



B88207465

INIS-BR-69

50/5/83

	ANAIS 4º. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais	
Deptº. de Engenharia Mecânica - UFSC Dezembro de 1980 Trabalho/Paper Nº... A-21... PP.213-222...		
Patrocínio ABCM - ABM - CNEN - CNPq. - SESU/MEC - UFSC		

INFLUÊNCIA DA PRÉ-DEFORMAÇÃO NA CARACTERIZAÇÃO TOPOLÓGICA
DO INCONEL 600 SUBMETIDO A TRATAMENTOS ISOTÉRMICOS

INIS

Diney Ribeiro Mourão

Tecnólogo em materiais, Instituto Tecnológico da
PUC-RJ, ITUC

Tito Luiz da Silveira

Professor Titular, Faculdade de Engenharia Souza Marques,
FESM-RJ

Edson Monteiro

Professor Associado, Departamento de Engenharia Mecânica,
PUC-RJ

SUMÁRIO - Amostras de INCONEL 600 recristalizadas foram submetidas a diversas pré-deformações por tração uniaxial, e posteriormente tratadas entre 550°C e 790°C durante 3 horas. De cada par "pré-deformação X temperatura" foram determinadas as correspondentes micro-durezas e caracterizada sua microestrutura. Foram levantados diagramas "microdureza" contra "temperatura" para cada pré-deformação, objetivando de terminar a atuação possível desta última no comportamento mecânico e estrutural daquela superliga.

SUMMARY - INCONEL 600 samples were performed at thermal treatment between 550°C and 790°C during 3 hours after uniaxial tension testing. At each pair "hardening-temperature" were determined the microhardness and microstructure. With the objective of to determine the influence of the hardening up to INCONEL's mechanical behavior, were plotted microhardness X temperature.

Introdução

O comportamento termomecânico dos materiais de aplicação industrial em regimes de alta temperatura, por sua crescente importância em termos de segurança e custo, tem sido alvo de estudos nos últimos trinta anos^{1,2}. As superligas à base de Níquel com adições de Cromo, Ferro, Cobalto e Molibdênio têm merecido prioritária recomendação nos casos em que o grau de severidade daquela aplicação resulta maior e mais complexo. Esta posição preferencial é consequência da maior estabilidade dessas superligas comparativamente aos aços austeníticos e aos aços ferríticos da família Cr-Mo naquelas condições.

Contudo, são poucas as referências sobre o comportamento das superligas de Níquel quanto aos efeitos da interação termomecânica na citada estabilidade. Recente trabalho, operado sobre o mesmo INCONEL 600 deste, concluiu sobre a operacionalidade de diversos mecanismos de recuperação e fortalecimento entre 600°C e 1150°C sob tempos de 1 hora a 450 horas³. Do citado trabalho é concluído que as características daquela operacionalidade em termos de comportamento material desfavorecem inúmeras aplicações industriais dependentes de uma taxa de deformação limitada. Naquela oportunidade o material submetido a diversos tratamentos isotérmicos partira de uma condição inicial de encruamento coerente com o estado trefilado, o que constituía uma situação particular do experimento.

No presente estudo o INCONEL 600 foi predeformado a diferentes níveis de encruamento, e as amostras representativas de cada nível foram submetidas a similares condições posteriores de aquecimento e permanência a altas temperaturas, objetivando conhecer a natureza do comprometimento entre o estado estrutural inicial e aquele que se estabelece por conta de mecanismos termicamente ativados.

Técnica Experimental

A composição química do material utilizado é apresentada na Tabela I, e sua forma inicial era do tipo barras com

11mm de diâmetro.

TABELA I - COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% Peso)								
Material	C	Fe	Mn	Si	Ni	Cr	S	P
INCONEL 600, nominal 4	0,08	8,0	0,5	0,2	76,0	15,5	----	----
INCONEL 600 deste estudo	0,07	3,55	0,63	0,28	78,0	17,4	0,03	0,02

Suas características mecânicas no recebimento eram: Limite de escoamento a 0,2%, 964MN/m²; Limite de ruptura, 1103 MN/m²; Elongação, 2,1% em 25mm; Dureza, 38 Rockwell C. Estes índices indicam que o material estava consideravelmente encruado no estado de recebimento, tendo sido, provavelmente, acabado a frio por trefilação.

