

# OTIMIZAÇÃO DOS CICLOS DE TRATAMENTO TÉRMICO DO AÇO ABNT 4320 FORJADO VISANDO O AUMENTO DE TENACIDADE<sup>1</sup>

*\*Leoneros Acosta Barbosa<sup>2</sup>  
Telmo Roberto Strohaecker<sup>3</sup>  
Vagner João Gobbi<sup>4</sup>  
Raphael Aragonês Leite<sup>2</sup>  
Cláudia Lisiane Fanezi da Rocha<sup>5</sup>*

## Resumo

O objetivo do presente trabalho é otimizar o desenvolvimento do tratamento térmico do aço ABNT 4320 forjado, visando o aumento de tenacidade. O trabalho buscou determinar os parâmetros ideais de tratamentos térmicos que venham correlacionar a maior tenacidade do aço ABNT 4320 aliada à alta resistência mecânica através da homogeneização microestrutural. Para isso foi realizado o ensaio Jominy para determinação da temperabilidade de cada barra de aço antes dos três ciclos térmicos propostos: recozimento, normalização, têmpera e revenimento. O trabalho foi desenvolvido através de estudos dos parâmetros de tratamentos térmicos, avaliados através da caracterização metalúrgica e mecânica do componente.

**Palavras-chave:** Tenacidade; Tratamento térmico; Aço ABNT 4320 forjado.

## OPTIMIZATION OF HEAT TREATMENT CYCLES IN ABNT 4320 FORGED STEEL IN ORDER TO INCREASE TOUGHNESS

### Abstract

The purpose of the present work is the optimization of heat treatment cycles in ABNT 4320 forged steel in order to increase toughness. This work aimed to determine the optimum heat treatment parameters, which correlates the higher toughness of ABNT 4320 forged steel to a high mechanical strength, achieved with microstructural homogenization. For this, Jominy testing was carried out in order to determine the hardenability of each steel bar before three predetermined heat treatment cycles: annealing, normalizing, quenching and tempering. The work was developed by studying the heat treatment parameters, which were evaluated by the metallurgical and mechanical characterization of the component.

**Key words:** Toughness; Heat treatment; ABNT 4320 forged steel.

<sup>1</sup> Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

<sup>2</sup> Mestrando, Programa de Pós – Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e dos Matérias (PPGEM) – UFRGS.

<sup>3</sup> Professor, Programa de Pós – Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e dos Matérias (PPGEM) – UFRGS.

<sup>4</sup> Graduando em Engenharia Metalúrgica na Universidade Federal do Rio Grande do sul- UFRGS.

<sup>5</sup> Graduando em Engenharia Metalúrgica na Universidade Federal do Rio Grande do sul- UFRGS.

\* leoneros@demet.ufrgs.br

## 1 INTRODUÇÃO

Devido à importância do aço ABNT 4320 para confecção de acessórios de offshore (normas NBR 13715/96 e 13545/99), este trabalho teve por finalidade otimizar os ciclos de tratamentos térmicos visando o aumento de tenacidade. O estudo dos parâmetros de tratamentos térmicos foi realizado através da caracterização mecânico-metalúrgica do componente obedecendo às restrições impostas pelas normas utilizadas (tenacidade mínima na temperatura de -20 °C de 45 Joules).

## 2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### Material

O material utilizado foi o aço ABNT 4320, com composição química apresentada nas Tabelas 1 a 3. A análise de composição química foi realizada nas três barras antes da realização dos ciclos de tratamentos térmicos.

**Tabela 1.** Análise de composição química da primeira barra

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0,19	0,21	0,59	0,013	0,022	0,52	0,24	1,77

**Tabela 2.** Análise de composição química da segunda barra.

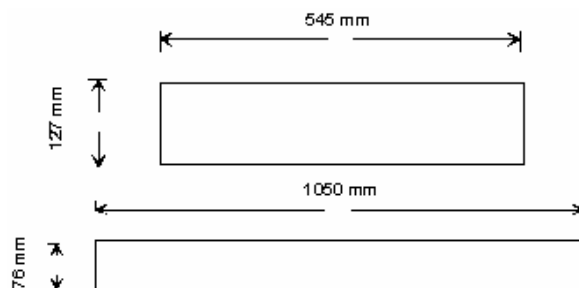
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0,17	0,23	0,59	0,010	0,020	0,52	0,24	1,68

**Tabela 3.** Análise de composição química da terceira barra.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0,22	0,20	0,58	0,015	0,023	0,51	0,23	1,78

### Forjamento

As três barras foram forjadas, desde o diâmetro inicial de  $\varnothing 127$  mm até o diâmetro final de 76 mm, conforme a Figura 1.



