

## ESTUDO DA RECRISTALIZAÇÃO DO AÇO ABNT 1010 COM DIFERENTES GRAUS DE DEFORMAÇÃO

H.G.Mathias (1), W. A.Monteiro (2), V.A. Rodrigues (2).

(1)Escola de Engenharia da Universidade Mackenzie, Rua Itambé, no.45, Higienópolis, CEP:01239-902, São Paulo, S.P., Brasil. Faculdade de Engenharia Industrial, Av. Humberto de A. C. Branco, no. 3972, cep: 09850-901, São Bernardo do Campo.

E-mail:heliomat@cci.fei.br

(2)Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Departamento de Engenharia de Materiais. Travessa R, no.400, CEP:05508-900, C.P.:11049, CEP:05422-970, São Paulo, S.P., Brasil.

E-mail:wamonte@net.ipen.br. E-mail:varodri@net.ipen.br.

O processamento termomecânico em materiais metálicos visa a modificação das propriedades mecânicas, magnéticas, elétricas, resistência a processos corrosivos, etc. Para um perfeito entendimento dos fenômenos envolvidos é necessário um estudo sistemático da microestrutura do material, bem como, avaliação das suas propriedades mecânicas.

Com o objetivo de estudar o comportamento da microestrutura do aço ABNT 1010 foi feita trefilação à frio abaixo da temperatura crítica de transformação de fases. O aço empregado neste estudo foi trefilado à frio com diâmetro inicial de 0,00793 m, reduzindo-se a 0,00772 (5%), 0,00615 (40%) e 0,00350 m (80%). Foram feitos tratamentos térmicos com três temperaturas (593, 843 e 873 K) e variou-se o tempo de tratamento térmico de 9000 a 28800 segundos. Foi utilizado para esse estudo o ensaio de microdureza e análise metalográfica.

Os resultados obtidos comprovam as leis de recristalização. A temperatura de recristalização é menor quanto maior o grau de deformação. O tempo de recristalização é menor para temperaturas maiores. Para longos tempos de permanência nos tratamentos térmicos tem-se um fenômeno de crescimento de grão, mas não observou-se uma significativa modificação nas propriedades do aço ABNT 1010.

Abstract.

Thermomechanical processing improve the mechanical and electrical properties. The aim of this work is the study of microstructure behavior of steel 1010. This steel was cold drawn with 5, 40 and 80% deformation. The bars were heated for different times at constant temperatures and for different temperatures at constant holding times. The micro hardness testing and optical micrographics were used. Recrystallization temperatures for each degree of deformation were determined by applying softening criterion. The results prove the recrystallization laws. The recrystallization temperature decreases with the increasing deformation. The time recrystallization decreases with increasing of temperatures. The grain size growth with the increasing holding time, but the modification of steel propriety was not observed.

## I- Introdução.

O processamento termomecânico em materiais metálicos visa a modificação das propriedades mecânicas, magnéticas, elétricas, resistência a processos corrosivos, etc. Para um perfeito entendimento dos fenômenos envolvidos é necessário um estudo sistemático da microestrutura do material, bem como, avaliação das suas propriedades mecânicas.

Quando em um metal dúctil ocorre uma deformação plástica, realizada de modo a provocar alteração na estrutura cristalina sem que esta volte as condições iniciais, podemos dizer que ocorreu uma deformação plástica a frio ou um trabalho a frio. Normalmente, o conceito de deformação a frio está ligado a temperatura de trabalho e a temperatura de fusão. Esta temperatura não pode ser definida com exatidão, pois vários fatores influenciam na sua determinação.

Como resultado do trabalho a frio, aumenta a dureza, a resistência à tração e a resistividade elétrica e a diminuição da ductilidade e tenacidade. Há também um grande aumento de discordâncias em certos planos da estrutura cristalina, os cristais sofrerão distorções e conseqüentemente um acúmulo de tensões internas elevado se esta deformação for severa.

Através do tratamento térmico os fenômenos acima poderão ser eliminados e as propriedades poderão voltar às condições iniciais. Estes tratamentos térmicos são chamados de recozimento de primeira ordem ou recristalização e recozimento de segunda ordem ou total. A distinção entre a recristalização e recozimento total é, que no primeiro caso não ocorre transformação de fase, havendo apenas modificações acentuadas na microestrutura, sem ocorrer mudança de fase no metal. No recozimento total ocorre necessariamente transformações de fase, devendo haver no caso dos aços, austenitização e posterior transformação da austenita em outras fases.

