

ANALYSIS OF TEMPCORE PROCESS: MICROSTRUCTURAL GRADIENT FORMATION AND THEIR INFLUENCE ON THE FINAL MECHANICAL PROPERTIES

COBEM2007-1416

Este artigo está sendo traduzido para o inglês (10 páginas) e se a comissão organizadora autorizar gostaríamos de ter um prazo de alguns dias para concluir esta tarefa.

Abstract. *The use of systems of controlled cooling in rolling mills improve performance in the mechanical properties of the material from defined chemical compositions, to guarantee the specifications of the product and providing economic viability of its use. This work presents a study about this process through of identification and analysis of the microstructural gradient formation and their influence on the final mechanical properties of the material. There are Important -referring considerations to the speed of cooling of the material as well as too much involved parameters of process exist, that make excellent for obtained of the characteristics desired in the final product. Of this form, the microstructural characterization is associated with a matrix of dependent factors between itself, to which submitted the determined levels that supplies as resulted the desired mechanical properties. More than the characterization and analysis of a specific process, the adequate estimates of the used parameters not depend just of the type of used, but also in a model that representation of the phenomenon of heat transfer has during the process of cooling associated with the estimate of the final properties of the material.*

Keywords: *Tratamento Térmico, Thermex, Tempcore, Resfriamento Controlado, Laminação de Barras;*

1. Introdução

O desenvolvimento de sistemas de resfriamento controlado em processos de laminação tem como objetivo a redução no custo de produção de barras de aço para construção civil. Atualmente, a maioria das usinas siderúrgicas utiliza esta tecnologia em seu processo produtivo, tendo em vista as vantagens em relação ao método tradicional até então amplamente utilizado.

Até a década de 1970 havia uma forte tendência que perdurou por muitos anos no mercado europeu voltada à qualidade e desempenho no processo de fabricação de aço destinado à construção civil. As principais características solicitadas eram referentes aos patamares de tensão de escoamento, soldabilidade e ductilidade superior as dos materiais disponíveis no mercado da época. Simon *et al.*, 1984, baseados neste contexto, afirmam que com o aumento da resistência dos vergalhões verificava-se a possibilidade conseqüente da garantia de redução da quantidade aplicada de aço destinado às construções e por conseqüência no custo final das estruturas. Assunção *et al.*, 2001, mencionam que o consumo maciço de aço está nas aplicações que fazem parte desta classe e estes por sua vez, têm como fator decisivo em sua seleção a relação entre resistência associada ao custo de produção. Desta forma, as propriedades destes materiais estão situadas na região inferior das propriedades dos aços. No entanto, os mesmos, desde que corretamente aplicados e atendendo as especificações necessárias, são completamente satisfatórios e apresentam máxima economia em sua utilização.

Os sistemas de resfriamento controlados de vergalhões consistem em sua essência, no tratamento térmico de barras de aço, realizado após o último passe de laminação, o qual se subdivide em três etapas. De acordo com Rodrigues *et al.*, 1992 (apud Simon *et al.*, 1984) a barra passa através de um sistema de resfriamento em água. Consequentemente tem-se um tratamento térmico superficial, onde o material, ao ser submetido a um resfriamento brusco, sofre uma transformação em sua região externa, enquanto o seu centro permanece austenítico, posteriormente equalizando seu gradiente térmico até a temperatura ambiente. As transformações metalúrgicas associadas ao fenômeno de transferência de calor resultam em propriedades mecânicas que por sua vez podem variar em função dos parâmetros de processo

utilizados. Estes englobam diversos fatores, desde a especificação do tipo de aço a ser utilizado, até a temperatura de chegada da barra no leito de resfriamento.

Deve-se ressaltar que a utilização destes sistemas proporciona uma otimização do processo de laminação de uma forma geral, sendo considerada como uma técnica economicamente viável de utilização em usinas siderúrgicas.

A redução da temperatura das barras na saída da laminação é um dos principais fatores associados à redução de interrupções e por consequente melhoria no processo produtivo, tendo em vista que as barras após o tratamento térmico estão mais rígidas em decorrência da redução de sua temperatura. Sem os sistemas de resfriamento, as mesmas permaneceriam à altas temperaturas (temperaturas de laminação à quente), e por consequência, apresentariam uma baixa resistência e uma grande facilidade de deformação, se comparadas às propriedades do aço a temperatura ambiente. Desta forma, a possibilidade de operação com a chegada do material sob as condições anteriormente mencionadas possibilita uma considerável redução de refugo de material, além de fornecer um diferencial em qualidade tendo em vista o aspecto mais homogêneo e compacto do feixe, aqui considerado como etapa final do processo de laminação.

O trabalho aqui desenvolvido apresenta uma discussão sobre os fenômenos ocorridos durante o processo de tratamento térmico superficial de barras laminadas a quente, de modo a estabelecer uma análise teórica e experimental sobre o comportamento dos principais parâmetros relevantes e significativos do processo que apresentam uma relação com as características finais do produto. Este processo apresenta diversas vantagens em sua utilização na escala industrial. O aumento da resistência mecânica do material através de um tratamento térmico superficial permite a diminuição do teor de Carbono na composição das ligas e propicia um menor custo para fabricação do produto desde a matéria prima, além de um diferencial em qualidade, devido à sua soldabilidade. O objetivo geral deste trabalho foi de identificar, analisar e estimar os parâmetros de processo do sistema de resfriamento controlado de vergalhões de usinas siderúrgicas de laminação a quente, de modo a estabelecer correlações entre variáveis que apresentem um prospecto significativo na formação do gradiente microestrutural e por consequência nas propriedades mecânicas finais do material. Isto é dado em decorrência de muitas aplicações na engenharia onde se almeja que gradientes microestruturais existam para compatibilizar, no mesmo componente, propriedades mecânicas e funcionalidades generalizadas que, por sua vez, seriam impossíveis de serem obtidas em componentes com uma distribuição microestrutural homogênea. Em barras de aço nervuradas destinadas à construção civil, deseja-se que o material apresente a resistência ao escoamento e limite de ruptura dentro de patamares especificados, associados simultaneamente a sua capacidade de resistência ao dobramento, de acordo com normas de fabricação de modo a padronizar seu processo produtivo. Pretende-se estabelecer a partir do desenvolvimento do mesmo, uma análise experimental de amostras de vergalhões de diferentes bitolas sob diferentes condições de operação, de modo a identificar como se comportam em meio à variação de parâmetros do processo, tais como: temperatura da barra, velocidade de laminação, pressão de água, e demais parâmetros relevantes.

2. Descrição do Processo

Quando o vergalhão passa no interior do sistema de tubos, sua superfície e seu núcleo são resfriados com velocidades diferentes de acordo com a Fig. 1. Com o sistema de tratamento térmico superficial com resfriamento controlado instalado logo após a última gaiola acabadora (último passe de laminação), a barra laminada passa pelo interior dos tubos do sistema, em contato com água, sofrendo um rápido e intenso resfriamento da sua superfície. Nessas condições, a estrutura de uma camada superficial da barra sofre transformação de austenita para martensita. Simultaneamente com o resfriamento dessa camada superficial da barra, seu núcleo apresenta um resfriamento mais lento, mantendo, no entanto, sua estrutura austenítica, durante o tempo em que a região superficial está sendo resfriada rapidamente no interior dos tubos com água, isto é, até o final da fase 1 do tratamento, conforme verificado na Fig. 1.