**Figura 1.** Layout do forjamento seguindo a norma NBR 13545/99.

As barras forjadas foram cortadas em duas seções iguais de 272,5 mm para realização dos ciclos de tratamentos térmicos propostos para, posteriormente, serem submetidos à análise metalográfica, ensaios de tração e tenacidade ao impacto (Charpy).

Foi retirada uma amostra de cada barra forjada, a qual denominamos de A1, B1 e C1, para posterior análise metalográfica, a fim de compararmos a microestrutura do forjado com as amostras que sofreram tratamentos térmicos. Após esta análise efetuou-se o primeiro ciclo térmico e analisado. Logo após realizou-se o segundo e terceiro ciclo térmico com o ajuste de alguns parâmetros de tratamentos térmicos para obtenção da máxima tenacidade.

### Tratamento Térmico

Os três ciclos de tratamento térmico foram realizados na empresa Brasimet S.A. Os Ciclos de tratamentos térmicos realizados na barra forjados estão representados nas Tabelas 4, 5 e 6. Estes ciclos foram o compostos por alguns dos seguintes tratamentos térmicos: recozimento, normalização, têmpera, e revenido.

**Tabela 4.** Seqüência do primeiro ciclo de tratamento térmico realizado.

Amostras	Tratamentos Térmicos	Tempo em Temperatura	Temperatura (°C)
A1	Amostra Anterior ao Tratamento Térmico		
A2	Têmpera (banho de sal)	1,5 h	845 (resfriado a 160 °C)
	Revenido	2,5 h	400

**Tabela 5.** Seqüência do segundo ciclo de tratamento térmico.

Amostras	Tratamentos Térmicos	Tempo em Temperatura	Temperatura (°C)
B1	Amostra Anterior ao Tratamento Térmico		
B2	Normalização (atmosfera controlada)	2 h	925
B3	Recozimento (atmosfera controlada)	Primeiro patamar-3 h	775
		Segundo patamar-6 h	650
B4	Têmpera (banho de sal)	1,5 h	860 (resfriado a 160 °C)
	Revenido	2,5 h	400

**Tabela 6.** Seqüência do terceiro ciclo de tratamento térmico.

Amostras	Tratamentos Térmicos	Tempo em Temperatura	Temperatura (°C)
C1	Amostra Anterior ao Tratamento Térmico		
C2	Recozimento (atmosfera controlada)	Primeiro patamar-3 h	775
		Segundo patamar-6 h	650
C3	Têmpera (banho de sal)	1,5 h	860 (resfriado a 140 °C)
	Revenido	2,5 h	400

Dividiu-se em etapas o processo de tratamento térmico em cada ciclo realizado. Para cada etapa retirou-se uma amostra da barra, todas com mesmas dimensões  $\varnothing$  76 mm x 20 mm de altura, para posteriores análises metalográficas e ensaios de dureza.

## Metodologia da Análise

A metodologia empregada para análise dos corpos de prova consistiu na realização de metalografia em microscopia ótica e perfil de dureza. Tais análises foram executadas após procedimentos padronizados de corte, lixamento, polimento e ataque químico seletivo para caracterização microestrutural. Cada amostra foi cortada até o centro. Após o corte, retirou-se uma fatia de cada amostra, conforme Figura 2, onde selecionamos uma parte para análise da região transversal a barra.