Desse material foram usinados corpos de prova de tração com 11mm de diâmetro na seção útil. Essas amostras foram então submetidas às diferentes condições de tratamento termomecânico indicadas na Tabela II. As amostras permaneceram nas diversas temperaturas de tratamento durante 3 horas. Aquelas temperaturas estão sujeitas a um desvio de $\pm 3^{\circ}\text{C}$ em relação ao valor nominal. O resfriamento posterior foi realizado ao ar.

O tratamento térmico inicial, 700°C por 3 horas, foi estabelecido de modo a tornar possível a obtenção da recristalização completa do material nas condições de recebimento. As estruturas do material como recebido e ao fim da primeira etapa de tratamento são indicadas nas Figuras 1A e 1B. Os níveis de encruamento foram obtidos tracionando os corpos de prova em máquina Instron até diferentes valores de elongação. O maior nível de encruamento corresponde a 21% de deformação que é uma situação imediatamente anterior à manifestação sensível de estricção.

Após o tratamento termomecânico foram realizadas dez medições de microdureza Vickers com carga 300g em cada amostra e feita observação metalográfica. As alterações do comporta

TABELA II - TRATAMENTOS TERMOMECÂNICOS			
Código	Tratamento Isotérmico Inicial	Encruamento	Tratamento Isotérmico posterior
000	amostra no estado de recebimento		
00	700°C	-----	-----
0		a 1% de deformação	-----
		b 3% de deformação	
		c 6% de deformação	
		d 10% de deformação	
		e 15% de deformação	
		f 21% de deformação	
A	por	1% de deformação	3 horas de permanência em
B	3 horas	3% de deformação	1 - 550°C 6 - 750°C 2 - 590°C 7 - 790°C
C		6% de deformação	3 - 630°C 8 - 840°C 4 - 670°C 9 - 890°C 5 - 710°C 10 - 940°C
D		10% de deformação	3 horas de permanência em
E	15% de deformação	1 - 550°C 5 - 710°C 2 - 590°C 6 - 750°C	
F	21% de deformação	3 - 630°C 7 - 840°C 4 - 670°C	
Assim, por exemplo, a amostra D3 recebeu como tratamento: 700°C/3horas → 10% deformação → 630°C/3horas			

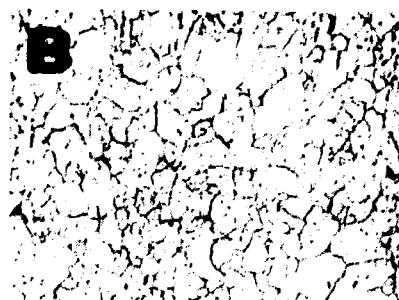
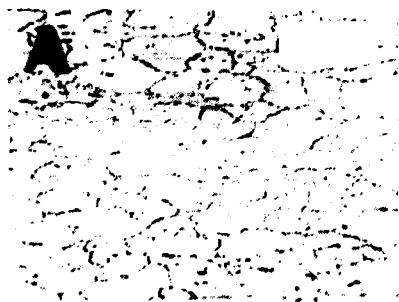


Figura 1

(A) material como recebido, condição 000, tamanho de grão 21 μm na direção longitudinal e 8 μm na direção transversal; (B) material recristalizado, condição 00, grãos equiaxiais com tamanho de grão 7 μm.

mento mecânico das amostras após os diferentes tratamentos foram caracterizadas pela variação das durezas médias. A significância dessas variações de dureza foi verificada pelo método estatístico de Student¹⁵.

Discussão

Os aspectos gerais da variação da dureza com a temperatura de tratamento e o grau de encruamento da amostra podem ser observados na Figura 2.