Quando o material deixa de ser resfriado nos tubos com água, a curva de resfriamento superficial se interrompe e essa camada da barra passa a ser reaquecida pelo calor armazenado ainda no núcleo. Essa parte correspondente à fase 2 do tratamento, até o ponto em que toda a seção fica praticamente com a mesma temperatura. Desse ponto em diante, toda a seção da barra segue se resfriando ao ar, mantendo a mesma taxa de resfriamento, seguindo a curva de variação de temperatura que corresponde a terceira e última fase do tratamento.

Através dos diagramas de Transformação Isotérmica ou curva Temperatura Tempo Transformação (TTT), uma vez determinada as curvas de resfriamento do material, pode-se identificar as transformações metalúrgicas que os aços sofrem ao serem resfriados a partir de uma temperatura inicial ao qual o material está completamente austenitizado. Para resfriamentos lentos, a exemplo de normalização, aonde as barras chegam ao leito diretamente após o último passe de laminação, observa-se a formação de uma estrutura ferrita + perlita no material, ao longo de toda a seção da barra.

Conforme representado na Fig. 1, durante a fase 1 verifica-se um tratamento térmico de têmpera na camada superficial da barra, cujo constituinte resultante é a martensita, enquanto que o núcleo, apesar do seu resfriamento, ainda se mantém com a estrutura austenítica.

Ao terminar essa fase, paralisa-se a formação de martensita da superfície e inicia-se a fase 2, quando a camada temperada passa a ser reaquecida através da transferência de calor entre núcleo e superfície, que ainda apresenta temperaturas relativamente elevadas. Desta forma, a camada temperada da barra começa a sofrer um tratamento de

auto-revenido, que irá transformar toda a martensita formada, em um constituinte conhecido como martensita revenida ou sorbita. Esse novo constituinte da camada superficial não apresenta a fragilidade da martensita, porém atinge altos limites de alongamento e de resistência.

A quantidade de martensita transformada cresce do centro para a extremidade da barra. Simon *et al.*, 1984 e Economopoulos *et al.*, 1975, em seus trabalhos afirmam que quando a barra deixa o sistema de resfriamento, surge um gradiente de temperaturas ao longo da sua seção transversal, e o calor proveniente do centro aquece a camada temperada superficialmente, ocorrendo o denominado auto-revenimento. Por último, no leito de resfriamento, a região central da barra, até então no estado austenítico, conduz calor à superfície, fazendo com que a temperatura na região central reduza gradativamente até a temperatura ambiente.

Rodrigues *et al.*, 1992, afirmam que, comprovado os três estágios, têmpera de camada superficial, auto revenimento da martensita e a transformação do centro da barra, destacam-se os principais parâmetros de controle de processo, como a taxa de vazão de água durante o resfriamento, o tempo necessário para realizar a têmpera e a temperatura de revenimento das barras do leito (Economopoulos *et al.*, 1975 e Simon *et al.*, 1990). De acordo com estes autores, verificou-se, entretanto, a existência da interdependência entre estes parâmetros, sendo que a temperatura de revenimento é a variável de controle de processo, uma vez que esta tem uma influência direta nas propriedades mecânicas do aço. Os mesmos apresentam dados referentes ao aumento da resistência mecânica com o decréscimo da temperatura de revenimento, ou aumento da taxa de vazão de água durante o resfriamento das barras de aço, cujas composições químicas podem assumir diferentes padrões. Ainda observa-se a flexibilidade do processo na fabricação das barras com diâmetros variando entre 16 e 28 mm. Por outro lado, Economopoulos *et al.*, 1975, verificaram que há uma queda na ductilidade da martensita revenida, à medida que a temperatura de revenimento decresce, porém, sem comprometer o material por trincamento superficial.

A fase 3 tem início quando a temperatura da superfície praticamente se iguala à do núcleo até que a temperatura da barra atinja cerca de 100°C ou menos, quando se completa o resfriamento do vergalhão.

Nesta fase, já com a barra tendo sido dividida pela tesoura instalada após o sistema de tratamento e descarregada no leito, completa-se o revenido da camada superficial temperada e o núcleo da barra acaba de se transformar, passando a ser constituído por uma estrutura de perlita + ferrita, de granulação fina.

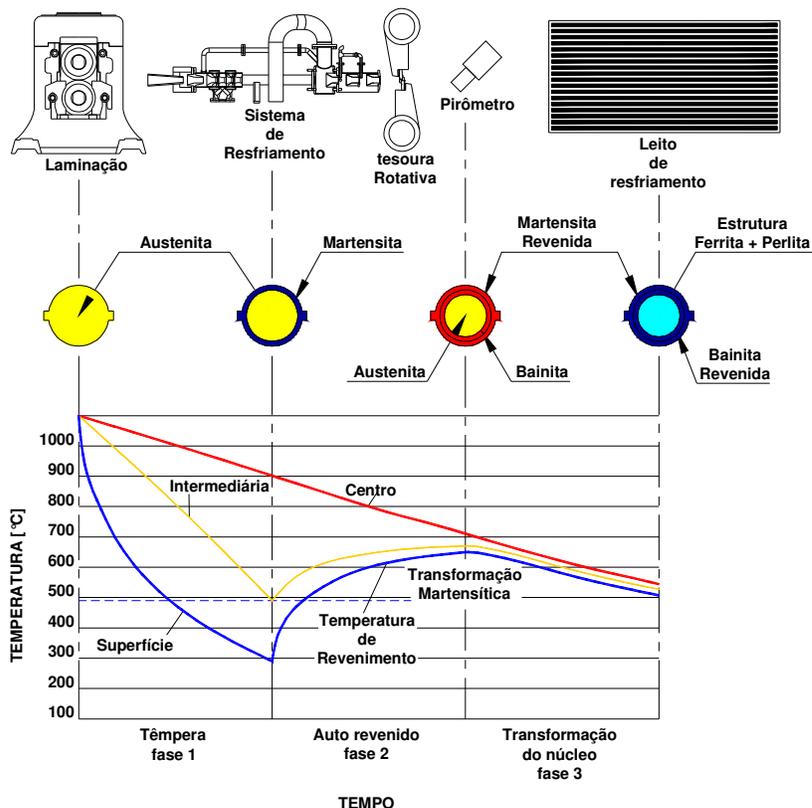


Figura 1. Curvas de variação de temperatura da barra para diferentes posições de raio durante processo de tratamento térmico superficial

O aspecto macrográfico da seção de um vergalhão representado na Fig. 2 mostra nitidamente a camada junto à superfície tratada por indução por



Figura 2. Corte em seção transversal de vergalhão com tratamento térmico superficial. Visualização das regiões afetadas através da transferência de calor.

2. 1.Processo Thermex

O Thermex é o sistema de resfriamento controlado utilizado no processo de laminação da Gerdau Guaíra e desta forma, se fez objeto de estudo para realização do presente trabalho. Todos os ensaios realizados em barras tratadas termicamente são provenientes deste sistema e suas principais peculiaridades estão discutidas a seguir.

