

# INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS NAS PROPRIEDADES DE AÇOS RÁPIDOS SINTERIZADOS AISI-T15

Francisco Ambrózio Filho, Odília Cordeiro de Souza Ribeiro, Maurício David M. das  
Neves Luis Filipe C. Pedroso de Lima

IPEN-CNEN/SP  
TRAVESSA R. 400 SP/SP-BRASIL  
CEP: 05422-970, Caixa Postal 11049, FAX: 55-11-8169370

## SUMÁRIO

Neste trabalho são apresentados resultados de propriedades mecânicas para aços rápidos AISI T-15, preparados por sinterização em fase líquida ou compactados isostaticamente a quente. Os aços sinterizados em fase líquida supersolidus foram preparados por compactação unidirecional de pós e sinterização a vácuo, enquanto os compactados isostaticamente a quente são comerciais. Efetuou-se tratamentos térmicos variando-se as temperaturas de solubilização para têmpera e de triplo revenimento. Determinou-se a dureza e a tensão de ruptura transversal pelo ensaio de flexão em três pontos.

Os resultados indicam que uma redução na temperatura de solubilização para têmpera diminui a dureza e aumenta a tenacidade do material. Compara-se e discute-se as propriedades obtidas em função do método de fabricação e do tratamento térmico.

## ABSTRACT

Mechanical properties of AISI T-15 high speed steels prepared either by liquid phase sintering or hot isostatic processing are presented. The supersolidus liquid phase sintered steels were prepared by powder compacting and vacuum sintering. The hot isostatic pressing steels used were commercial ones. Heat treating were performed at various quench and triple temper temperatures. Hardness (HRC) and transverse rupture strength by three point bend testing were determined. Results show that lower quench temperatures decrease the hardness and increase material toughness. The mechanical properties are compared and discussed as a function of the fabrication method and heat treating.

## INTRODUÇÃO

Aços rápidos normalizados AISI T-15 são normalmente produzidos por técnicas de metalurgia do pó. Dentre as rotas de fabricação que utilizam esta tecnologia duas das mais difundidas são: a prensagem isostática a quente e a sinterização com fase líquida. A primeira utiliza pós de aço rápido atomizado com gás inerte e prensados isostaticamente a quente, em temperatura e pressão da ordem de  $1100^{\circ}\text{C}$  e  $100\text{ MPa}$ , respectivamente. Na segunda técnica, os pós são atomizados a água e compactados em prensas uniaxiais ou isostáticas e posteriormente sinterizados, sob vácuo ou em atmosfera protetora, nas temperaturas da ordem de  $(1260 \pm 15)^{\circ}\text{C}$ , onde ocorre a formação de fase líquida [2]. Normalmente, a faixa de temperatura de sinterização nos aços rápidos é muito estreita, o que dificulta sua operacionalidade [3].

Os aços sinterizados são tratados termicamente de maneira análoga aos aços produzidos convencionalmente por fundição, lingotamento e conformação, ou seja, por aquecimento e triplo revenimento. Os sinterizados tendem a responder mais rapidamente e com melhor previsibilidade aos tratamentos térmicos, devido sua microestrutura mais refinada e uniforme. Nos tratamentos térmicos, independentemente das sequências de aquecimento ocorrem os processos: dissolução de carbonetos, precipitação de carbonetos pró-eutetóides, transformação da austenita para martensita e precipitação de carbonetos na martensita.

A microestrutura do aço prensado isostaticamente é mais refinada, apresentando carbonetos pequenos ( $\leq 3\ \mu\text{m}$ ) e arredondados [4], enquanto na sinterização em fase

líquida os carbonetos são maiores ( $\leq 10\mu\text{m}$ ) e irregulares [ 5 ]. Devido às distintas características microestruturais ocorrem diferenças entre suas propriedades [ 6, 7 ].

Analisando-se economicamente a técnica de sinterização na presença de fases líquidas, esta apresenta menor custo, permitindo a obtenção de formas mais próximas da definitiva ("Near Net Shape"). Assim, ao se verificar as possibilidades de aplicações para os aços sinterizados deve ser efetuada uma análise custo-benefício.