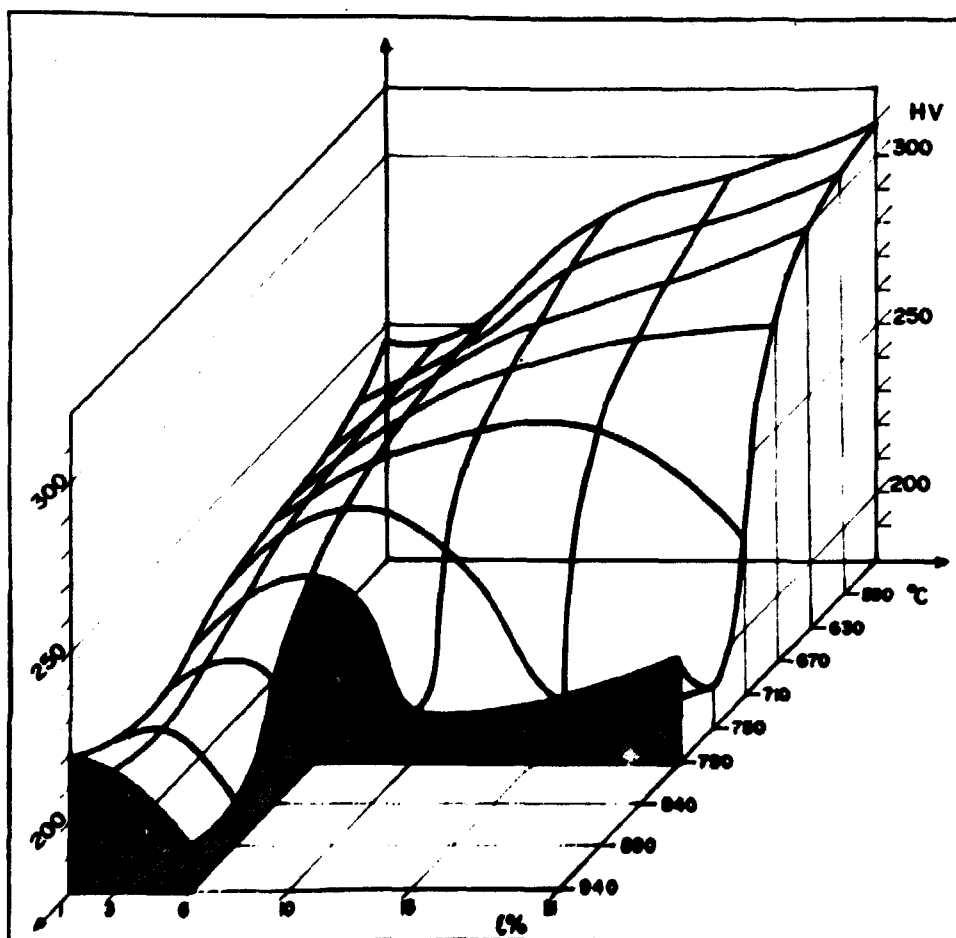


Figura 2

Relacionamento geral entre a microdureza Vickers, nível de predeformação e temperatura do tratamento térmico posterior (tempo de encharcamento de 3 horas) para o INCONEL 600.

Estabelecida uma comparação entre as durezas da condição "0" (encruada após tratamento isotérmico inicial) e da condição "1" de 550°C, conforme a Tabela III, nota-se que os valores da primeira condição superam os desta última até de formações da ordem de 6%. Isto sugere que o tratamento tenha propiciado predomínio de mecanismos de envelhecimento do material. Para deformações iguais ou superiores a 10% o quadro se inverte, aparentemente devido ao predomínio de um mecanismo de recuperação de defeitos.

