\theta\gamma = 1200^{\circ}\text{C}$ $\theta R = 560^{\circ}\text{C}$	5	1594 ± 66	927 ± 08

A tabela V apresenta os resultados dos ensaios de ruptura transversal com flexão em três pontos e as respectivas durezas.

Estes resultados mostram que a dureza tem uma certa relação com a resistência à flexão ou seja quanto maior a dureza menor a resistência para mesma temperatura de austenização. No entanto verifica-se também uma forte influência nas temperaturas de austenização utilizadas para têmpera. Os maiores valores encontrados foram para temperaturas de austenização mais baixas

(1150°C), recomendando-se então estas temperaturas baixas para austenização destes aços. Pode-se utilizar estes resultados para seleccionar a temperatura do revenido em função da aplicação. Em aplicações onde se requer maior resistência ao desgaste utiliza-se temperaturas onde se obtem maior dureza e quando requer-se melhor tenacidade utiliza-se temperaturas que forneçam menor dureza.

Quando se compara estas propriedades com as da literatura (4) verifica-se que este aço rápido pode ter durezas mais altas e resistência a flexão menores que outros aços rápidos com menor quantidade de carbonetos, devendo ter maior resistência ao desgaste, porém mais frágeis.

IV - CONCLUSÕES

1. As condições de processamento para fabricação de um aço rápido via sinterização a vácuo de composição:

C = 2,01; Cr = 4,10; V = 4,40; W = 11,40; Mo = 11,50; Co = 11,80
com alta densidade são:

- granulometria do pó <125µm
- recozimento a vácuo 900°C
- Compactação: 830 MPa (unidirecional)
- Sinterização: 1240°C - sem adição de carbono
1230°C - com adição de 0,1% de carbono
1220°C - com adição de 0,2% de carbono
- austenitização: 1150°C/1 minuto - (banho de sal)
- revenido (3 x 60) (escolher a temperatura na curva em função da aplicação).

2. O aço rápido sinterizado a 1240°C, austenizado a 1150°C e revenido a 525°C e 560°C apresentou durezas de 1025 Hv e 950 Hv com resistência à ruptura transversal de 1782 e 1875 MPa, respectivamente.

A seleção das condições de tratamento térmico deve ser feita em função das propriedades desejadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Hoyle - G - "High speed steels" - Butter worths, Cambridge, 1988.
2. Pinonow, K.E., Stasko - "P/M Tool Steels" in Metals Handbook A.S.M. v.1, 1990 - pg. 780-791.
3. Arnhold, Wähling, R.. High performance components produced via vacuum sintering. "Modern developments in Powder Metallurgy", V.21 - MPIF - 1988, pg. 183-195.
4. Beiss, P. Wähling, R. - Toughness comparison between vacuum sintered plus forged PMS T15 and conventional tool steels.

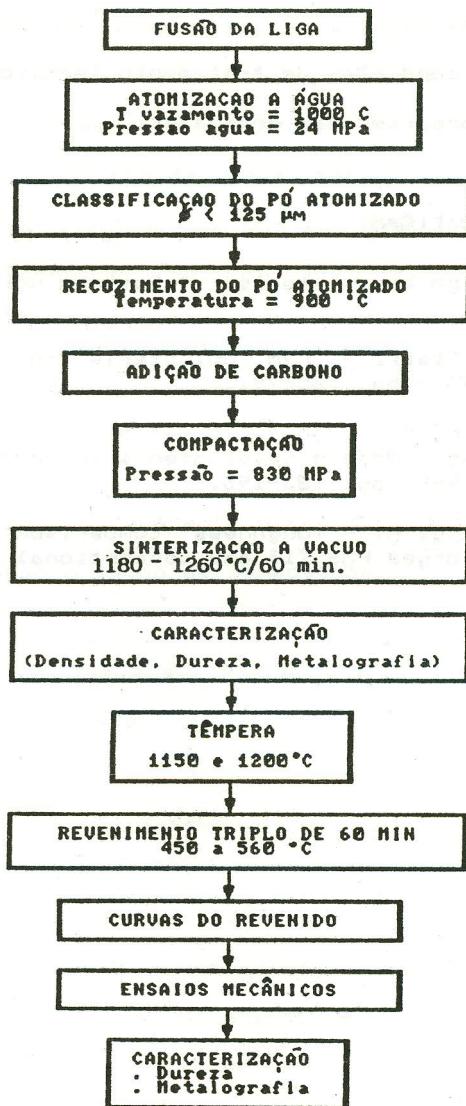


FIGURA 1. Fluxograma do processamento utilizado.