Neste trabalho são comparados aços AISI T-15 comercial prensado isostaticamente a quente e os obtidos em laboratório, que sofreram sinterização a vacuo. Apresentam-se suas microestruturas e os resultados de dureza e tensão de ruptura transversal, através do ensaio de flexão em três pontos, para diferentes condições de tratamento térmico.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

As composições dos aços sinterizados a vacuo (SV) e os compactado isostaticamente a quente (CIQ) são apresentadas na tabela 1. Os pós SV foram atomizados a água e granulometria  $< 150\mu\text{m}$ . O T-15 comercial foi fornecido em barras recozidas processadas por CIQ, cujos pós foram atomizados a gás.

As amostras SV foram obtidas por prensagem uniaxial com 800 MPa sinterizadas a 1275 °C, durante 3600s. Posteriormente, as densidades foram estimadas

pele método hidrostático. Para o tratamento térmico as amostras para as duas frequências de processamento foram confeccionadas nas dimensões requeridas para o ensaio de flexão em 3 pontos, segundo a norma ASTM B 528-76.

Tabela 1: Composição química dos pós ( % peso)

	C	Mn	Si	Cr	V	W	Co	Mo
1-15 (CIQ)	1,45	0,17	0,40	4,57	4,39	11,40	4,59	0,69
1-15 (SV)	1,60	0,30	0,30	4,00	4,90	12,00	5,00	-

Os tratamentos térmicos de tempera (austenitização) foram realizados a 1170°C, 1190°C e 1210°C e triplo revenimento, em banho de sal, por 3 X 3600s a 540°C e 560°C. Após os tratamentos térmicos as amostras foram retificadas, determinaram-se as durezas Rockwell "C" e a resistência à ruptura transversal em três pontos. Os resultados obtidos representaram a média de duas amostras utilizadas para cada condição de tratamento térmico.

A caracterização microestrutural das amostras tratadas termicamente foi realizada por microscopias ótica e eletrônica de varredura. O tamanho e a frequência de distribuição dos carbonetos foram quantificados através de um analisador de imagem. O analisador está acoplado a um microscópio ótico tendo sido ajustado para

medições de partículas superiores a  $1,10 \mu\text{m}$ . O tamanho de grão foi estimado pelo método de Snyder Graff e converteu-se este valor para microns.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As densidades das amostras apresentaram para os processos SV e CIQ os valores de  $(8,10 \pm 0,09) \text{ g/cm}^3$  e  $(8,18 \pm 0,02) \text{ g/cm}^3$ , respectivamente. Conforme esperado, as densidades das amostras CIQ apresentaram valores superiores, em consequência da maior eficiência deste processo na eliminação dos poros.

As figuras 1 e 2 apresentaram micrografias óticas e eletrônica de varredura contendo carbonetos, do tipo MC e  $M_6C$ , numa matriz martensítica revenida, para os aços SV e CIQ. Estas figuras mostram claramente a diferença de tamanho de carbonetos, sendo maiores os SV. Porosidade residual foi observada somente nas amostras SV, conforme os resultados obtidos na determinação das densidades.

A microscopia eletrônica de varredura, figura 2 permite separar através do contraste, os carbonetos do tipo MC (escuro) e  $M_6C$ (claro). Os carbonetos maiores do tipo MC, devido sua baixa solubilidade na austenitização, apresentaram porcentagens superiores aos carbonetos do tipo  $M_6C$  [8].