TABELA III - MICRODUREZAS DAS CONDIÇÕES "0" e "1"				
Deformações	Condição "0"		Condição "1"	
1%	a	226,2 HV	A	246,6 HV
3%	b	213,0	B	242,8
6%	c	252,8	C	256,0
10%	d	283,3	D	282,8
15%	e	291,8	E	289,8
21%	f	308,5	F	308,4

Para qualquer nível de deformação, excetuando o caso acima, as durezas diminuem com o aumento da temperatura. A redução da dureza numa primeira etapa pode ser atribuída à recuperação de defeitos da estrutura cristalina. Numa segunda etapa ela se acentua e seus valores tendem a um mínimo.

A variação da estrutura do material ao longo da isoterma de 710°C, esta já indicada na Figura 2, é apresentada na Figura 3. Observa-se que a alteração sensível de estrutura para esse nível de temperatura ocorre apenas entre as deformações de 15 e 21%, e coincide com a queda brusca de dureza do material. Esses dois efeitos caracterizam um processo de recristalização. A dureza tende a um valor mínimo, quer considerando isotermas quer linhas de isodeformação.

A elevação da dureza a partir desse mínimo pode ser atribuída à instabilidade estrutural do material nos níveis de temperatura consideradas neste experimento.

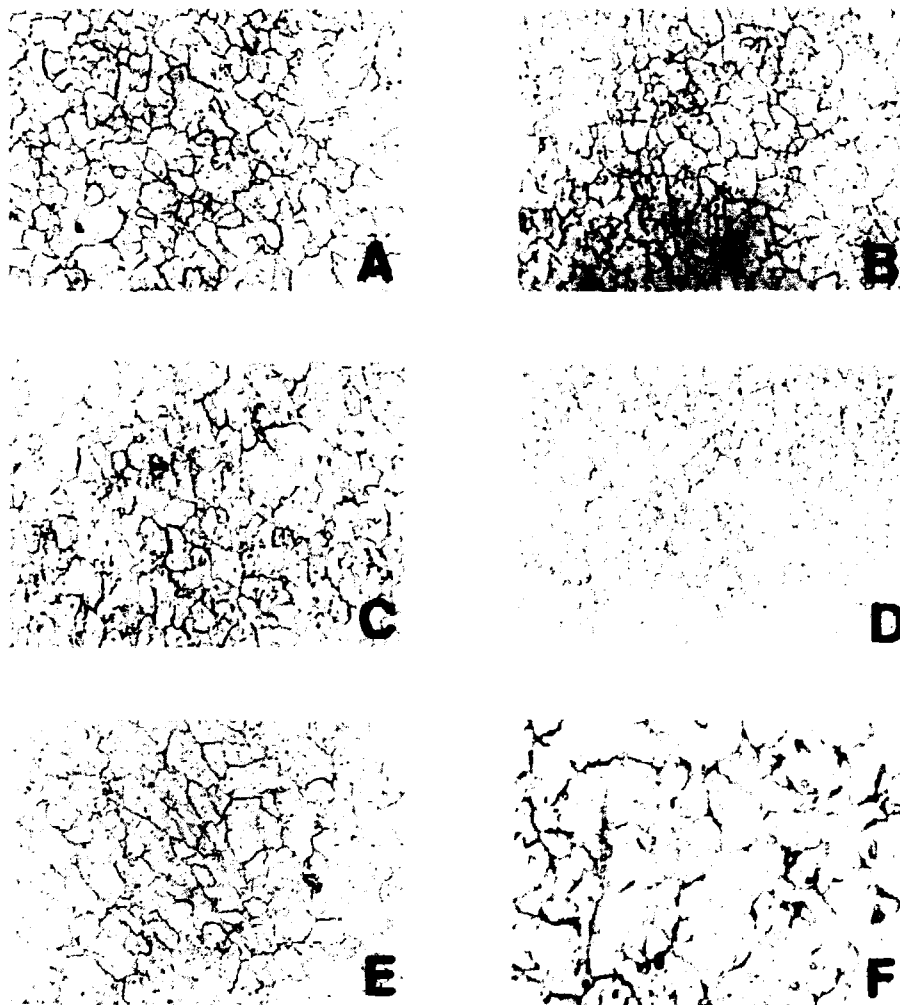


Figura 3
Estruturas do INCONEL 600 para diferentes predeformações
seguidas de tratamento térmico a 710°C durante 3 horas.

