

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA MARTENSITA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO CA-50 TRATADO TERMICAMENTE VIA THERMEX® *

Soraia KarolinneCastroSilva¹
AntonioAldenor Pinheiro Neto²
Marcelo José Gomes da Silva⁶

Resumo

O atendimento das propriedades mecânicas das barras de aço produzidas via o processo de laminação a quente é um ponto indiscutível no quesito qualidade do material, e também uma obrigatoriedade. Para que seja possível esse atendimento das propriedades, existem alguns meios que são utilizados de acordo com o layout do processo ou a composição química do aço, como o Thermex®, que consiste de um resfriamento brusco na área superficial das barras de aço, através do contato com um turbilhão de água por um intervalo curto de tempo. Esse resfriamento superficial brusco faz com que a estrutura cristalina do aço sofra deformações e forme uma estrutura martensítica superficial, bastante resistente e dura. Dessa forma, o presente trabalho utiliza-se de técnicas para caracterização de fases, ensaios mecânicos de tração e microdureza, para identificar e analisar a influência da martensita, formada através do processo Thermex®, nas propriedades mecânicas das barras de aço.

Palavras-chave: Laminação a quente; Martensita; Thermex; Barras de aço.

ANALYSIS OF MARTENSITE'S INFLUENCE ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF CA-50 TREATED THERMICALLY BY THERMEX®

Abstract

The mechanical properties of the steel bars produced by the hot rolling process is an indisputable point in the quality of the material, and also an obligation. In order to be able to service the properties, there are some ways that are used according to the process layout or the chemical composition of the steel, such as Thermex®, which consists of abrupt cooling in the surface area of the steel bars, through contact with a whirl of water for a short time. This abrupt surface cooling causes the crystalline structure of the steel to go through deformation and form a very strong and hard surface martensitic structure. Thus, this paper uses techniques of phase characterization, mechanical tensile tests and microhardness tests to identify and analyze the influence of martensite formed by the Thermex® process on the mechanical properties of steel bars.

Keywords: Hot rolling; Martensite; Thermex; Steel bars.

¹ *Bacharel em Ciências Contábeis – UFC, Graduanda em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFC, Bolsista CNPq-UFC no Laboratório de Caracterização de Materiais - LACAM, Fortaleza, Ceará, Brasil.*

² *Graduando em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFC, Supervisor de Laminação no Grupo Gerdau Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil.*

³ Engenharia Nuclear, Doutor, professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Caucaia, Ceará, Brasil.

⁴

1 INTRODUÇÃO

O mercado do setor siderúrgico nos últimos anos vem mostrando um elevado recuo em relação ao consumo dos aços longos, isso muito interligado a desaceleração do crescimento da China e a forte crise econômica, que assolou principalmente o nível de classe média da população brasileira.

Mesmo com essa diminuição de consumo de aço, muitas indústrias siderúrgicas ainda prevalecem vivas com suas produções em série de vergalhões de aço, principal produto utilizado no setor da construção civil, que está entre os quatro maiores setores em consumo de aço no Brasil.

Para manter a competitividade no mercado, é necessário a produção de um produto com qualidade e para que a mesma seja garantida, é necessário que se entenda tecnicamente as características intrínsecas presentes no material. Características essas que podem ser qualificadas e quantificadas com análises em laboratórios especializados.

Partindo desse pressuposto, este trabalho tem o objetivo de identificar e analisar a influência da fase martensita, formada na superfície dos vergalhões através do processo Thermex®, observando suas propriedades mecânicas, microdureza, fratura e micrografias.

Para isso, foram utilizadas amostras de vergalhões de 6 lotes diferentes de aço CA50, de bitola de 10 mm, com uma mesma composição química, e produzidas pelo processo de laminação a quente, tendo como tratamento térmico o processo Thermex®.

1.1. Laminação à Quente

O processo de laminação a quente consta da conformação mecânica do aço em temperaturas acima da recristalização do material, para que seja garantido a recristalização dos grãos durante a deformação plástica. Os produtos produzidos via laminação a quente podem ser chapas, barras mecânicas, perfis e vergalhões e pode-se obter boas tolerâncias dimensionais desses produtos via esse processo.