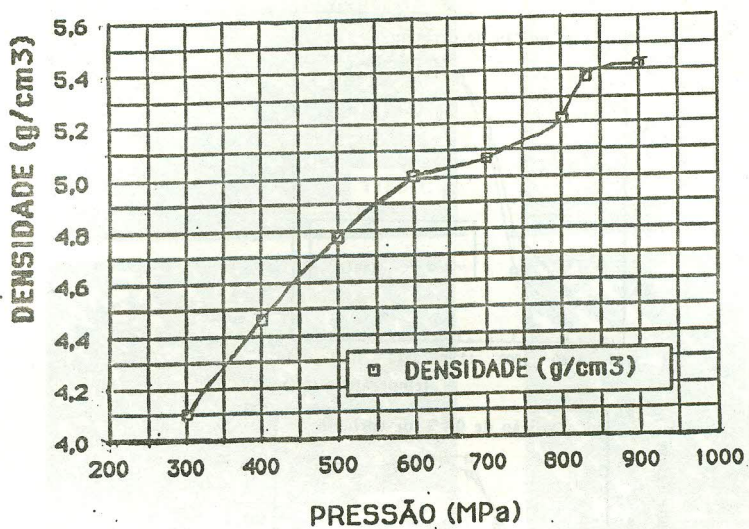


FIGURA 2. Curva de compressibilidade.

CICLO DE SINTERIZAÇÃO

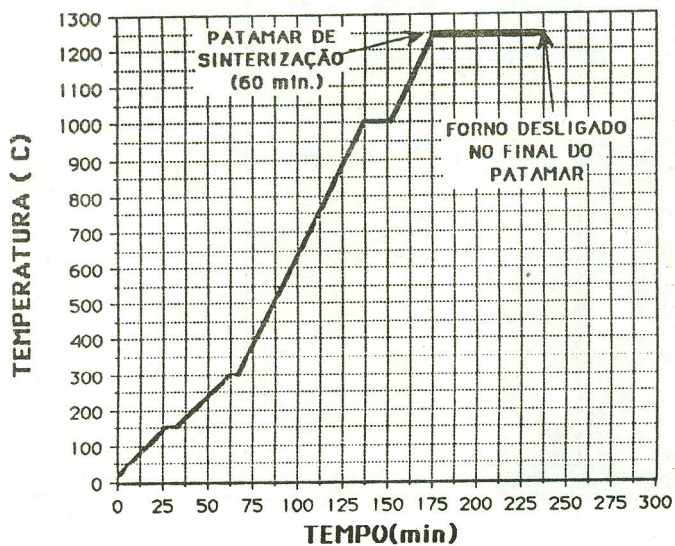


FIGURA 3. Ciclo térmico de sinterização.

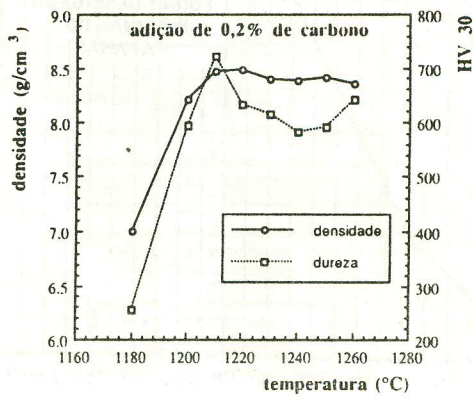
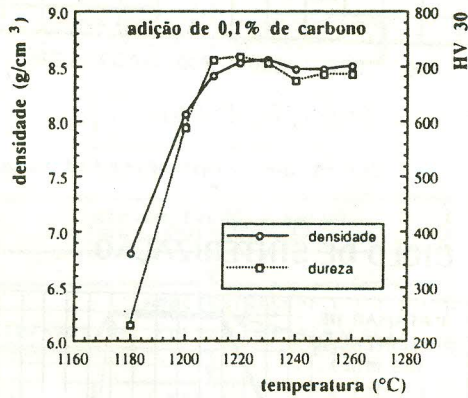
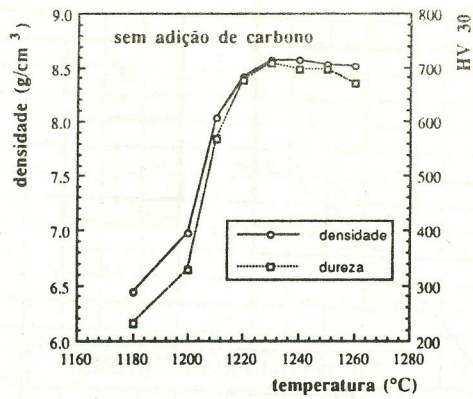


FIGURA 4. Curvas de densidade e dureza em função da temperatura.