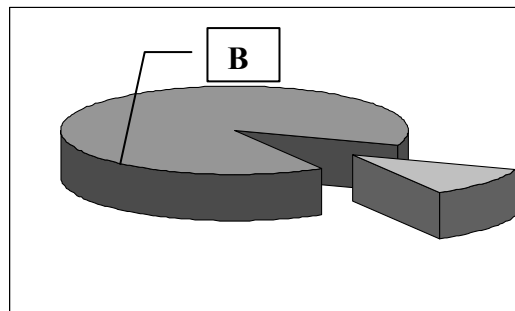


Figura 2. Esquema de corte das barras.

## Ensaio de Tração

Após a caracterização microestrutural foram realizados ensaios de tração. Para isso foram preparados três corpos de prova de acordo com a norma ASTM – 8M de 1998. Tais corpos de prova foram retirados das barras conforme a Figura 3. O ensaio foi realizado com uma máquina de tração servo-hidráulica MTS 810 utilizando uma velocidade de ensaio de 1,27 mm/min.

## Ensaio de Impacto Charpy

Os ensaios de impacto Charpy tem por finalidade determinar a tenacidade do material. Para tal retiraram-se duas amostras de cada barra, segundo a Norma ASTM – E23, conforme Figura 3, as quais foram divididas em dois corpos de prova de cada amostra. Foram obtidos 4 corpos de prova.

Os corpos de prova foram preparados nas dimensões 10 x 10 x 55 mm, com entalhe em V e ângulo de 45°, profundidade 2 mm e raio de curvatura 0,25 mm, conforme Figura 4. Os ensaios de tenacidade ao impacto foram realizados na temperatura de -20°C.

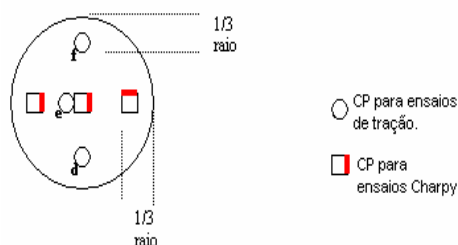


Figura 3. Esquema da obtenção dos corpos de prova para ensaios de impacto Charpy e de tração.

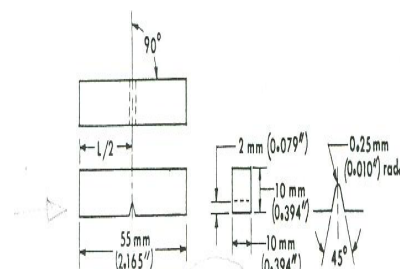


Figura 4. Esboço do corpo de prova para ensaio Charpy.

## Ensaio de Dureza

As amostras foram lixadas na sua superfície, com lixa 80, a fim de deixar a amostra plana. Após foram feitos ensaios de dureza Brinell com carga de 187,5 Kgf e esfera de 2,5 mm. Os ensaios de dureza foram realizados nas seções transversais das amostras retiradas da barra. Tais ensaios foram realizados ao longo das amostras, da sua periferia até o centro, a cada 4 mm, totalizando 10 medições em cada amostra.

## Ensaio Jominy

Os corpos de prova dos três ciclos realizados foram resfriados a partir de uma de suas extremidades por um jato de água, fazendo com que o mesmo experimente uma gama de velocidade de resfriamento em água até a velocidade de resfriamento ao ar. Após o resfriamento foi realizada a medida de dureza ao longo de uma geratriz de cada corpo de prova a cada 1/16 avos de polegada e logo em seguida foi plotado um gráfico de dureza por distância característica para as três barras.

O ensaio para determinação da temperabilidade foi realizado nas três barras laminadas que posteriormente foram tratadas termicamente.

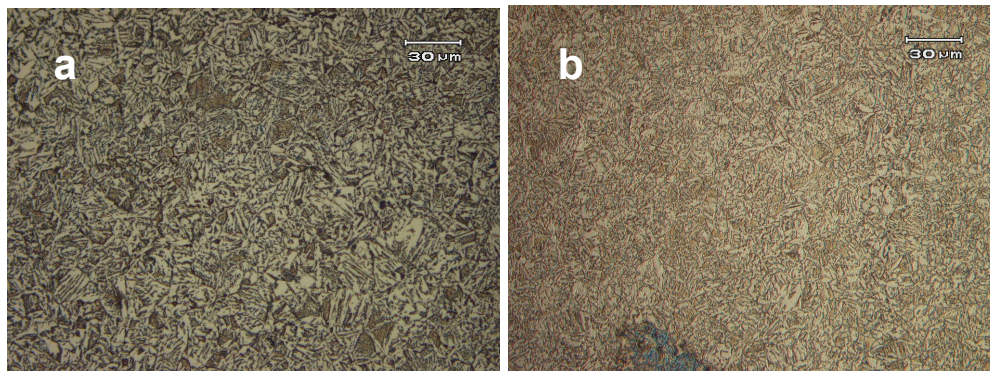
## 2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Análise Química