O princípio de funcionamento dos sistemas de resfriamento controlado de barras em processos de laminação é baseado na utilização de água para realização da têmpera superficial do material.

No sistema Thermex, são utilizados tubos, também denominados canhões, onde a água troca calor com as barras tendo seu fluxo no mesmo sentido de laminação. Este sistema de troca térmica garante, por sua vez, que a barra tenha um resfriamento homogêneo em sua superfície, para garantir suas propriedades mecânicas ao final do processo.

A Fig. 3 mostra uma representação esquemática do funcionamento do canhão, com as indicações de entrada e saída da barra, passando pelas regiões de entrada, intermediária e saída de água. Os canhões do Thermex apresentam comprimento fixo de modo que suas especificações de projeto se restringem aos seus limites construtivos. Estes podem ser divididos quatro principais subconjuntos: caixa de entrada, tubos intermediários, caixa de pressão e caixa de ar.

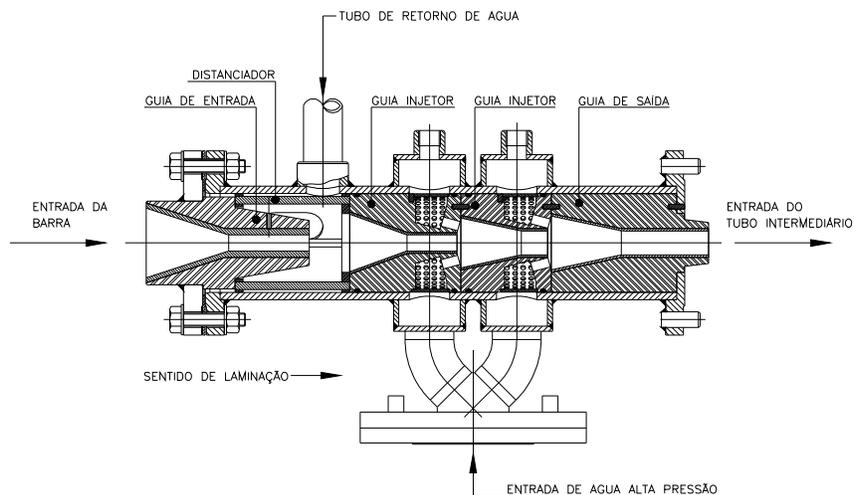


Figura 3. Corte longitudinal da caixa de entrada de água do sistema Thermex.

A água é injetada sob pressão no canhão através de guias injetoras. A Fig. 4 (A) apresenta o detalhamento destes componentes. Estes apresentam uma peneira de proteção para evitar que partículas existentes no circuito de água obstruam os bicos injetores, que podem ser visualizados no corte transversal das guias injetoras representado na Fig. 4 (B). Os bicos injetores apresentam uma inclinação em relação ao sentido de passagem da barra de modo a garantir que a incidência de água no interior da guia injetora possibilite que seu fluxo esteja no mesmo sentido da barra e ao mesmo tempo evite a formação de uma película de vapor entre a barra e a água, gerando um resfriamento ineficiente no sistema.

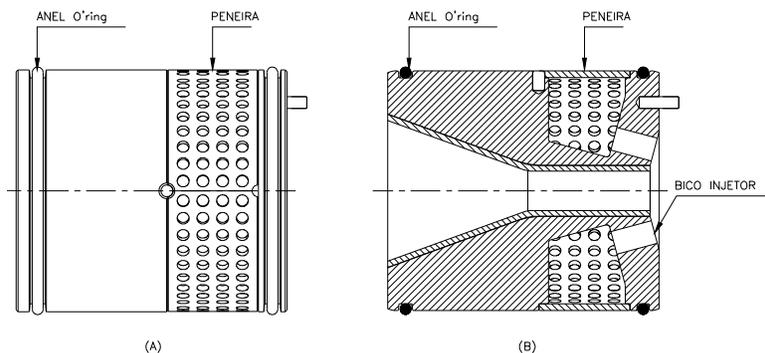


Figura 4. Detalhamento da guia injetora – sistema Thermex.

Após a passagem pela caixa de entrada, a barra destina-se, juntamente com a água injetada sob pressão, ao tubo intermediário. A Fig. 5 representa o subconjunto mencionado.

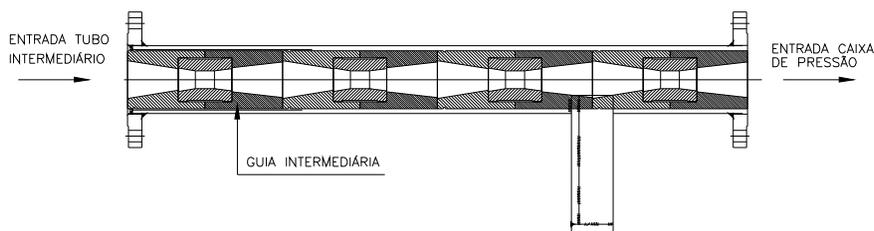


Figura 5. Tubo intermediário do sistema Thermex – corte longitudinal.

Neste local, ocorre efetivamente a troca térmica do sistema, onde a barra e a água são conduzidas no interior de guias injetoras que apresentam uma geometria característica. Estas guias, do mesmo modo que os bicos injetores formam um fluxo turbulento no sistema que possibilita o resfriamento homogêneo da barra durante sua trajetória, evitando que sejam formadas camadas de vapor entre a água e o material laminado.

A água ao chegar ao subconjunto, irá encontrar uma restrição de passagem na guia da caixa de pressão, fazendo com que a mesma se destine ao tubo de retorno de água. Este tubo está conectado na caixa de entrada, de acordo com a Fig. 3. Isto favorece que a água, ao entrar nas guias injetoras, destine-se ao mesmo sentido de laminação, evitando que grandes quantidades sejam desviadas para fora do canhão em sentido à guia de entrada. Do mesmo modo, o tubo de retorno de água, também conhecido por tubo equalizador, apresenta a finalidade de criar um selo de água na pré-câmara a fim de evitar a entrada de ar na tubulação permitindo uma completa transferência de calor para a barra e consequentemente evitando possíveis empenamentos na mesma. Tendo em vista que a dimensão do tubo de retorno de água para a caixa de entrada apresenta um dimensionamento relativamente pequeno para suprir toda vazão proveniente das guias injetoras, existe um tubo de saída de água, a qual, após ultrapassar a pressão equivalente à altura de coluna de água para saída, destina o excesso de água para fora do sistema.

Após a passagem da barra pela caixa de pressão, a mesma destina-se ao subconjunto denominado caixa de ar. Neste subconjunto, tem-se basicamente uma entrada de ar comprimido que por sua vez é responsável pela formação de uma cortina de ar que impede que a água proveniente da caixa de pressão ainda remanescente acompanhe a barra laminada após o canhão.

Deve-se ressaltar que apesar de seu princípio construtivo relativamente simples, sua funcionalidade está associada, assim como os demais componentes discutidos nesta seção, a garantia de um resfriamento homogêneo da barra, de modo a evitar que a água em excesso entre em contato com a barra mesmo após a saída do canhão.

3. Resultados

3.1 Ensaios de Tração

Apresentam-se os resultados dos ensaios de tração realizados. Para os mesmos, são dadas as descrições dos valores de massa linear, tensões de escoamento e ruptura, relação elástica, alongamento e parâmetros do processo de laminação, como velocidade da linha, temperatura de equalização das barras em sua chegada ao leito, assim como pressão de operação do sistema Thermex.