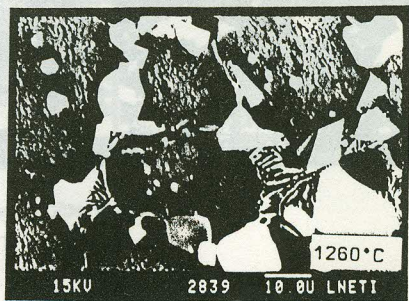
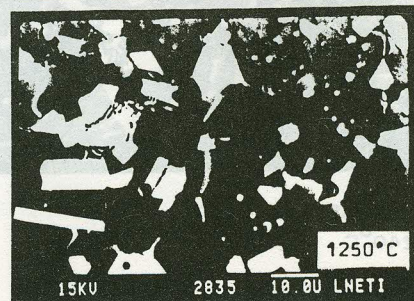
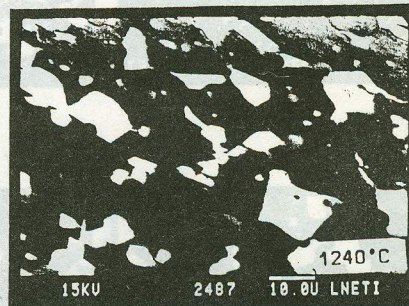
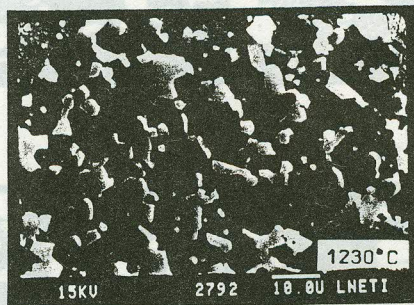
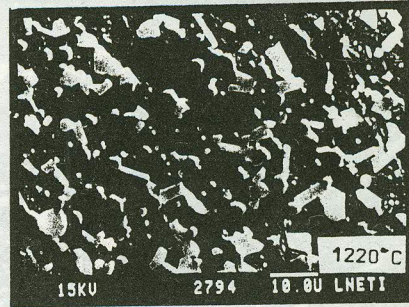
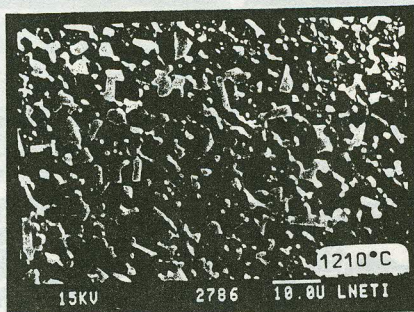
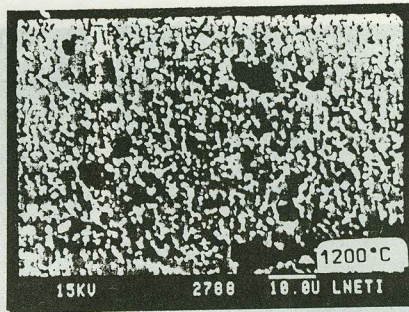
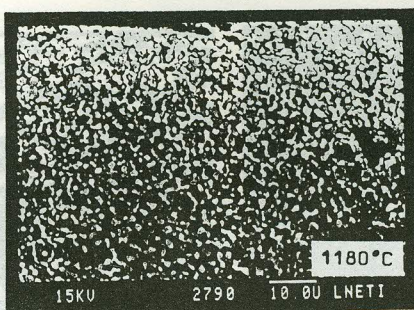
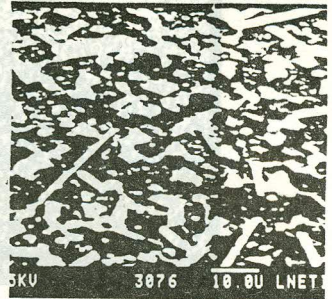
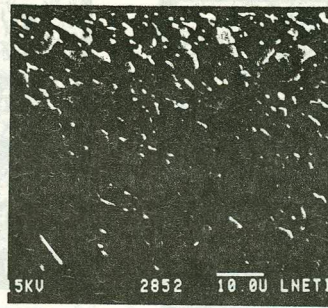
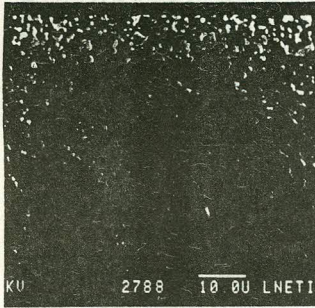


FIGURA 5. Evolução da microestrutura em função da temperatura de sinterização para liga de composição básica (sem adição de carbono). (MEV).