Nos dois processos, a estrutura deformada pelo trabalho a frio sofrerá as modificações por meio e aplicação de calor e este processo ocorre sempre no estado sólido, no caso do recozimento total a estrutura destorcida da rede retorna a um estado livre de tensões.

Os estudos executados visam verificar o comportamento de um aço ABNT1010 deformado com diferentes graus de deformação, nas regiões de recuperação, recristalização e crescimento de grão, quando aquecido abaixo da zona crítica, para que possa ser melhor utilizado em suas aplicações.

## II- Materiais e Métodos

A composição química do aço utilizado neste trabalho é apresentada na tabela 1. A análise química das amostras retiradas das barras trefiladas do aço ABNT 1010, foi realizada no Departamento de Química do Instituto de Pesquisa e Estudos Industriais da Faculdade de Engenharia Industrial ( São Bernardo do Campo).

As amostras para tratamento térmico foram retiradas da barra obtidas por processo de trefilação.

Os tratamentos térmicos foram realizados em um forno elétrico do fabricante Combustol - modelo F1690 e para registrar a temperatura foi utilizado um registrador de temperatura ECB modelo RB 102 com termopar Cromel / Alumel. Os tratamentos térmicos tiveram como variável o tempo para cada grau de encruamento.

As escolhas das temperaturas basearam-se na temperatura teórica de recristalização do ferro puro, aproximadamente 723 K.

Tabela 1 - Composição química do aço ABNT 1010 ( % em pêso)

	IPEI	ABNT
Elemento Químico	Peso (%)	Peso (%)
Carbono	0,11	0,08-0,13
Manganês	0,40	0,30-0,50
Fósforo	0,015	0,04 max
Enxofre	0,014	0,05 max
Silício	0,082	0,015max
Alumínio	0,043	

Escolhemos desta maneira as temperaturas abaixo e acima da mesma, isto é, 593 e 843 K e a temperatura 873K foi adotada, pois um dos objetivos do trabalho é analisar a recristalização a uma temperatura abaixo da zona crítica, isto é, antes da transformação  $\alpha - \gamma$ .

As séries de tratamentos térmicos encontram-se na tabela 2.

Tabela 2 - Tratamento térmico realizado no aço ABNT 1010

TRATAMENTO TÉRMICO	TEMPERATURA K	TEMPO	MEIO DE RESFRIAMENTO
1ª SÉRIE	593		
2ª SÉRIE	843	VARIÁVEL	ÁGUA
3ª SÉRIE	873		

Todos os tratamentos térmicos realizados com o forno na temperatura desejada e os corpos de prova colocados no forno após sua estabilização.

Para que não ocorresse uma grande diferença entre a temperatura medida e a temperatura dos corpos de prova, estes foram colocados no mesmo plano do termopar do registrados de temperatura.

Para a determinação da temperatura de recristalização utilizou-se o critério da Temperatura de Meio Amolecimento ( HST) (1) . Considera-se a média do limite de resistência à tração do material encruado e do material totalmente recozido.

Foi utilizada a média da dureza do material encruado e do material totalmente recozido, obteve-se deste modo o valor da dureza onde ocorre a recristalização, como é mostrada nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Cálculo dos valores da resistência à tração e da dureza para determinação a Temperatura de Meio de Amolecimento (HST)

	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)			DUREZA VICKERS		
	5%	40%	80%	5%	40%	80%
Encruado	438	551	810	153	199	250
Recozido	325	323	288	101	102	95
Média	382	437	549	127	150,5	172,5

Portanto considerou-se as temperaturas de recristalização para 5, 40 e 80% de deformação quanto a resistência à tração for 380, 440 e 550 MPa e a dureza Vickers for 127, 151 e 173 respectivamente.

Para a determinação do tempo necessário para a ocorrência da recristalização nas amostras do aço ABNT 1010 deformado, em tratamentos isotérmicos, foram escolhidas três temperaturas ( 593, 843 e 873 K ) que permaneceram constantes enquanto variou-se o tempo de tratamento térmico de 10 a 3600 s.