O material a ser laminado precisa-se inicialmente ser aquecido até cerca de 1100 °C em um forno de reaquecimento de tarugos contínuo, que normalmente utiliza-se a mistura de gás natural com ar para a formação de chama e conseqüentemente o aquecimento do tarugo de aço que é fornecido pela Aciaria. Para ser conformado, o material passa entre dois cilindros para se obter os dimensionais desejados, cilindros esses que podem ser de diferentes materiais dependendo da dimensão que o aço será deformado, da tolerância dimensional do passe a ser laminado e do aspecto superficial do material, de acordo com o exemplo da Figura 1.

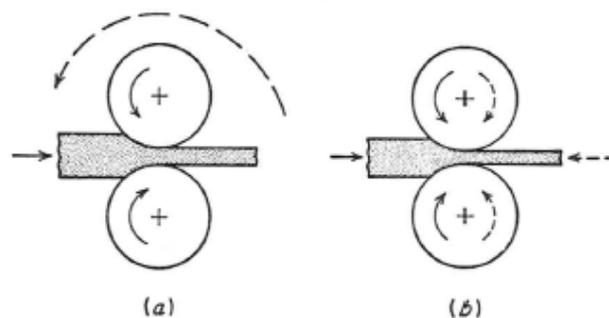


Figura 1. Layout de barra laminado entre cilindros

Para que o processo de laminação seja completo, é necessário uma série de equipamentos chamados de gaiolas, nos quais são constituídos por um conjunto de cilindros de laminação, mancais e cassetes para fixação dos cilindros, eixos cardans e motores para fornecerem a potência necessária aos cilindros para que girem na velocidade necessária para o controle de velocidade e permitam o agarre do material. Como mostra a Figura 2, a cada gaiola o material tem sua seção transversal reduzida e obtém diferentes formas geométricas até se obter a área desejada, com dimensional e tolerâncias dentro das normas técnicas.

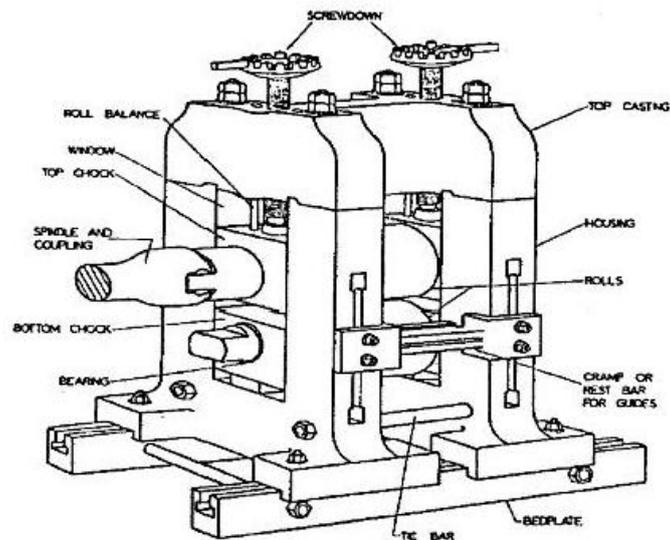


Figura 2. Exemplo de estrutura de gaiola de laminação

1.2. Barras de aço CA-50

As barras de aço CA-50 ou comercialmente chamadas de vergalhão, são comercializadas nas formas de material reto de 12 metros de comprimento ou dobrado de 6 metros e na forma de rolos, com um peso máximo normatizado de 1100 toneladas por feixe produzido.

Segundo a norma de referência para barras e fios de aço ABNT/NBR 7480/96, os vergalhões devem atender as seguintes características para estarem aptos a venda. Propriedades mecânicas, como limite de escoamento (LE) e limite de resistência (LR), massa linear, características físicas das nervuras e friso e uma tolerância máxima de ovalização.

As propriedades mecânicas são avaliadas no momento da produção das barras de aço, através de uma amostragem de barras selecionadas em um lote. Os ensaios devem ser feitos em uma sala de ambiente controlado e que tenha o mínimo de interferência de causas externas que possam prejudicar o ensaio a ser realizado.

1.2.1. Propriedades Mecânicas

O limite de resistência a tração e o limite de escoamento são avaliados através do ensaio de tração das barras de aço produzidas, que consiste de um esforço trativo ao longo do eixo longitudinal da barra por meio de máquina que segura a barra com garras pneumáticas.

Uma tensão é aplicada no material até que se alcance a ruptura do mesmo, durante a aplicação da tensão é avaliado o comportamento de deformação da barra com

relação ao esforço externo que ela está sofrendo. Utilizando essa relação de tensão e deformação, conseguimos criar um gráfico que leva o nome das duas variáveis, gráfico tensão x deformação, onde se tem os a tensão aplicada no material no eixo das ordenadas e a deformação no eixo das abcissas.