A Tab. 1 apresenta os resultados dos ensaios de barras, nas bitolas 8 mm, 10 mm, 12,5 mm, 16 mm, 20 mm e 25 mm, produzidas de acordo com a norma NBR 7480/96 – CA50 . Pode-se verificar, de uma forma geral, que tanto para os resultados de tensão de escoamento como de ruptura, as barras apresentam uma tendência decrescente dos seus valores em função da bitola produzida.

Verifica-se que os resultados obtidos apresentam uma boa margem de segurança em relação ao limites inferiores de especificação para as tensões solicitadas. Do mesmo modo, os valores de alongamento apresentaram resultados acima da especificação de 8% solicitada.

Conforme já mencionado anteriormente, o tratamento térmico superficial de barras atua diretamente no aumento da resistência do material, reduzindo os valores de alongamento. No entanto, podemos verificar que, apesar deste efeito, pode-se trabalhar com parâmetros de processo otimizados, garantindo todas as especificações solicitadas com uma boa margem de segurança, necessária para estabilidade de todo e qualquer processo produtivo em larga escala.

Ainda referente aos resultados dos ensaios de tração para as bitolas CA50 – NBR 7480/96, pode-se constatar a relação existente entre a temperatura de revenimento do material e os resultados da tensão de escoamento. A nível ilustrativo, pode-se verificar que a bitola 8 mm apresenta uma média de tensão de escoamento de 605 MPa e tensão de ruptura de 704,5 MPa. Neste caso verifica-se uma temperatura de equalização média de 591°C. Para a bitola de 25 mm, as faixas de tensão de escoamento e ruptura apresentam patamares inferiores, com uma média de 563,1 MPa e 676,6 MPa respectivamente. A média da temperatura de equalização para esta bitola foi de 602°C, o que caracteriza a chegada do material mais quente no leito de resfriamento e por consequência, apesar de se identificar um aumento de resistência relevante, este se faz menos significativo do que o verificado na bitola 8 mm.

Tabela 1 Ensaios de Tração – Amostras CA50 – NBR 7480/96.

Bitola [mm]	Massa Linear [kg/m]	Tensão Escoamento [MPa]	Tensão Ruptura [MPa]	Relação Elástica [Rup/Esc]	Alongamento [%]	Velocidade Laminação [m/s]	Temperatura Equalização [°C]	Pressão Thermex [bar]	
8	Média	0,393	605,0	704,5	1,16	14,9	7,9	591	11,1
	Desvio Padrão	0,003	16,6	15,2	0,02	1,6	0,2	17	2,0
10	Média	0,616	598,5	708,5	1,18	15,2	8,0	587	10,9
	Desvio Padrão	0,006	18,3	18,8	0,02	1,4	0,4	34	1,6
12,5	Média	0,959	606,6	720,0	1,19	13,5	7,4	585	8,0
	Desvio Padrão	0,006	14,0	14,9	0,02	1,1	0,3	14	2,0
16	Média	1,576	585,5	694,9	1,19	12,9	7,5	578	5,7
	Desvio Padrão	0,012	16,9	19,7	0,02	1,2	0,2	6	0,7
20	Média	2,469	575,2	686,5	1,19	13,7	6,5	592	10,2
	Desvio Padrão	0,018	11,4	13,1	0,02	1,0	0,2	6	1,1
25	Média	3,876	563,1	676,6	1,20	13,0	5,0	602	15,8
	Desvio Padrão	0,025	12,1	13,7	0,02	0,9	0,2	6	0,8

Tamm, 2003, apresenta curvas com o comportamento da tensão de escoamento e ruptura das barras em função da temperatura de equalização. A Fig. 6 apresenta os resultados teóricos fornecidos no manual técnico com um comparativo de ensaios experimentais realizados. A redução da resistência do material é constatada a partir dos resultados experimentais apresentados coincidindo com os dados de Tamm, 2003. Neste sentido, quanto maior for a temperatura de equalização do material, menor será a taxa de resfriamento nas barras.

Note-se que os limites de operação permissíveis para temperatura de equalização das barras estão compreendidos entre 560°C à 610°C. Apesar de ser esta faixa de trabalho relativamente estreita, constata-se tal tendência.

Análoga a análise realizada na Fig.6, a Fig 7 apresenta os resultados obtidos para o alongamento do material em função da temperatura de equalização, na qual se verifica que para menores taxas de resfriamento do material os valores de alongamento do mesmo apresentam uma tendência crescente, o que comprova o aumento da rigidez e redução de sua ductilidade quanto maior for a intensidade do tratamento térmico. De acordo com os resultados experimentais obtidos, tem-se que a tendência dos mesmos se apresenta inferior aos descritos por Tamm, 2003.

De forma geral, o efeito da temperatura de equalização sobre o alongamento do material não apresentou uma visualização tão evidente quanto seu efeito sobre a tensão do material representado na Fig. 6. Isto é dado em decorrência da reduzida faixa de temperatura de equalização permitida para operação. Outro fator relevante é que a

visão geral do comportamento de todas as bitolas não permite identificar a tendência crescente de alongamento quanto maior a temperatura de equalização. No entanto, com a verificação das bitolas individualmente, pode-se verificar que os valores de alongamento individual por bitola são crescentes mesmo para pequenas diferenças de temperatura, a exemplo das bitolas 12,5 mm e 25 mm.

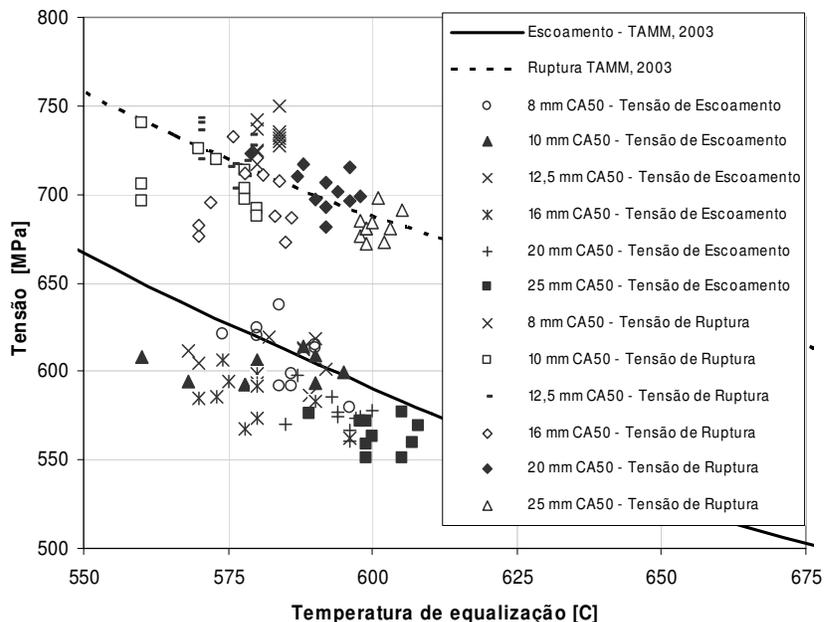


Figura 6. Efeito da temperatura de equalização na tensão de escoamento e ruptura.