Neste estudo utilizou-se o ensaio de microdureza e a análise metalográfica. Para a observação do crescimento dos grãos foi feito tratamentos isotérmicos ( 873 K ), em tempos de 900 a 28800 s.

Foram utilizadas amostras de 300 mm de comprimento e após tratamentos foram cortados corpos de prova para análises metalográficas, ensaios de microdureza e ensaios de tração.

### III- Resultados e Discussões

#### III 1 Análise de microdureza

As figs.1A, B e C, mostram o material encruado nos três graus de deformação. Observa-se que quanto maior o grau de deformação, mais alongados ficam os grãos no sentido da trefilação.

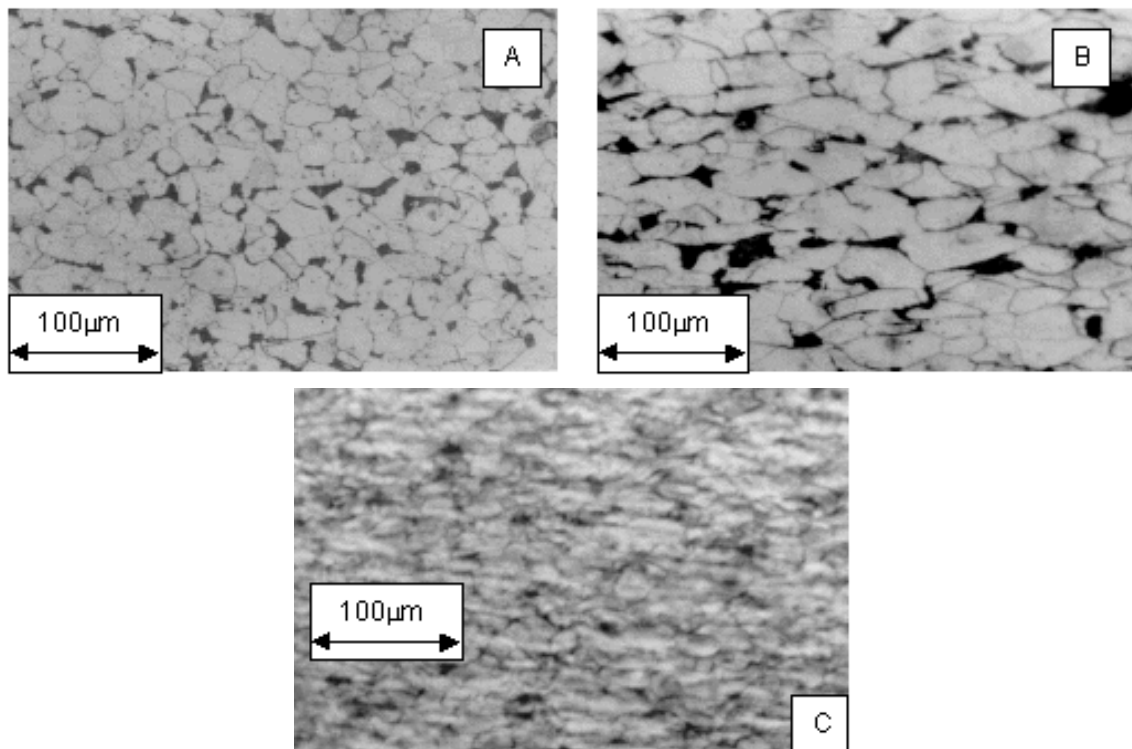
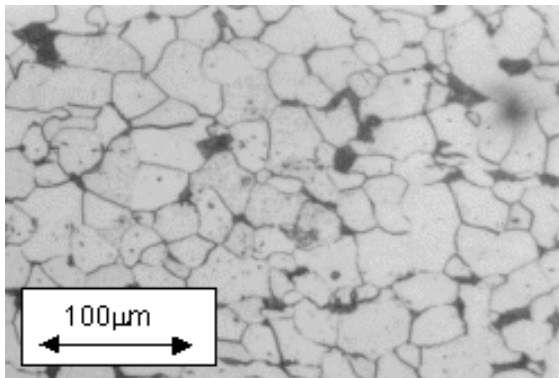


Fig.1. Microestrutura do aço ABNT encruado. A) 5% de deformação, B) 40% de deformação, C) 80% de deformação.