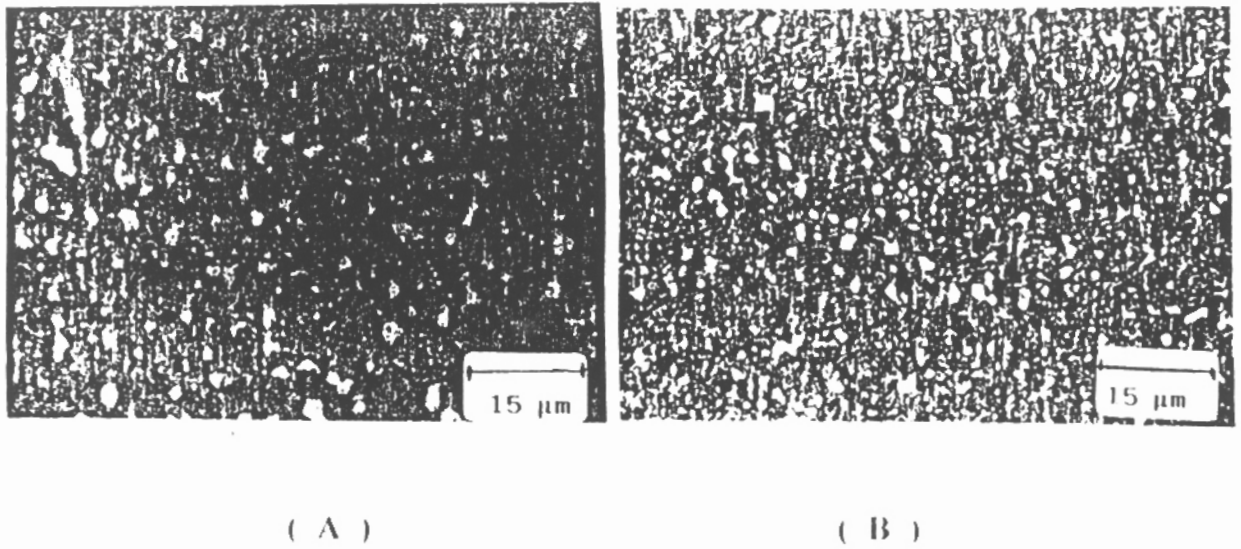


Figura 1: Micrografias óticas do aço T-15 temperado e triplo revenido: A) sinterizado a vácuo (SV) e B) compactado isotaticamente a quente (CIQ)