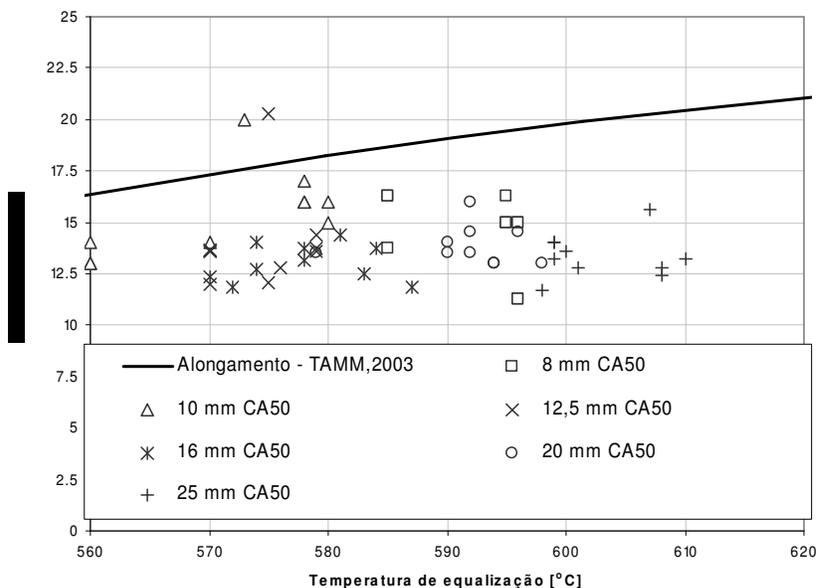


Figura 7. Efeito da temperatura de equalização no alongamento das barras.

Dentre os resultados dos ensaios de tração das barras, foi identificado que um dos fatores significativos para sua determinação é a temperatura do tarugo, sendo que sua variação tem influência direta nos patamares de escoamento, ruptura e demais propriedades. No processo de laminação, existem algumas considerações sobre a temperatura do tarugo e das barras durante as etapas de deformação, havendo um perfil de temperaturas, nas quais as extremidades das mesmas apresentam valores inferiores às demais regiões. A Fig. 8 apresenta o resultado de ensaios de amostras de barras, caracterizando o comprimento de um tarugo. Os ensaios A, B, C e D são referentes às barras de cabeça, ou seja, as primeiras barras do tarugo que chegam ao leito de resfriamento.

Analogamente, as amostras E, F, G e H são referentes às amostras de barras de cauda. Pode-se verificar que as amostras referentes às extremidades do tarugo (barras de cabeça e barras de cauda), apresentam maiores valores de tensão de escoamento, o que comprova a hipótese de uma menor temperatura em tais regiões. Tais variações chegam à ordem de 60 MPa. De acordo com sistemática de procedimentos internos, para verificação das propriedades de tração, não são coletadas amostras de cabeça e cauda, pois estas, por apresentarem maiores de valor de escoamento, podem atender as especificações da norma enquanto as barras de “meio” podem estar abaixo das especificações. Estes ensaios apresentam considerações normativas específicas, descritas na documentação técnica anteriormente citada.

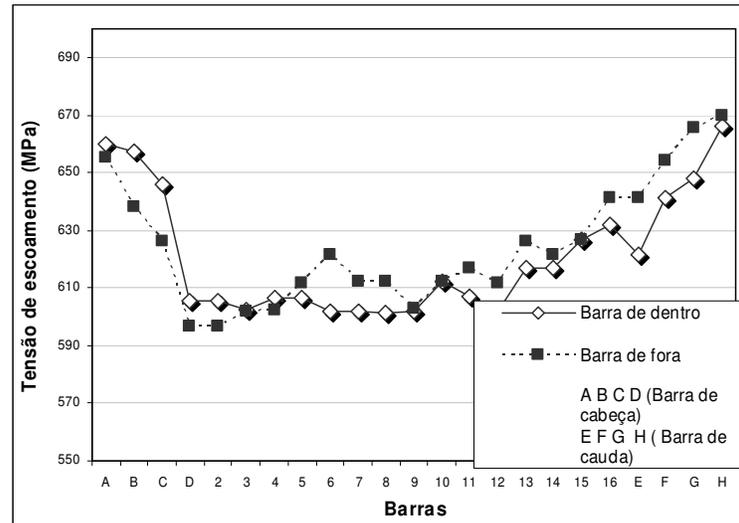


Figura 8. Efeito das variações da temperatura do tarugo na tensão de escoamento.

3.2. Ensaios de Microdureza

Os resultados dos ensaios realizados caracterizam o perfil de microdureza das barras nas bitolas 8 mm, 10 mm, 12,5 mm, 16 mm, 20 mm e 25 mm. Verifica-se que o tratamento térmico superficial das barras realiza um efeito de endurecimento superficial, com dureza entre 275 e 310 HV. Após a camada superficial, pode-se constatar uma queda significativa dos valores de dureza, os quais chegam a atingir níveis entre 175 HV e 200 HV. Estes valores são os comumente encontrados na literatura, referentes à dureza dos aços normalizados com a mesma composição química (Unterwiser *et al.*, 1998). Note-se que apesar da variação existente entre os níveis de dureza para as amostras de diferentes bitolas encontradas, o aspecto geral do perfil de dureza faz-se com o mesmo aspecto.

Referente aos ensaios de microdureza, deve-se fazer algumas considerações a respeito do perfil obtido. Todas as amostras analisadas são provenientes de um processo produtivo em larga escala e este, assim como todos os processos industriais existentes, apresentam variações normais de operação provenientes de subprocessos, como por exemplo, reaquecimento de tarugos, temperatura da água de refrigeração, faixas de composição química do material laminado, condições do ambiente, associação de erros aleatórios de medição, dentre outros.

A combinação de tais fatores pode ser verificada através das variações normais identificadas nas medições realizadas. No entanto, é importante destacar que a influência de tais fatores somente pode ser visualizada se os níveis de variação ao qual este for submetido seja suficientemente significativo, de modo que suas variações sejam superiores àquelas verificadas normalmente nos processos industriais padronizados.

A Fig. 9 apresenta os resultados dos perfis de microdureza em escala Vickers com comparativo entre bitolas CA50 e resultados de Nikolaou *et al.*, 2004, para amostras de barras de 8 mm e 12 mm. Verifica-se, conforme mencionado, que de uma forma geral, todas as amostras apresentam o mesmo perfil normalizado de dureza, tendo em vista as discussões já realizadas referentes às suas diferenças as quais se conclui que são provenientes das variações normais do processo.

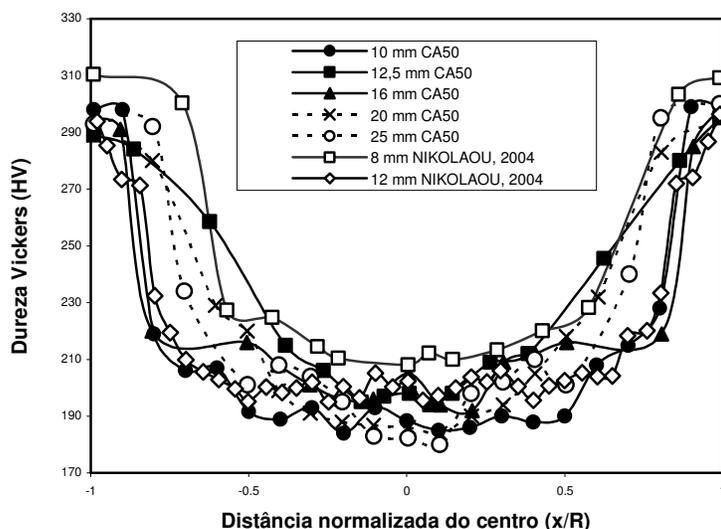


Figura 9. Perfis de dureza normalizado de barras CA50 – NBR7480.