Entre 530°C e 980°C precipitam carbonetos de Cromo na matriz; abaixo de 760°C predomina o tipo M₂₃C₆ e além dessa temperatura o tipo Cr₇C₃ [1].

Já se dissera na "Introdução" que a influência das modificações estruturais produzidas por tratamentos isotermicos sobre as propriedades mecânicas dessa liga haviam sido recentemente discutidas. Observou-se, tal como no presente experimento, uma tendência ao fortalecimento do material a partir do estado recristalizado para temperaturas da ordem de 700-

800°C e tempos de encharcamento inferior a 15 horas^[3]. A fi

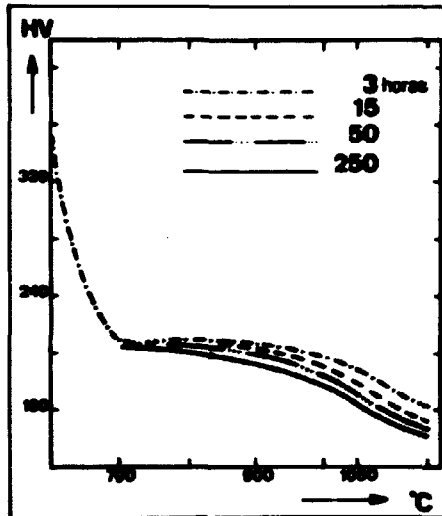


Figura 4
Variação da microdureza Vickers em função da temperatura para os tempos de 3, 15, 50 e 250 horas de tratamento^[3].

gura 4 mostra a variação da microdureza Vickers com a temperatura de tratamento isotérmico para tempo de tratamento de 3, 15, 50 e 250 horas. Embora a elevação de dureza observada no ensaio de 3 horas seja relativamente pequena ela é significativa estatisticamente para um nível de confiança de 95%.

Este fortalecimento é provavelmente resultado de um processo de envelhecimento precipitado pelas reações de dissolução e precipitação dos carbonetos de Cromo que ocorrem nesta faixa de temperatura. Considerando, na Figura 4, que tempos de encharque superiores a 15 horas conduzem a um amolecimento atribuído ao super envelhecimento da liga é possível esperar que o mesmo efeito ocorra nos presentes tratamentos para deformações superiores a 6% e temperaturas além de 800°C.

A Figura 5, relativa ao plano temperatura versus deformação, distingue três regiões de diferentes condições de recristalização para tempos de encharcamento de três horas. Tais regiões estão separadas por duas curvas ajustadas por equações do tipo $\theta = k \cdot \epsilon^n$ aos valores de θ (temperatura) e ϵ (deformação) experimentais. A curva mais à esquerda, ajustada a partir de pares (θ, ϵ) experimentais onde não houve ocorrência de recristalização, teve uma correlação de 99,7%. A curva mais à direita, ajustada para pares (θ, ϵ) correspondentes a recristalização observada, assumiu uma correlação de igual nível. Os critérios estabelecidos para delimitar as regiões foram a variação de dureza e o crescimento de grão.

Pelo fundamento das curvas, na região I o material se encontra plenamente recristalizado e sujeito a fortalecimen

to secundário produzido por evolução de carbonetos e, eventualmente, a um amolecimento provocado por superenvelhecimento [3].