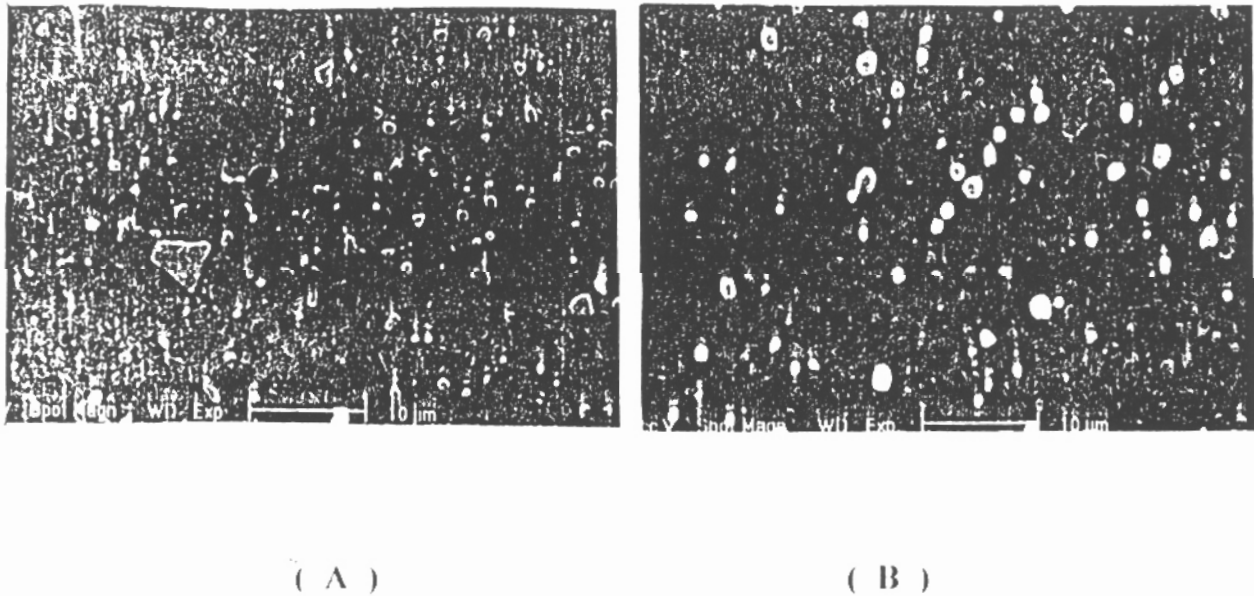


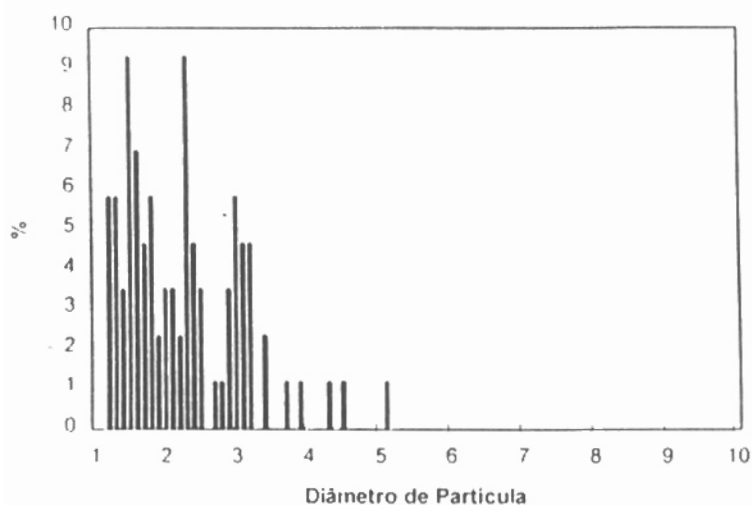
Figura 2: ME-V do aço AISI T-15 temperado e triplo revenido: A) aço sinterizado à vácuo (SV), B) aço compactado isostaticamente a quente (CIQ)

A figura 3 mostra as curvas características para a distribuição de carbonetos para os aços SV e CIQ. A medida destas dimensões não foi completa, pois através das micrografias nota-se a existência de carbonetos com tamanhos inferiores ao limite selecionado no analisador de imagem, que foi de  $1,10\mu\text{m}$ . Um resultado mais preciso seria obtido através da utilização de imagens da microscopia eletrônica de varredura. No entanto estes resultados mostram uma dispersão muito mais acentuada no tamanho dos carbonetos para os aços SV.

Uma análise comparativa pode ser realizada a partir da tabela 2, onde são apresentados os tamanhos médios dos carbonetos para as duas técnicas de processamento, bem como para as temperaturas de têmpera (austenitização). Verifica-se que as amostras SV apresentaram precipitados com tamanho médio maior, superior a 30%, em relação à suas assemelhadas CIQ. O maior tamanho médio originou-se em decorrência das temperaturas superiores utilizadas no processo de SV.

A tabela 2 apresenta também uma comparação entre o tamanho de grão austenítico para as duas formas de processamento. O tamanho de grão nas amostras SV mostrou valores, em torno de 10% superiores, aos seus similares processados por CIQ. Também foi constatado um aumento no tamanho de grão nas amostras austenitizadas à temperatura maiores, independente do processamento.

### A) Distribuição de Carbonetos - SV



### B) Distribuição de Carbonetos - CIQ

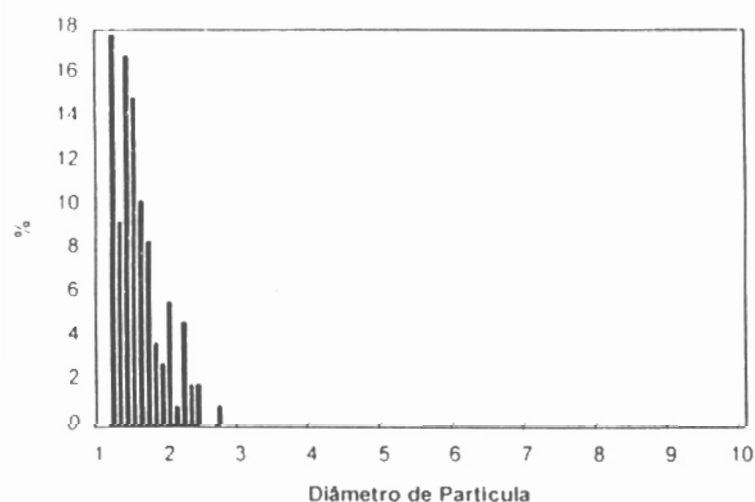


Figura 3: Curvas de distribuição do tamanho de carbonetos ( $>1,10\mu\text{m}$ )

A) curva de frequência para o aço sinterizado à vácuo (SV)

B) curva de frequência para o aço compactado isotaticamente a quente (CIQ).

Labela 2: Tamanhos médios de grão e de precipitados para às temperaturas de austenitização

AUSTENIT [°C]	Tamanho de Grão [ $\mu\text{m}$ ]		$\phi$ médio precipitado [ $\mu\text{m}$ ]	
	SV	CIQ	SV	CIQ
1170	7,2	6,4	(2,20 $\pm$ 0,06)	(1,50 $\pm$ 0,03)
1210	7,7	6,7	(2,00 $\pm$ 0,06)	(1,52 $\pm$ 0,03)

Os resultados das propriedades mecânicas avaliadas neste trabalho, dureza Rockwell C (HRC) e resistência a ruptura transversal são mostradas na tabela 3, para os aços 1-15 CIQ e SV.