Avaliando a curva que se forma no gráfico, podemos quantificar os valores de LE e LR. No ponto que se interrompe o comportamento linear do gráfico temos o fim da fase elástica do material, área que se aplica a Lei de Hooke e também ponto que se referência o valor do limite de escoamento. Já na fase plástica do material pode-se identificar o ponto onde se tem o limite de resistência a tração, que é o maior valor de tensão aplicada ao material, como é observado na Figura 3.

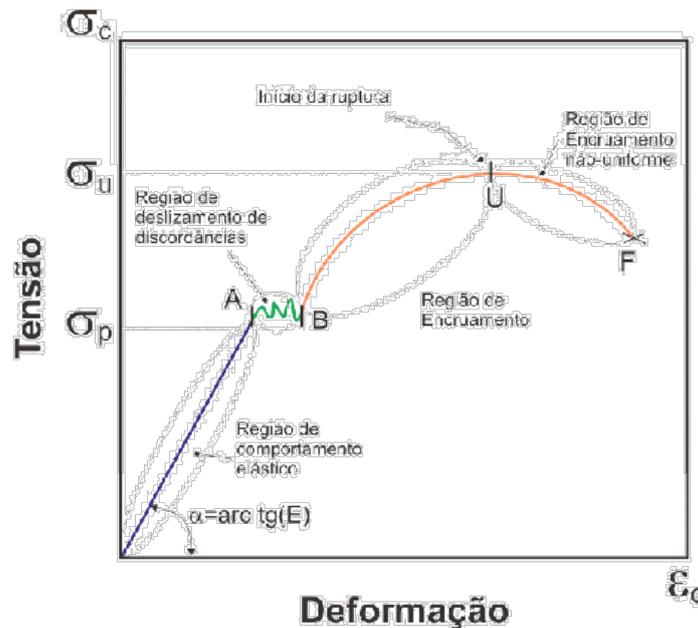


Figura 3. Gráfico Tensão x Deformação

1.3. Thermex®

O processo thermex dentro do layout de laminação encontra-se logo após ao último passe de deformação sofrido pelo material laminado, onde ainda encontra-se com uma temperatura acima da temperatura de austenitização. O equipamento consiste de um conjunto de tubos que possuem engates para mangueiras de água e ar comprimido e acima de uma estrutura de aço com função de suporte e alinhamento dos tubos com a linha de laminação. Por dentro dos tubos há a passagem de água com vazão e pressão definidas para garantir a formação de um escoamento turbulento capaz de retirar o calor necessário do material laminado e atingir a velocidade de resfriamento adequada para a formação da martensita de acordo com o diagrama TRC do material (MACIEL, 2016). [1]

A velocidade com que a barra passa pelos tubos do thermex pode chegar a 10000 mm/s, deixando um curto espaço de tempo para que o fenômeno de resfriamento possa ser concluído.

Após o resfriamento brusco no Thermex®, o material é direcionado ao leito de resfriamento por meio de caminhos de rolos automáticos, onde sofrerá um resfriamento mais lento até ser cortado nos comprimentos que são disponibilizados no mercado. Durante esse resfriamento lento no leito, a martensita superficial formada durante a passagem nos tubos do Thermex® sofre um revenimento, no qual as tensões residuais acumuladas devido a deformação da rede cristalina, são

aliviadas e assim diminuindo a fragilidade excessiva da martensita permitindo a adequação da dureza do material para aplicação de práticas específicas, no caso de barras de aço aplicação na construção civil.

Devido o resfriamento mais lento que o núcleo das barras de aço sofre, as fases que se formam possuem maior ductilidade que a martensita, entre elas pode-se citar a perlita e a bainita, que são caracterizadas por se formarem com taxas de resfriamento bem mais lentas quando comparada às da martensita, com esse balanço microestrutural presente nas barras de aço, é possível obter um material com boa resistência mecânica e com boa ductilidade a impactos mecânicos (FILHO, 2004). [2]

É possível observar a representação dessa variação microestrutural, durante o processo de resfriamento do aço, observando a Figura 4.