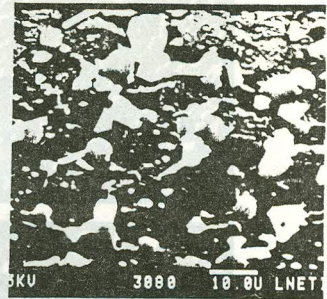
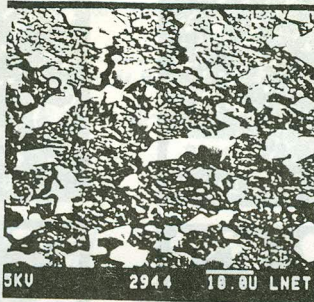
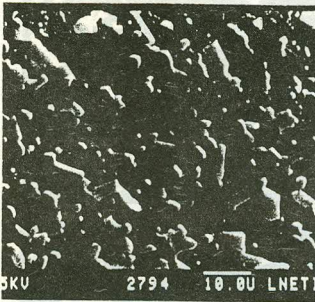
sem adição de C

com 0,1% de C

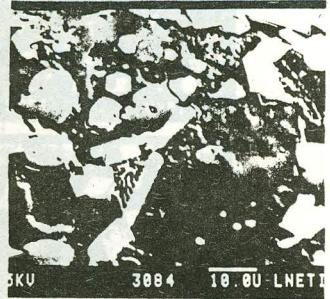
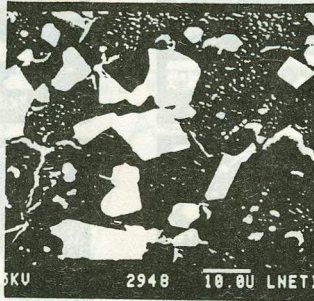
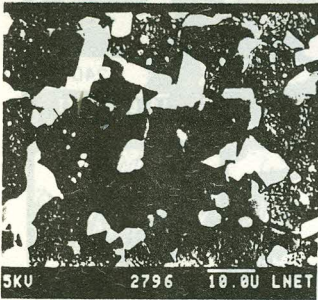
com 0,2% de C



T = 1200°C

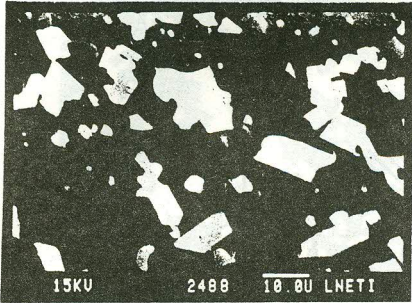


T = 1220°C

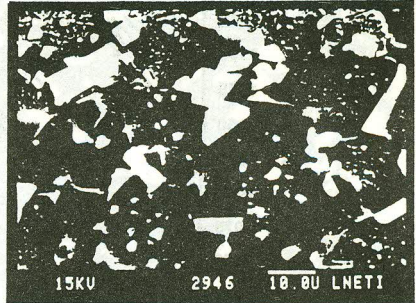


T = 1240°C

FIGURA 6. Evolução da microestrutura em função das adições de carbono e da temperatura de sinterização. (MEV).



(a) T = 1240°C sem adição de C



(b) T = 1230°C - com 0,1% C



(c) T = 1220°C - com 0,2% C.

FIGURA 7. Microestrutura das amostras sinterizadas. (MEV).