A partir da tabela 3 pode-se observar que o aumento da temperatura de tempera (austenitização) provocou um aumento da dureza, para as duas temperaturas de revenimento, 540°C e 560°C, respectivamente. A literatura indica para o aço AISI T-15 as temperaturas de 540°C e 560°C, como o intervalo para se obter a máxima dureza [9]. Normalmente, temperaturas de tempera mais elevadas ocorre uma dissolução de carbonetos mais acentuada, o que deve aumentar a dureza secundária, no revenido.

Tabela 3: Propriedades mecânicas dos aços AISI T-15 em função das temperaturas de austenitização e revenimento

AUSTENITIZ [°C]	REVENIM. [°C]	HRC-SV	HRC-CIQ	TRS-SV [MPa]	TRS-CIQ [MPa]
1170	540	64,6	65,2	2908	3886
	560	64,2	64,9	2797	4200
1190	540	64,9	66,0	2338	3307
	560	64,7	65,2	2917	4400
1210	540	66,4	66,8	1928	3291
	560	66,1	65,2	2750	3500

As durezas obtidas para os aços preparados pelas duas sequências de processamento foram da mesma ordem de grandeza, principalmente, devido a composição química similar, vide tabela 1, e quantidades de carbonetos semelhantes.

Os valores da resistência à flexão apresentaram uma diferença significativa, sendo sempre maiores para as amostras dos aços CIQ, devido ao menor tamanho de grão austenítico, carbonetos menores e finamente distribuídos e microestrutura mais homogênea. Alguns autores [10, 11] consideram a resistência à flexão como uma indicação da tenacidade, portanto concluiu-se que amostras CIQ tiveram maior tenacidade.

Outra constatação realizada a partir da tabela 3 foi a maior consistência nos resultados da resistência à flexão das amostras processadas por CIQ, ou seja com microestrutura mais uniforme, pode-se relacionar a dureza com a resistência a ruptura transversal. Assim, para maiores valores de dureza menor foi a resistência à flexão, portanto, conduzindo a menor tenacidade.

Comportamento similar ocorreu para os aços SV sem que esta tendência tenha sido tão nítida, ou seja, os resultados de resistência à flexão não apresentaram correlação com a dureza. A heterogeneidade microestrutural dos aços SV em termos de carbonetos e a variação da densidade motivada pelos pequenos gradientes de temperatura, durante a sinterização devem ter ocasionados esta dispersão.

A seleção de um dos processos de fabricação pode ser realizada em função da aplicação do material. Em situações que envolvem basicamente, resistência ao desgaste, qualquer uma das duas técnicas pode ser escolhida. Adicionalmente, se a tenacidade também for um requisito, o processo CIQ deve ser o preferido.

#### 4. CONCLUSÕES

Observaram-se diferenças microestruturais entre as amostras sinterizadas à vácuo (SV) e compactadas isostaticamente a quente (CIQ), após o tratamento térmico.

endo que o processamento por CIQ conduziu a microestruturas mais refinadas e com menor dispersão de resultados.

A dureza aumentou com a temperatura de austenitização, independente da técnica de processamento.

As amostras confeccionadas por CIQ apresentaram maior tenacidade e menor dispersão de resultados, em relação às SV.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao técnico Raul Fernando Moscoso Ron pela colaboração na execução deste trabalho, a empresa Hurth Iner Indústria de Máquinas e Ferramentas Ltda pelos tratamentos térmicos e ao Instituto de Estudos Avançados (CIA) pela utilização do forno de sinterização.

### REFERÊNCIAS

1. Hellmann, P.; Larker, H.; Pfeifer, J. B.; Stromblad, I.; - "ASEA/ STORA Process, a New Process for the Manufacture of Tool Steels from powder" - in H. H. Hausner ed. Modern Developments in Powder Metall., V.4, MPI-APMF, Princeton (1971), A 573-582.
2. Bee, J. V.; Brewin, P. R.; Wood, J. V.; - Sintering Mechanisms Vacuum Sintered