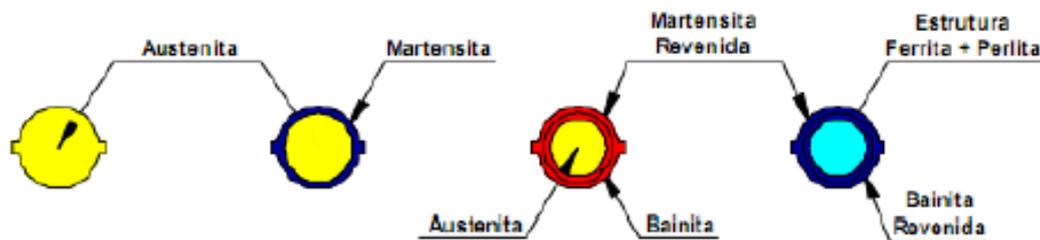


Figura 4. Esquema de fases presentes em uma barra submetida ao Thermex®

1.3.1. Transformação Martensítica

A transformação martensítica se diferencia das demais transformações de fases existentes no estado sólido da matéria. Enquanto as demais transformações se baseiam na difusão atômica, onde há nucleação e o crescimento de uma nova fase no interior de uma fase já existente, a transformação martensítica acontece de forma adifusional, devido à alta velocidade de resfriamento que impede o movimento atômico.

A transformação da austenita em martensita nos aços ocorre com aumento de volume, produzindo tensões internas que podem, dependendo das condições impostas para a transformação, provocar distorções e trincas. Na transformação martensítica dos aços, a matriz austenítica com estrutura cúbica de faces centradas transforma-se em martensita com estrutura tetragonal de corpo centrado, não havendo, portanto, um plano comum que permita a coerência entre duas estruturas. (REZENDE, 2006) [3].

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Com objetivo de analisar a influência da martensita nas propriedades mecânicas dos vergalhões nervurados baixo carbono - SAE 1017, fabricados pela Gerdau/Ce, utilizou-se materiais, equipamentos e procedimentos essenciais para a execução desse trabalho.

2.1. Materiais

Os materiais utilizados nesta pesquisa estão listados numericamente abaixo:

1. Aço CA-50 SAE 1017 de 6 lotes diferentes de uma única bitola: 10,0mm, produzidas por laminação direta e tratados pelo processo Thermex®. A composição química está descrita na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1. Composição Química Vergalhão Nervurado Baixo Carbono - Gerdau/Ce (%)

C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni	Cr	Sn	Mo	V	Fe	Ceq
0,18	0,48	0,12	0,039	0,007	0,27	0,09	0,14	0,02	0,02	0,002	98,63	0,32

Fonte: Gerdau/Ce.

2. Lixas e panos de polimento para preparação metalográfica;
3. Alumina (Al₂O₃);
4. Pasta de diamante;
5. Nital 2% (2ml HNO₃ + 98ml Álcool Etílico).

2.2. Equipamentos

1. Máquina de corte CMR-cut-off e disco de corte;
2. Embutidora Aerotec;
3. Lixadeira e politriz Aerotec;
4. Microscópio ótico Zeiss com software integrado AxioVision;
5. Microdurômetro Shimadzu HMV-2
6. Máquina de tração Universal EMIC 25KN;
7. Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV Philips XL-30;
8. Torno mecânico.

2.3. Procedimentos

As 6 (seis) amostras foram cortadas com uso de máquina *cutt-off* e em seguida preparadas metalograficamente por embutimento em baquelite para que as mesmas fossem lixadas e polidas.

O lixamento foi feito com lixas de diferentes granulometrias e o polimento foi realizado em alumina de 1µ e 0,05µ. Por fim, foram atacadas quimicamente, para terem seus contornos de grãos revelados, com a solução de Nital 2% (2ml HNO₃ + 98ml Álcool Etílico), por imersão.

2.4. Macrografia e micrografia

As macrografias, micrografias e as medições das superfícies das diferentes fases presentes na barra de aço foram obtidas no microscópio ótico Zeiss, com auxílio do *software* AxioVision integrado, com aumentos até 500X.

2.5. Microdureza

A microdureza Vickers foi medida com auxílio do microdurômetro Shimadzu, nas seis amostras disponíveis para o procedimento, sendo feitas as medições da borda da barra até seu centro, com carga de 0,3 HV (2942 N), por 15s.