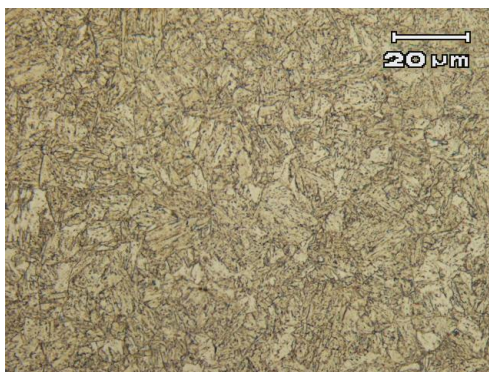
Pode-se observar nas Tabelas 1 a 3 que os teores de fósforo e enxofre estão adequados, pois ambos elementos estão em quantidades inferiores a 0,03%, isto de certa forma auxilia no aumento da tenacidade devido à minimização de segregações no aço utilizado.

### Análise Metalográfica

As análises metalográficas realizadas, depois de cada ciclo térmico imposto, podem ser observadas nas Figuras 6 e 7. As metalografias realizadas para determinação do tamanho de grão na etapa final de cada ciclo térmico proposto são observadas nas Figuras 8 e 9.

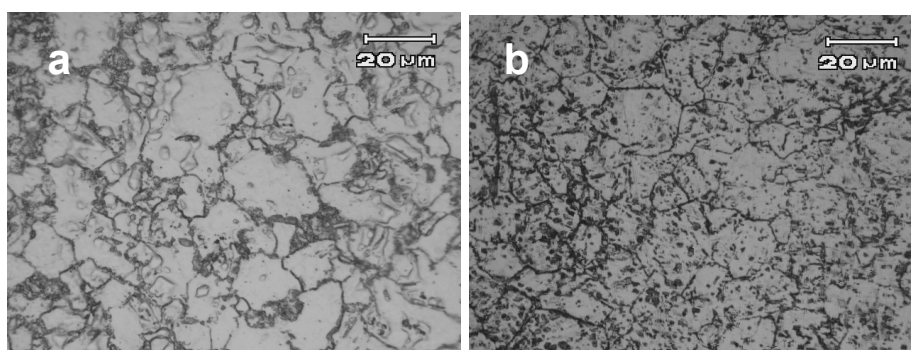


**Figura 6.** Metalografia da barra 1, Amostra A2(a) e B4(b), após a têmpera e revenido, apresenta microestrutura martensítica. Ataque Nital 2%.



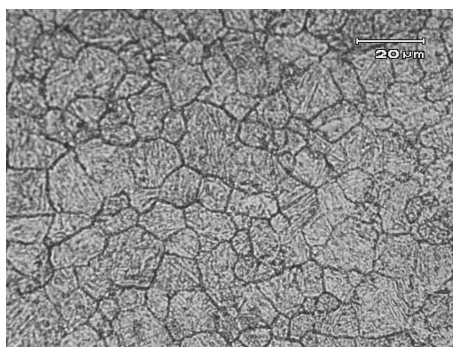
**Figura 7.** Metalografia da barra 3, amostra C3. Demonstra microestrutura martensítica. Ataque Nital 2%.

### Primeiro Ciclo Térmico e Segundo Ciclo Térmico– Tamanho de Grão



**Figura 8.** Metalografia da amostra A2(a) e B4(b), apresentando tamanho de grão 7 e 9 ASTM respectivamente. Ataque: Picral.