As análises metalográficas, figs.2, 3 e 4, para as temperaturas de tratamentos térmicos e os três graus de deformação, mostram que, para 5% de deformação nas três temperatura não

ocorreu a recristalização, mas apenas a recuperação pois não foi atingido o grau de



deformação crítica.

Fig.2. Micrografia do aço ABNT 1010, 5% Deformado e aquecido a 593 K – 3600s

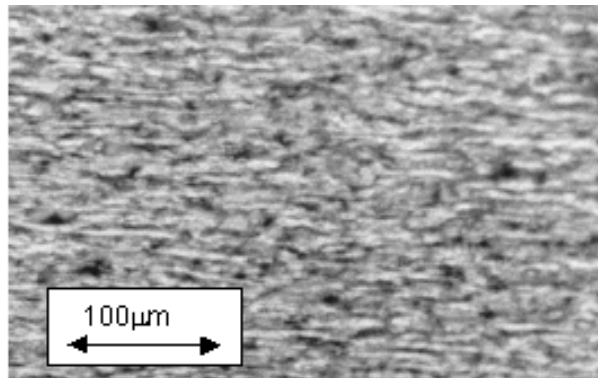


Fig.3. Micrografia do aço ABNT 1010, 80% deformado e aquecido a 593 K – 3600s

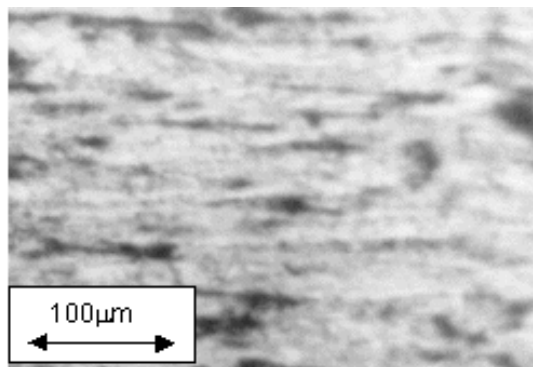


Fig.4. Microestrutura do aço ABNT 1010 deformado a 80% e aquecido a 843 K por 3600 segundos.

Graus de deformação elevados, aumentam a quantidade de núcleos formadores e o potencial termodinâmico para a recristalização. Para graus de deformação baixos, poucos núcleos são formados, migrando distâncias maiores com velocidades menores, dando lugar somente a recuperação. A ocorrência da recuperação diminui o potencial termodinâmico que dificultam a recristalização. Desta maneira não se verifica o amolecimento [2].

A dureza prevista para que ocorra a recristalização no aço ABNT 1010 com 5% de deformação é de 127 Vickers e a dureza mínima obtida foi de 140 Vickers, demonstrando que não se iniciou a recristalização, como mostra a tabela 4.

A observação que se fez quando a deformação é de 5% para as três temperaturas, é a mesma para 40% de deformação, nas temperaturas de 593 e 843 K, pois as medidas de dureza nos dois casos, também, praticamente não sofrem alterações. Nas micrografias das figuras 2, 3 e 4 pode-se comprovar que não se tem início a recristalização.

Na temperatura de 873 K e tempo de 1800 segundos para 40% de deformação, obteve-se um valor de dureza Vickers de 153, portanto próxima da dureza esperada para a determinação da temperatura de meio de amolecimento, que para este caso é de 151 Vickers. Ainda observando-se a tabela 4, verifica-se que no tempo de 600 segundos tem-se o início da recristalização, pois ocorre uma queda considerável na dureza.

Para 80% de deformação, novamente, se observa que não ocorre a recristalização nas temperaturas de 593 e 843 K, pois as medidas de dureza também praticamente não sofrem alterações. Para a temperatura de 873 K e um tempo de 240 segundos, tabela 4, tem-se uma

dureza Vickers de 190 e após 480 segundos obtêm-se a dureza Vickers de 153. Neste intervalo se encontra a dureza prevista, 173 para que se determine a temperatura de meio de amolecimento.