3.3. Determinação dos diagramas CCT e temperabilidade

A construção do diagrama CCT para amostras de aço GG-1026A, através do simulador termomecânico Gleeble, está representada na Fig. 10. Pode-se verificar as curvas de resfriamento onde 24 amostras foram submetidas com os valores correspondentes de dureza medidos em sua região central. Tais curvas são representadas em função da taxa de resfriamento em K/s. As letras iniciais das legendas são referentes às temperaturas de início de formação de ferrita (F start), perlita (P start), bainita (B start) e martensita (Ms), sendo indicados também o final de transformação de perlita (P finish) e bainita (B finish).

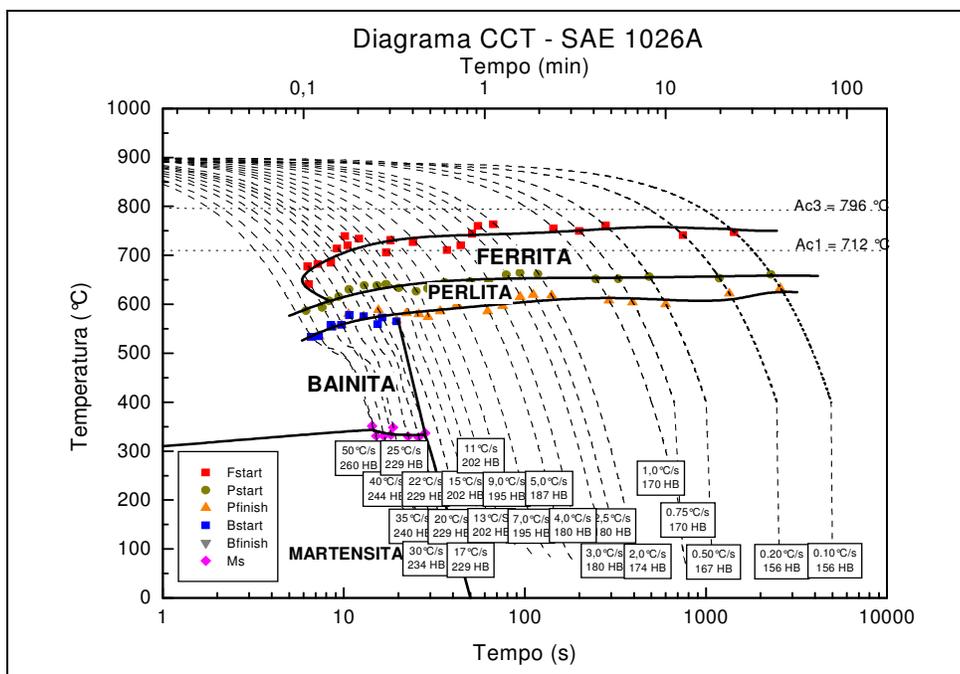


Figura 10. Determinação do diagrama CCT para amostras GG-1026A – Simulador Termomecânico Gleeble.

A determinação das temperaturas de transformação microestrutural foi realizada via software do simulador termomecânico a partir da curva da derivada segunda da curva de temperatura vs. dilatação, sendo que os pontos onde ocorre inflexão nesta curva, representam às temperaturas onde ocorrem as mudanças microestruturais. A Figura 11

apresenta a curva temperatura vs. dilatação, com a taxa de redução de temperatura de 30 0K/s, através da análise via segunda derivada.

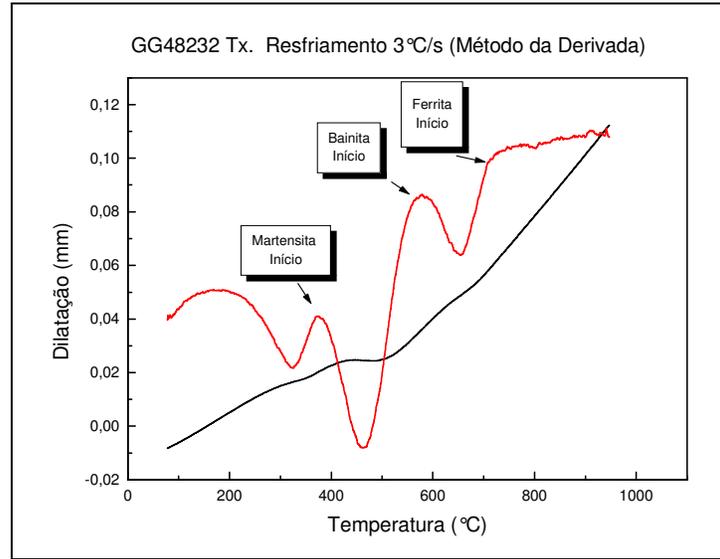


Figura 11. Determinação das temperaturas de transformação – Método da derivada segunda - Simulador Termomecânico Gleeble.

As curvas de transformação de fases também foram determinadas através da derivada primeira da curva temperatura vs. deformação. Para a análise neste método, marca-se um ponto na curva de dilatação vs. temperatura, próximo ao ponto onde esteja ocorrendo à transformação e o software determina uma reta tangente a este ponto na curva, sendo que a mudança microestrutural estará iniciando (ou terminando) quando a reta tangente coincidir com os valores da curva de dilatação vs. temperatura.

A Fig. 12 apresenta a curva temperatura vs. deformação para a mesma condição de taxa de redução de temperatura (30 K/s), e a determinação das temperaturas de início e fim de transformação de bainita. Note que a faixa de temperatura compreendida para o início e término de formação de bainita são os mesmos para as Fig.s 11 e 12. O conjunto das curvas de temperatura vs. deformação para diversas taxas de redução de temperatura fornece o diagrama CCT do material analisado.

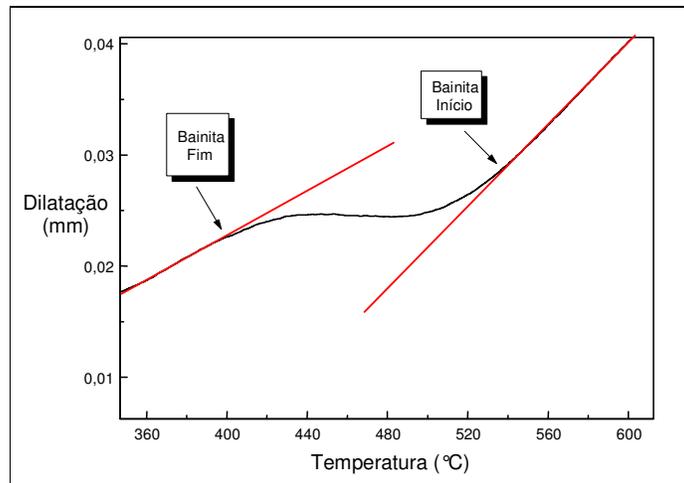


Figura 12. Determinação das temperaturas de transformação – Método da derivada primeira - Simulador Termomecânico Gleeble.