### Terceiro Ciclo Térmico



**Figura 9.** Metalografias da amostra C3, demonstra tamanho de grão 9 ASTM no núcleo e 10 ASTM. Ataque Picral.

### Ensaio de Tração

Os resultados dos ensaios de tração realizados nos três ciclos realizados podem ser observados nas Tabelas 7, 8 e 9.

**Tabela 7.** Resultados dos testes de tração no primeiro ciclo realizado.

CP	LR (MPa)	LE (MPa)	Alongamento (25 %)
01	840	660	16
02	820	650	17
03	820	650	17

**Tabela 8.** Resultados dos testes de tração no segundo ciclo realizado.

CP	LR (MPa)	LE (MPa)	Alongamento (25 %)
01	776	607	17
02	776	600	17
03	775	603	17

**Tabela 9.** Resultados dos testes de tração no terceiro ciclo realizado.

CP	LR (MPa)	LE (MPa)	Alongamento (25 %)
01	803	613	17
02	794	621	16
03	785	615	15

Os resultados obtidos nos ensaios de tração nos levam à conclusão que, no quesito limite de escoamento mínimo o material se mostrou semelhante, pois todos corpos de prova apresentaram valores aproximados conforme os resultados obtidos. No quesito limite de resistência mecânica mínima o material foi aproximado. E no quesito alongamento o material foi novamente similar, pois todos corpos de prova apresentaram valores de deformação finais superiores satisfatórios.

### Teste de Impacto (Charpy)

A NBR 13715/96 especifica o valor de 45 Joules para energia absorvida mínima para o grau QR3S, na temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$ . Os resultados obtidos no teste de impacto realizado nos três ciclos propostos podem ser observados nas Tabela 10.

**Tabela 10.** Resultados do ensaio de impacto realizados em todos ciclos térmicos, na temperatura  $-20^{\circ}\text{C}$ .

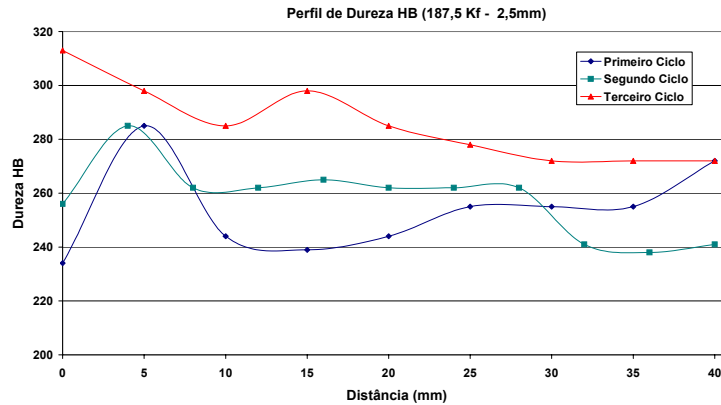
Ciclo Térmico	Identificação	Energia Absorvida (J)
1	Amostra A2	50
2	Amostra B4	114
3	Amostra C3	101

Através dos resultados obtidos no ensaio de teste de impacto Charpy pode-se concluir que o material obteve a melhor tenacidade no segundo ciclo térmico, logo todos estariam aprovados, pois em todos testes os corpos de prova apresentaram valores superiores a 45 J.

### Ensaio de Dureza

Através da Figura 10 podem-se analisar os resultados dos ensaios de dureza realizados nos corpos de provas de cada ciclo térmicos realizado.



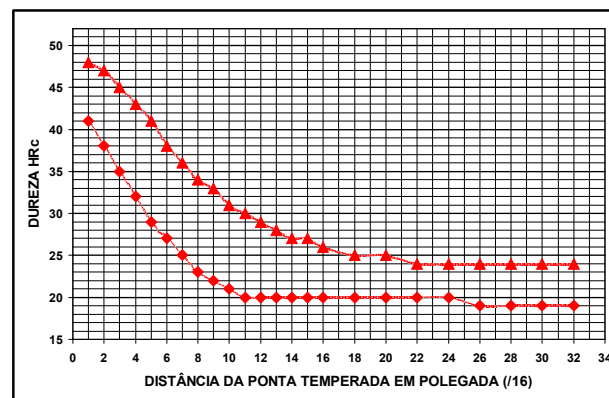


**Figura 10.** Perfil de dureza HB realizado nas amostras beneficiadas de cada ciclo térmico.

Os ensaios de dureza foram realizados nas seções transversais das amostras, desde a sua periferia (0 mm) até o centro das mesmas (38 mm). Podemos concluir, então, que o material foi aprovado neste quesito, pois apresentou dureza entre 240 HB a 300 HB nas amostras beneficiadas de cada ciclo térmico.