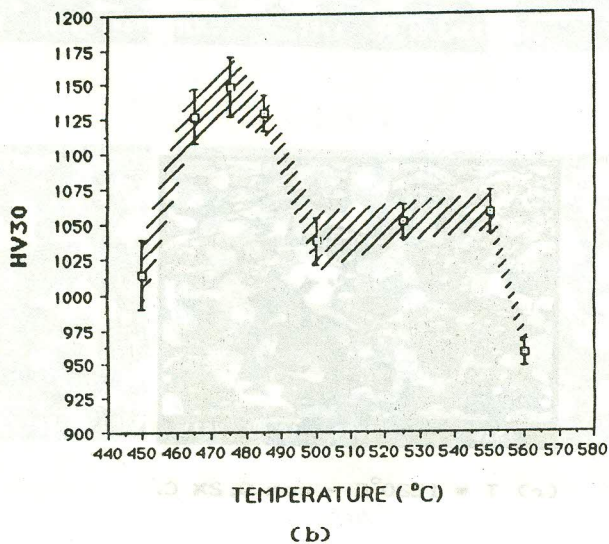
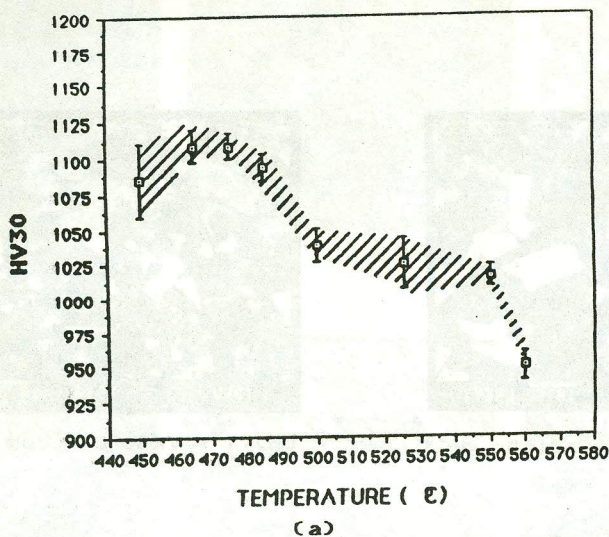
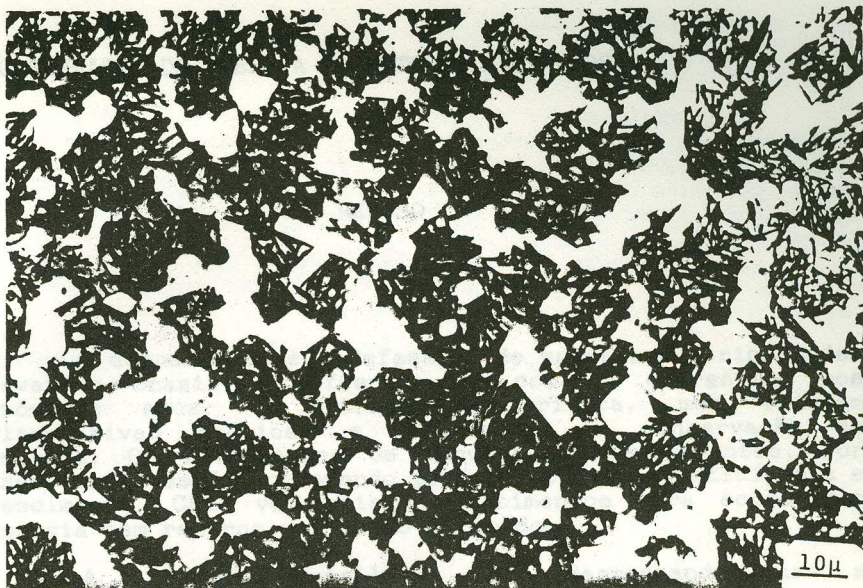
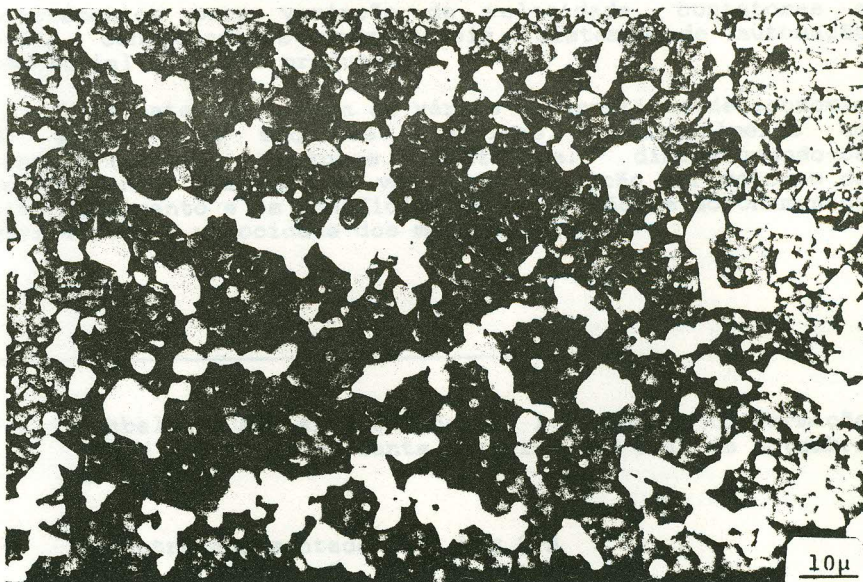


FIGURA 8. Curvas de revenido.
Austenitização: (a) 1150°C - (b) 1200°C.



(a)



(b)

**FIGURA 9. Microestrutura ótica do aço tratado termicamente.
(a) temperado 1150°C
(b) temperado 1150°C e revenido 525°C**