2.6. Ensaio de Tração

Para realização dos ensaios mecânicos de tração, 2 amostras de cada uma das 6 barras foram cortadas com comprimento de 20cm. Uma amostra de cada par foi

usinada circularmente, em um torno mecânico, tendo seus diâmetros reduzidos de cerca de 10mm para 7mm (de acordo com a espessura da martensita medida). Após esse procedimento, as 12 amostras foram submetidas a ensaio de tração, no Laboratório de Ensaios Mecânicos - LEM/UFC, na máquina universal EMIC, com medida entre as garras de 12 cm e velocidade de 0,5 mm/min, seguindo os parâmetros da norma ABNT NBR ISO 6892 [4] na temperatura ambiente (25°C).

2.7. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Por fim, a fratura causada pelo rompimento dos vergalhões foi analisada com auxílio do microscópio eletrônico de varredura - MEV.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após os ensaio e análises foram atingidos os resultados descritos nos tópicos A seguir.

3.1. Microscopia Eletrônica de Varredura

A Figura 5 a seguir apresenta os resultados das macrografias obtidas das seis amostras selecionadas de vergalhão nervurado 1017.



Figura 5. Macrografias
Fonte: Autor.

É possível verificar em todas as seis amostras a presença de 4 regiões que se apresentam como anéis e se diferenciam por suas tonalidades. Cada camada foi nomeada de acordo com numerações como apresentado na Figura 6 abaixo.

De acordo com Filho (2004), as fases formadas nas barras de aço via o processo Thermex® são, martensita revenida (camada 1), bainita revenida (camada 2) e duas fases que se diferenciam pelos percentuais de perlita e ferrita formada (camadas 3 e 4) respectivamente.

Devido a alta taxa de resfriamento que sofre a camada 1, ela composta pela fase martensita sendo também revenida posteriormente pela energia térmica acumulada no interior da barra. Na camada 2 tem-se bainita revenida e nas camadas 3 e 4

existe a presença de ferrita e perlita, sendo diferenciadas apenas pelos percentuais de ambas as fases.

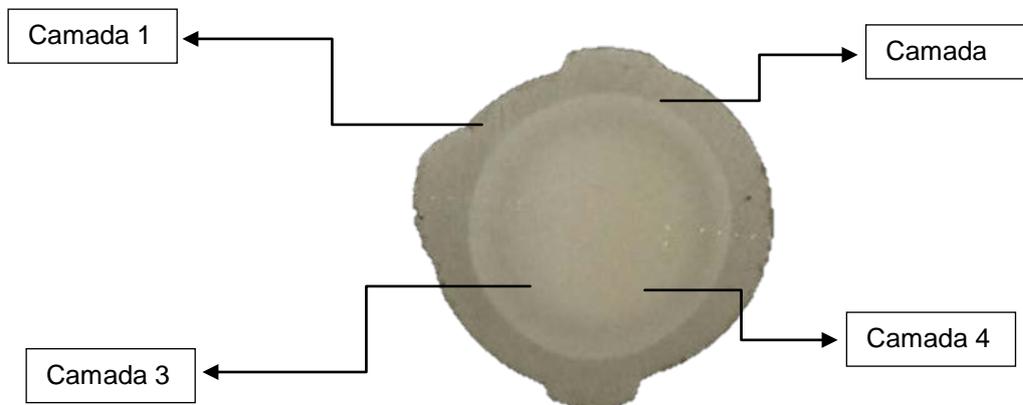


Figura 6. Identificação de camadas

É possível observar que a espessura das fases presentes nas amostras apresentadas, são similares em relação ao tamanho da bitola, tendo em média uma camada de martensita de 2mm.

Utilizando a equação da temperatura de formação da martensita para a composição química do aço em questão tem-se.

$$M_s = 455 \text{ }^\circ\text{C}$$

Ou seja, ao passar pelo Thermex®, a camada superficial da barra chega a temperaturas menores que 455 °C para que seja possível a formação da martensita superficial.

3.2. Micrografias

Para observar as estruturas formadas pelo tratamento térmico Thermex®, foram feitas micrografias das bordas e do centro das amostras, como apresentado nas Figuras 7, 8 e 9 a seguir.