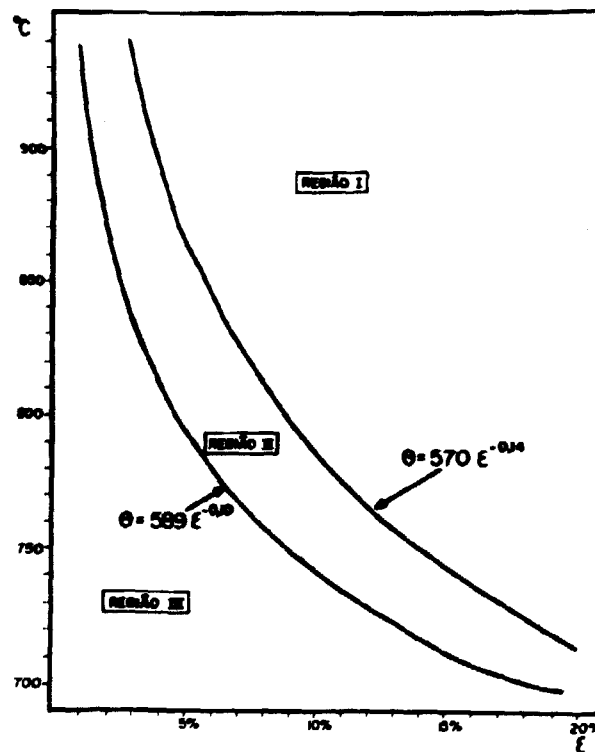


Figura 5

Faixa de incerteza da transição "encruado-recristalizado" para o INCONEL 600, como função da temperatura e do nível de predeformação.

Em algum lugar contido na região II o material se recristaliza, o que caracteriza tal região como uma faixa de incerteza na transição fenomenológica "encruado-recristalizado". Contudo, as equações ajustadas $\theta = 570 \cdot \epsilon^{-0,14}$ (fronteira das regiões I e II), e $\theta = 589 \cdot \epsilon^{-0,10}$ (fronteira das regiões III e II), tanto gráfica quanto numericamente, não chegam a se distanciar muito, o que dá à citada faixa, pela baixa incerteza resultante, um caráter de nítida mudança no prevailecimento dos efeitos dos mecanismos atuantes.

Na região III o material se apresenta encruado, tendo

sofrido moderado amolecimento pela recuperação de defeitos estruturais.

Conclusões

O comportamento mecânico da amostra de INCONEL 600 pre deformada por tração, e subsequentemente submetida a tratamento isotérmico com 3 horas de duração entre 550°C e 940°C, depende fundamentalmente do nível ϵ da predeformação e da temperatura θ daquele tratamento. O material estará completamente recristalizado se $\theta > 570^{-0,14}$ e não terá experimentado a recristalização para $\theta < 589^{-0,10}$, sendo θ a temperatura em °C e ϵ a predeformação relativa em tração.

Antes de serem atingidas condições para recristalização, os tratamentos térmicos reduzem certa parcela da dureza por simples efeito de recuperação. Após a plena recristalização surge uma certa tendência ao fortalecimento da liga provavelmente por efeito do envelhecimento.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio experimental prestado por Maria Alice Cabral de Góes e Myrian Motta Carelli, estagiárias de iniciação científica do Instituto Tecnológico da PUC, bem como a Fundação Técnico-Educacional Souza Marques pelas cessões de facilidade operacional e do material ensaiado.

Bibliografia

- (1) Pollock, J.T.A.; Barton, S.G., High strength steels-stress relation and derived creep characteristics at room temperature, Australian Atomic Energy Commission, Research Establishment Lucas Heights, AAEC/E 381, maio 1976.
- (2) Geguzin, Y.Y.; Krivoglaz, M.A. Ryaboshapka, K.P., High temperature creep of dispersion-hardened systems, Fiz.Metal. Metalloved, v. 31, p. 20/25, 1971.
- (3) Silveira, T.L.; Monteiro, E.; Mourão, D.R., Caracterização topológica do comportamento mecânico a altas temperaturas do INCONEL 600; apresentado ao Congresso Nacional da Associação Brasileira de Metais, São Paulo, 1980.
- (4) Inconel alloy 600, Huntington Alloy Products Division quarta Edição, 1973.
- (5) Duncan, A.J., Quality Control and Industrial Statistics. Richard Irwin Inc., quarta edição, p. 552, 1974.