A partir da construção do diagrama CCT para o aço GG-1026A, pode-se estimar a formação microestrutural das barras durante o processo de tratamento térmico através da sobreposição das curvas de resfriamento das barras no diagrama formado. A Fig. 13 representa os resultados da construção do diagrama CCT, com comparativo encontrado na

literatura para o aço SAE 1026 (Unetrwiser, 1998). Note-se que estão representadas as temperaturas críticas de transformação (AC1 e AC3). Os pontos referentes ao início e final de formação microestrutural estão indicados sobre a forma FS (início de formação de ferrita), PS (início de formação de perlita), BS (início de formação de bainita), MS (início de formação de martensita) e PF (final de formação de perlita). As curvas Temp centro e Temp superficial referem-se aos valores teóricos de resfriamento da barra no centro e superfície respectivamente (Tamm, 2003). A representação do diagrama CCT em linhas cheias refere-se aos dados teóricos de Unterwiser, 1998.

Pode-se verificar dentre os resultados teóricos e experimentais obtidos, as principais variações existentes foram no início de formação de martensita e final de formação de perlita do material. Para o primeiro, os valores experimentais apresentam um retardo no início de sua formação, ou seja, a temperatura de início de formação de martensita (MS) está abaixo dos valores teóricos comparativos, com uma variação de aproximadamente 30°C. Para o final de formação de perlita (PF) e início de formação de bainita, verifica-se que os dados experimentais apresentam valores superiores aos dados teóricos analisados.

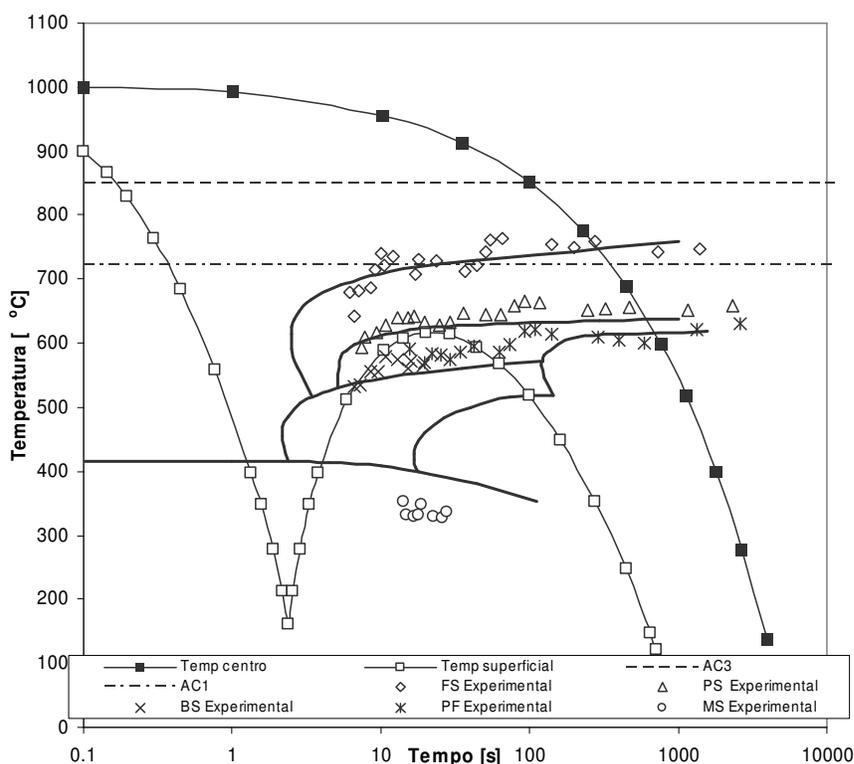


Figura 13. Representação da formação microestrutural – Diagrama CCT e curvas de resfriamento.

A partir das análises realizadas, a caracterização da camada superficial tratada termicamente também pode ser representada a partir das curvas de resfriamento representadas na Fig. 10. Desta forma, partindo dos valores de taxa de resfriamento geradas pelo Gleeble e associando aos respectivos resultados de medição de dureza das barras, pode-se representar a relação dureza – taxa de resfriamento, conforme representado na Fig. 14. Verifica-se que ao aumentarmos a taxa de resfriamento do material, o mesmo apresenta gradualmente um crescimento da dureza resultante. No entanto, verifica-se que entre as taxas de resfriamento de 15 K/s e 17 K/s há um degrau entre o perfil de dureza (conforme indicação), que por sua vez representa a faixa de início de formação de martensita no material. É importante ressaltar que de acordo com a Fig. 10, a consideração mencionada se faz relevante tendo em vista que de acordo com o diagrama gerado, a taxa de resfriamento limite para o final de formação de martensita está compreendida justamente entre estas faixas de resfriamento. Note-se que de acordo com a descrição contida na Seção 4.2.3, a realização dos ensaios de dureza foram realizados em escala Brinell. Para uma maior facilidade a nível comparativo com os dados analisados, os resultados foram convertidos para escala Vickers.

Os resultados dos ensaios de temperabilidade do material estão representados na Fig. 15. Pode-se verificar que de acordo os resultados obtidos, as amostras GG-1026A apresentam uma dureza máxima de 49 HRC, o que corresponde a aproximadamente 498 HV. As barras submetidas a tratamento térmico superficial apresentam uma dureza máxima em sua superfície de 310 HV.

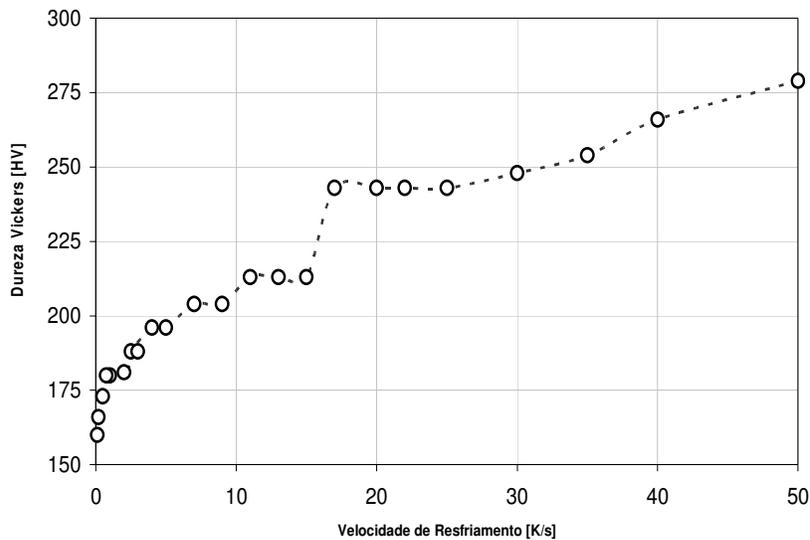


Figura 14. Efeito da velocidade de resfriamento sobre a dureza do material.