Tabela 4\_- Comparação da dureza nos tratamentos térmicos em várias temperaturas e os tempos de tratamento com 5% (a), 40% (b) e 80% (c) de grau de deformação

Tempo S	Dureza Vickers			Dureza Vickers			Dureza Vickers		
	593 K	843 K	873 K	593 K	843 K	873 K	593 K	843 K	873 K
30	158	140	148	187	192	201	249	247	230
60	152	149	156	192	207	204	249	246	229
240	154	154	156	189	201	197	213	216	190
480	-	-	-152	-	-	-197	-	-	154
600	150	152	156	201	210	172	223	223	158
1500	-	-	-152	-	-	164	-	-	145-
1800	-	-	-151	-	-	153	-	-	146
3600	152	152	150	202	204	135	230	216	133

(a)

b)

c)

Através da figura 5, observa-se que no tempo de 240 segundos tem-se início a recristalização.

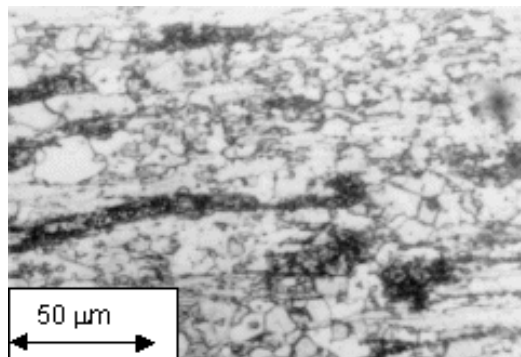


Fig.5. Microestrutura do aço ABNT 1010 deformado 80% e aquecido a 873 K por 240 segundos.

Foram feitos tratamentos isócronos para determinar a temperatura de recristalização para tempo constante, de 3600 s. No procedimento utilizou-se corpos de prova com 300 mm de comprimento, para cada grau de deformação, como é mostrado na tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas do aço ABNT 1010 com 5, 40% e 80% de deformação, tratados termicamente em várias temperaturas no tempo de 3600 s.

Temperatura K	Resistência à Tração MPa		
	5%	40%	80%
495	462	599	791
593	453	601	748
693	449	588	753
773	442	583	691
803	460	577	635
838	467	551	570
873	471	461	473

### III.2. Análise de Crescimento de Grão.

A tabela 6, apresenta o limite de resistência à tração do aço com 80% de deformação tratado termicamente a 873K com tempos variáveis.

Tabela 6 – Limite de Resistência à Tração do aço ABNT 1010

Tempo (s)	Limite de Resistência à Tração (MPa)
9000	450
10800	456
14400	445
18000	446
21600	472
25200	472
28800	462

Com os valores do limite de resistência à tração nos tempos de tratamentos de 9000 e 28.8000 segundos, observa-se que não ocorre variação nessa propriedade.

Após a recristalização obtém-se uma estrutura com grãos de vários tamanhos e formatos, figuras 6 e 7. Com o contínuo recozimento ocorre a formação de uma ordem estável de poliedros regulares de lados iguais, com crescimento dos grãos, eliminando os menores [3]. Com o recozimento a altas temperaturas pode ocorrer crescimento anormal de alguns grãos, o que não ocorreu devido a baixa temperatura utilizada. A tabela 7 mostra o aumento de grãos.

Tabela 7 - Tamanho Médio de Grão ( $\mu\text{m}$ )

Tempo (s)	Tamanho Médio de Grão ( $\mu\text{m}$ )
3600	8,68
9000	8,78
10800	18,16
14400	18,68
21600	19,16
25200	21,58
28800	22,30