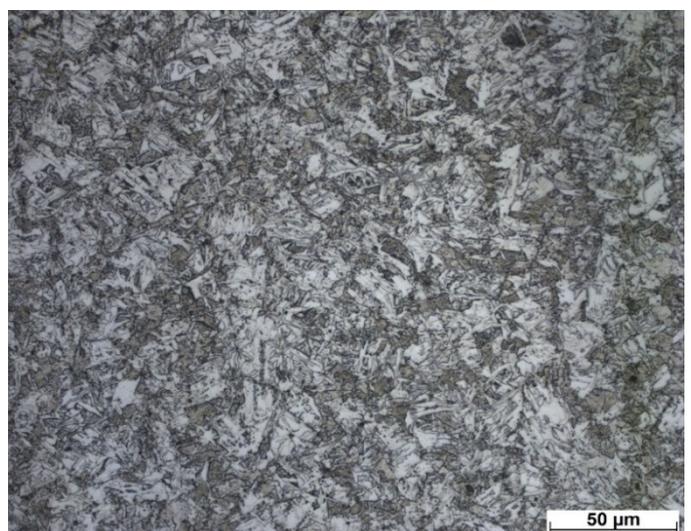
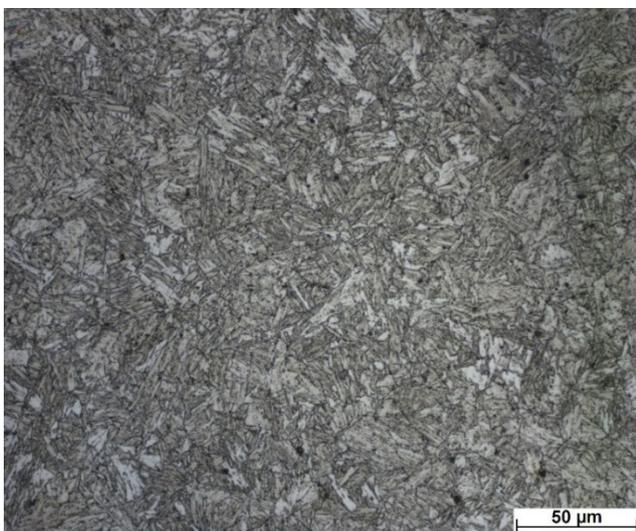


Figura 7. Micrografia camada 1 (Aumento 500x) **Figura 8.** Micrografia camada 2 (Aumento 500x)
 Fonte: Autor. Fonte: Autor.

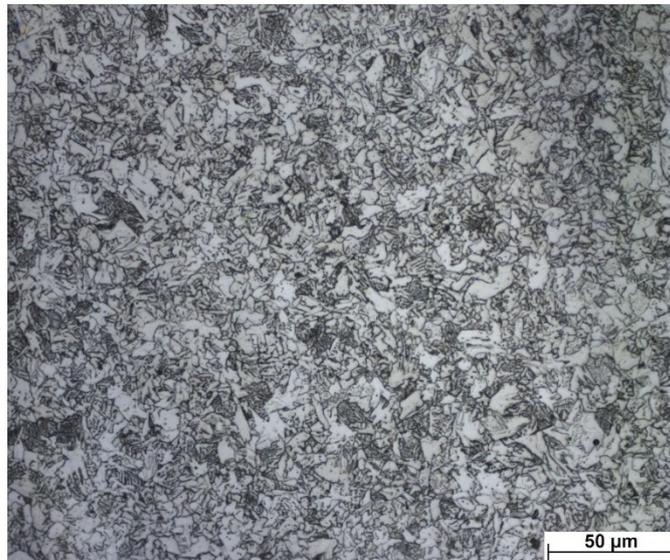


Figura 9. Micrografia camada 4 (Aumento 500x)
 Fonte: Autor.

A tabela 2 abaixo mostra os valores medidos da camada 1, de martensita, nas seis amostras.

Tabela 2. Medidas de espessura da camada 1 das seis amostras de barras de aço

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	MÉDIA	DESV.PAC
	μm	μm						
Borda	1018,88	921,98	1011,59	1047,95	987,91	986,81	995,85	42,65
Nervo	1684,66	1642,93	1692,14	1738,82	1570,33	1549,4	1646,38	73,90

Fonte: Autor.

As micrografias feitas da camada 1 apresentam grãos pequenos e pontiagudos, sendo característicos da fase de martensita revenida. Entre as amostras não há diferença dessa camada, com desvios padrões bem controlados tanto medindo da borda da barra como também considerando a nervura presente nos vergalhões de aço, demonstrando estabilidade na formação da martensita no processo, independente da barra de aço laminada.

A micrografia da camada 2 mostra uma microestrutura pontiaguda com grãos de cementita e ferrita alongadas, mostrando uma morfologia característica da bainita revenida.

Não foi possível a medição da camada 3 devido a sua espessura limitada e de difícil identificação através de microscopia óptica. Na camada 4 é possível identificar a presença de ferrita e perlita.