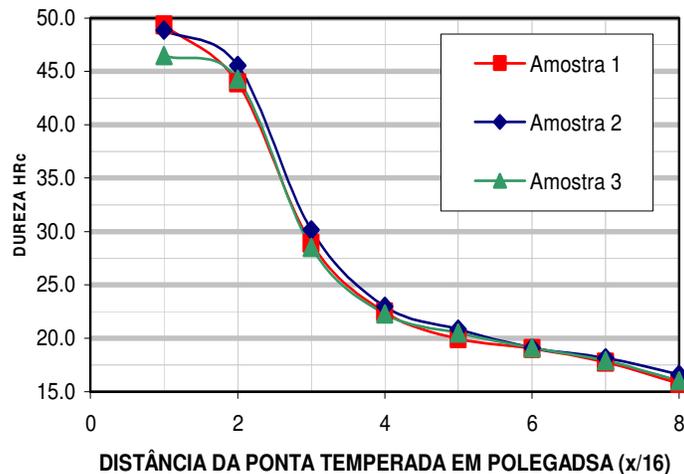


Figura 15. Ensaios de temperabilidade Jominy para amostras de GG-1026A.

Os valores do ensaio de temperabilidade têm o intuito de apresentar a variação existente entre perfil obtido e a máxima dureza adquirida com o resfriamento com água. Esta diferença representa o efeito do auto revenimento do material existente logo após a barra não estar mais em contato com a água. Desta forma, pode-se constatar que apesar das barras serem submetidas a um intenso resfriamento em sua superfície durante o processo de laminação, a sua dureza resultante não irá atingir valores relativamente elevados, não elevando seu nível de resistência até os limites máximos possíveis.

Deve-se ressaltar que o auto revenimento é uma condição desejável ao tratamento térmico superficial das barras, pois o mesmo atua nas tensões residuais de têmpera, reduzindo a formação de trincas, normalmente verificadas no material temperado. Do mesmo modo, atua de forma positiva com o aumento da ductilidade do material, o que possibilita que o mesmo, seja passível de ensaios de dobramento sem que ocorra ruptura ou trincamento. De uma forma geral, os sistemas de tratamento térmico de vergalhões, ao realizarem a têmpera superficial no material seguido do auto revenimento, proporcionam as propriedades desejadas ao final do processo, que consistem no aumento de resistência mecânica sem perder a ductilidade, que por sua vez naturalmente, são condições que se comportam uma inversamente em relação à outra.

4. Conclusões

Com o uso dos sistemas de tratamento térmico em linha, consegue-se produzir vergalhões com as características mecânicas de limite de escoamento e de ruptura exigidos pelas especificações das normas existentes, usando composições químicas mais comuns, em função da redução e eliminação do uso de ligas de alto custo, apresentando,

desta forma, uma vantagem econômica ao processo. Devido ao mesmo motivo, pelo fato dos vergalhões produzidos exigirem teores de Carbono inferiores aos que são utilizados nos produtos sem tratamento, estes apresentam melhor soldabilidade.

Apesar do processo de tratamento térmico apresentar similaridade com o processo de têmpera convencional, pode-se verificar através da comparação com os ensaios Jominy realizados que o mesmo apresenta diferentes perfis de dureza, assim como os constituintes microestruturais em suas regiões.

Verifica-se que ao utilizar o Thermex na produção de aço para construção civil (vergalhões), todos os requisitos da norma continuaram sendo atendidos, apesar de se observar uma redução no alongamento e na relação elástica se comparado com o material laminado a quente. Foi constatado um aumento da resistência mecânica do material e este deve ser controlado de modo que o mesmo não ultrapasse as especificações da norma, em virtude da utilização de aços com maiores de teores de Carbono para garantia de obtenção elástica do material.

Conclui-se que os conceitos clássicos de obtenção de altas relações elásticas em barras laminadas realizados somente através da laminação sem a utilização de resfriamento controlado são ultrapassados, tendo em vista as condições e especificações solicitadas pela norma, a exemplo do atendimento específicos das normas JS33:1999 e NCh 204:77 com utilização de água.

A relação elástica do material pode ser elevada aumentando o teor de Carbono do aço ou reduzindo a pressão de água de trabalho. Note-se que conforme verificado, o resfriamento é por sua vez mais significativo, mas limitado em decorrência da possibilidade de empenamento de barras para baixas pressões. Desta forma, o aumento do teor de Carbono do material é uma alternativa eficaz para atendimento da norma e produção com utilização de resfriamento controlado.

A redução do comprimento dos tubos intermediários dos canhões do Thermex garante a redução do tempo de permanência do material em contato com água, diminuindo a taxa de resfriamento do mesmo, sem que seja necessário, no entanto, reduzir a pressão normal de trabalho. Esta alternativa permite que o material possa ser laminado com resfriamento em linha com aços de maior temperabilidade e, ao mesmo tempo, com níveis adequados de pressão de trabalho, sem que a tensão de escoamento do material ultrapasse o limite superior de especificação.

A viabilidade de produção de vergalhões com alta relação elástica utilizando sistemas de tratamento térmico em linha depende sensivelmente de uma série de fatores que associados podem gerar problemas crônicos, assim como diversas dificuldades. Devem-se levar em consideração alguns pontos importantes que podem ter um significado positivo no resultado final do processo, tais como a padronização de velocidade da linha de laminação, controle da temperatura do tarugo, temperatura da água de entrada do thermex, dentre outros.

10. Referências Bibliográficas

- Assunção, F.C.R.; Silva A.L.V., 2001, "Seleção e Aplicação de Aços", Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, p. 255.
- Economopoulos, M.; Respen, Y.; Lessel, G.; Steffes, G., 1975, "Application of TEMPCORE Process to the Fabrication of High Yield Strength Concrete Reinforcing Bars", CRM, Vol. 45, p. 01-17.
- Nikolaou, J.; Papadimitriou, G.D., 2004, "Impact toughness steels produced by (i) the Tempcore process and (ii) microalloyins with vanadium". International Journal of Impact Engineering. Article in press.
- Nikolaou, J.; Papadimitriou, G.D., 2004, "Microstructures and mechanical properties after heating reinforcing 500MPa class weldable steels produced by various processes (Tempcore, microalloyed with vanadium and work-hardened)". Construction and Building Materials Vol.18 p. 243-254,.
- Rodrigues, P.C.; Celtin, P.R.; Silva, A.P.; Aguiar, M.T.P., 1992, "Perfil de Temperaturas em Barras de Aço para Construção Civil Fabricadas Pelo Processo Tempcore". Congresso Anual ABM, 47º, Vol.04 p. 505-521.
- Simon, P., 1990, Optimization of Tempcore installations for rebars. Metallurgical Plant and Technology International. Vol. 02. p. 61-69.
- Simon, P.; Economopoulos, M.; Nilles, P., 1984, "Tempcore: A new Process for the production of High-Quality Reinforcing Bars", Iron and Steel Engineering, p. 53-57.
- Tamm, H., 2003, "Manual Técnico Thermex – HSE", Hennigsdorfer Stahl Engineering, 28p.
- Unterweiser, P.M.; Boyer, H.E.; Kubbs, J.J., 1998, "Heat Treater's Guide – Standard Practices and Procedures for Steel". American Society for Metals ASM Handbook.

11. Nota de Responsabilidade

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso incluso neste artigo.