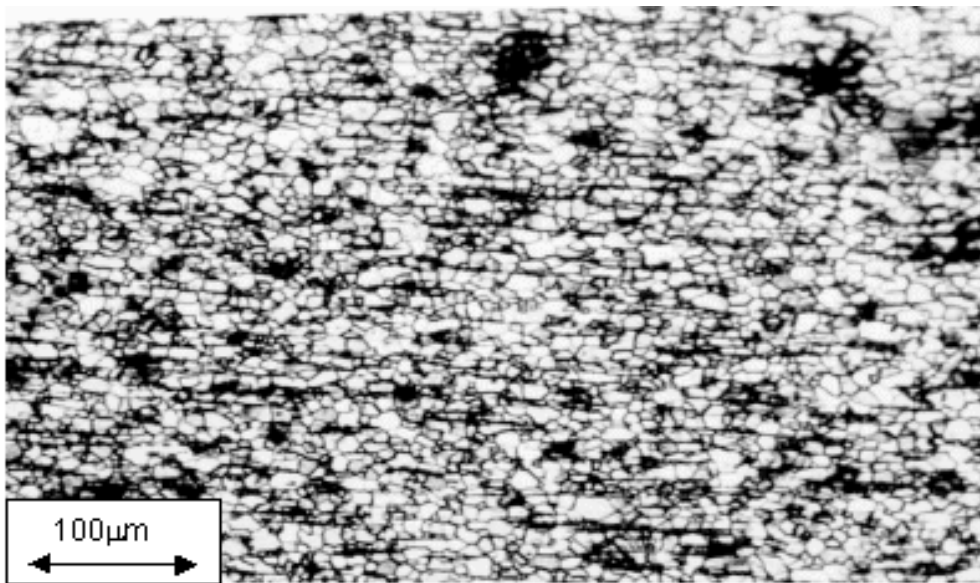


Fig.6. Microestrutura do aço ABNT 1010 deformado 80% e aquecido a 873 K por 9000 segundos.

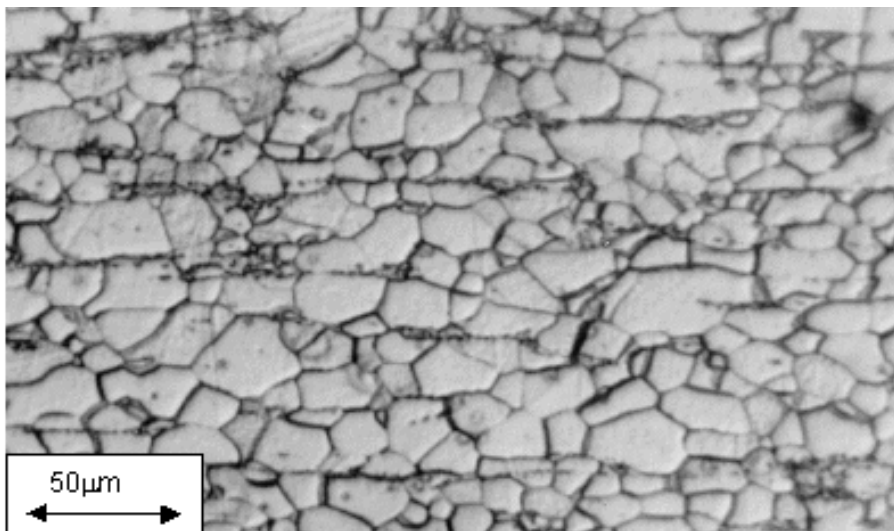
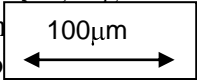


Fig.7. Microestrutura do aço ABNT 1010 deformado 80% e aquecido a 873 K por 28.800 segundos.

#### IV – Conclusões.

Deste trabalho podemos concluir que:

1. É possível utilizar a dureza como medida para determinação da temperatura de recristalização, seguindo o critério de meio amolecimento.
2. Tem-se m  utilizando-se a resistência à tração no critério da temperatura de meio amo se tem uma propriedade do material como um todo, o que não se verifica com a dureza, que mede propriedades pontuais.
3. Para o aço ABNT 1010 a recristalização se dá em temperaturas próximas à temperatura inferior da zona crítica.
4. Para maior grau de deformação, menor temperatura de recristalização e menor o tempo para recristalização.
5. Para tempos longos de permanência nos tratamentos térmicos tem-se o fenômeno de crescimento de grão, mas não ocorre modificação nas propriedades do aço ABNT 1010. Os grãos apresentam-se de forma irregular.

#### Referências.

- [1] Chaddad, J.M.A. et all, “Métodos de Avaliação de Reozibilidade do Cobre”, Metalurgia, ABM, vol.39, pp. 147, 1983.
- [2] Padilha, A .F. et all – Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura, São Paulo, pp.123, ABM 1995.
- [3] Metals Handbook, American Society for Metals, vol.9, pp170, March 1980, 9<sup>a</sup> Edição Metal Park.