### Ensaio Jominy

O ensaio Jominy foi realizado nas três barras laminadas para determinação da temperabilidade. Observou-se que as três barras se apresentaram similares devido às barras terem composições químicas muito semelhantes. Na Figura 11 observa-se o resultado do ensaio Jominy característico das três barras testadas.



**Figura 11.** Gráfico dos resultados do ensaio de Jominy realizado em cada barra tratada.

## 3 CONCLUSÕES

Os ciclos de tratamentos térmicos realizados, com o objetivo de obter otimização das propriedades mecânicas do aço ABNT 4320 visando o aumento da sua tenacidade foram considerados satisfatórios. Os resultados foram aprovados segundo as normas utilizadas em todos os quesitos analisados, tais como: composição química, ensaio de tração, ensaio de impacto Charpy.

Analisando o ensaio Jominy, observa-se que o aço ABNT 4320 é de média temperabilidade devido a uma queda um pouco pronunciada na dureza. Mas esta média temperabilidade pode-se entender devido ao grão estar refinado diminuindo as características de temperabilidade deste aço.



No aspecto composição química os materiais apresentaram os teores de fósforo e enxofre adequados, pois ambos elementos estão em quantidades inferiores a 0,03%. Isto de certa forma auxilia no aumento da tenacidade devido à minimização de inclusões e segregações no aço utilizado.

Os resultados obtidos nos ensaios de tração apresentaram valores superiores em 25% com respeito ao limite de escoamento mínimo, 1% a respeito do limite de resistência mecânica mínimo e 2% a respeito do alongamento. Os resultados obtidos no ensaio de tração demonstraram um ganho em ductilidade no segundo ciclo térmico devido à homogeneização microestrutural obtida após a normalização realizada em altas temperaturas.

O Charpy demonstrou também que a homogeneização microestrutural auxilia diretamente na tenacidade do material e devido a isto o segundo ciclo é o mais adequado para otimização deste parâmetro tenacidade.

Os resultados obtidos nos ensaios de dureza nas amostras dos ciclos térmicos impostos apresentaram-se muito semelhantes, mas o segundo ciclo foi o que obteve o perfil de dureza mais homogêneo.

Nas análises metalográficas nota-se que as amostras A1, B1 e C1, retiradas após o forjamento, apresentaram microestrutura com tamanho de grão heterogêneo devido à recristalização dinâmica oriunda do próprio processo de forjamento. Já a amostra C3 do terceiro ciclo obteve-se um grão mais refinado comparado com as outras amostras devido à severidade do meio de resfriamento obtendo uma queda na dureza devido à diminuição da temperabilidade. Mas o ciclo que propiciou melhores resultados quanto à tenacidade do material aliada a uma resistência mecânica alta foi o segundo ciclo, amostra B4, devido à homogeneização microestrutural obtida.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao CNPQ pelo apoio financeiro.

## **REFERÊNCIAS**

- 1 CHARLIE R. BROOKS ; “**Principles of the Heat Treatment of Plain Carbon and Low Alloy Steels. The Materials Information Society**”, 1996.
- 2 ROLLASON, E.C. ;“ **Metallurgy for Engineers**”, 3ª edition. Edward Arnold Published LTDa.
- 3 GROSEMAN, M.A. & BAIN, E.C.;“**Principles of Heat Treatment**”, 5ª edition, American Society for Metals; 1964.
- 4 BAIN, EDGAR C. & PAXTON, HAROLD W. ;“**Alloying Elements in Steel**”, 2ªedition, American Society for Metals, 1961.
- 5 Norma ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, **Movimentação de cargas – Manilhas**, NBR 13545,1999.
- 6 Norma ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, **Estruturas offshore – Amarras – Requisitos**, NBR 13715, 1996.