Em todas as amostras é possível ver que as camadas se mantêm em uma espessura independente da amostra, com pouquíssima variação.

3.3. Microdureza

A Figura 10 apresenta os resultados obtidos através da medição da microdureza, realizada da borda ao centro das amostras.

É possível observar uma redução da medida de dureza ao longo do trajeto até o centro das amostras, onde a maior acentuação nessa diminuição apresenta-se entre os pontos 1 e 1,5mm (região representada pelas retas em vermelho).

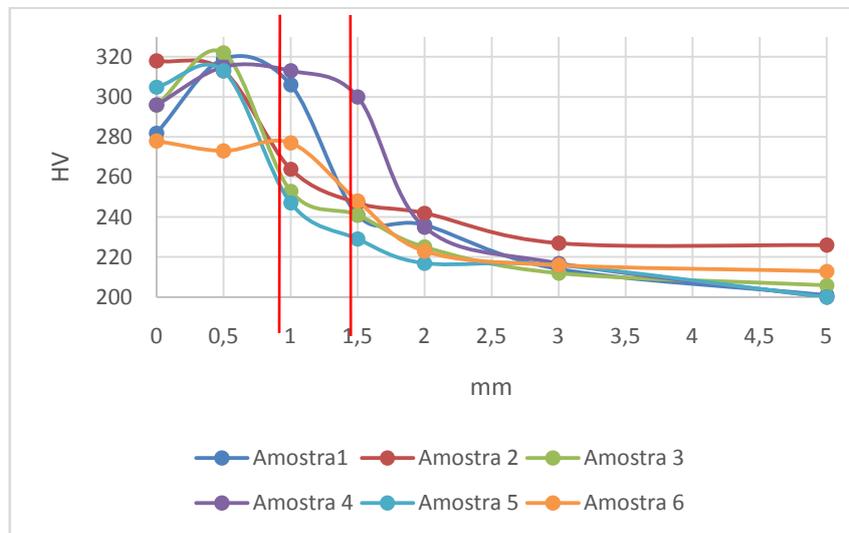


Figura 10. Perfil de microdureza Vickers realizada nas amostras selecionadas (borda-centro)
Fonte: do Autor.

É importante ressaltar que esses pontos também foram identificados nas medições da Camada 1 realizadas através das micrografias, como sendo o limite de formação da martensita revenida.

3.4. Ensaio de Tração

Para observar a influência da camada 1, nas propriedades mecânicas das barras de aço analisadas, foram realizados ensaios de tração do corpo de prova no estado como recebido e após usinado, removendo-se a espessura medida de martensita revenida. Os resultados são apresentados nas Figuras 11 e 12 a seguir.

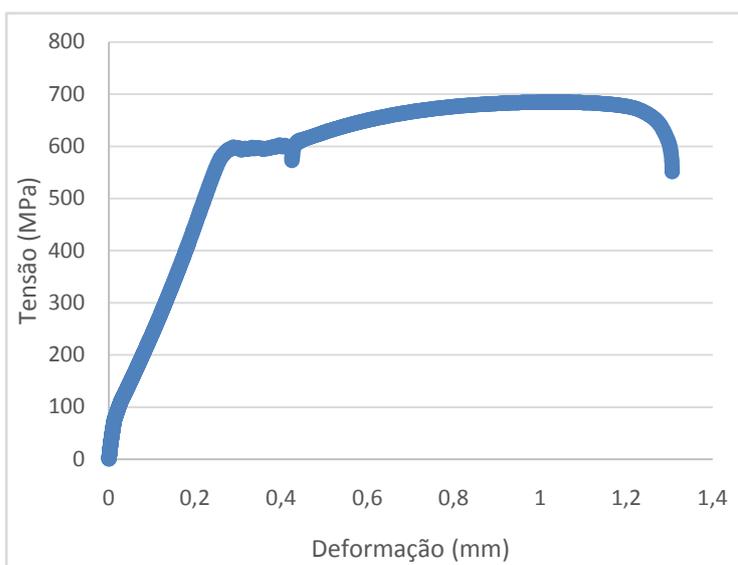


Figura 11. Tração x Deformação CR
Fonte: Autor.

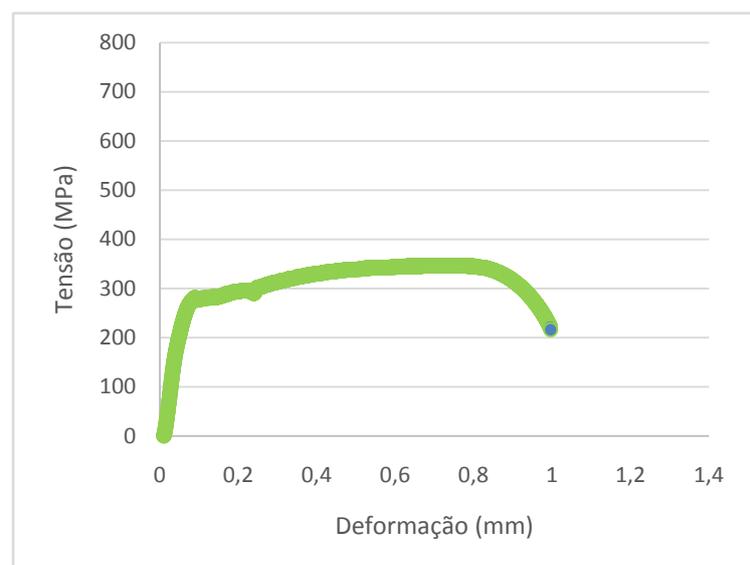


Figura 12. Tração x Deformação Usinado
Fonte: Autor.

3.5. Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

A Figura 13 apresenta a fratura causada pelo rompimento do corpo de prova da amostra 1 após ensaio de tração. É possível observar na imagem duas camadas.

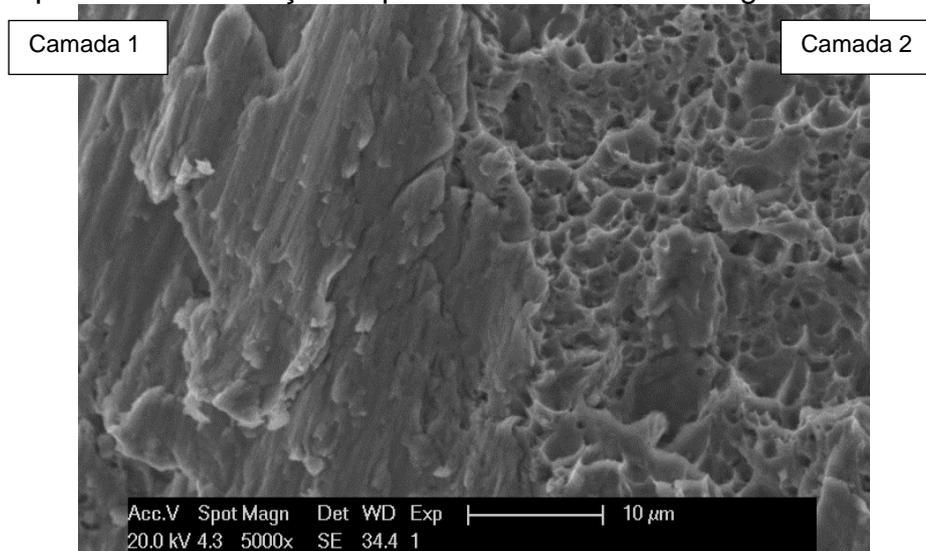


Figura 13. Imagem com aumento de 5000X da região da fratura da barra de aço
Fonte: Autor.

Na sua fratura a Camada 2 apresentou uma estrutura de microcavidades esféricas, formação que ocorre devido a formação de trincas que se coalescem durante a aplicação de uma tensão uniaxial ao material em questão. Segundo a literatura cada microcavidade é a meta de uma trinca que se formou e então se separou com a fratura.

Já a Camada 1 apresenta uma estrutura mais característica de fratura frágil, sem microcavidades formadas e com linhas retas e definidas, muito semelhante à uma fratura transgranular ocasionada pelo processo de clivagem.

A martensita revenida formada na camada 1 tem uma dureza e resistência mecânica bem superiores à bainita revenida contida na camada 2, devido essa grande diferença em propriedades mecânicas as estruturas presentes na fratura de cada camada se distinguem bastante, uma sendo predominantemente fratura frágil e outra fratura dúctil.

4. CONCLUSÃO

A partir dos dados coletados através das macrografia e micrografias obtidas das 6 amostras, é possível observar uma variação da microestrutura da entre as camadas identificadas, apresentando na Camada 1 exterior uma estrutura de martensita revenida, seguida de bainita revenida na Camada 2 e Perlita e Ferrita nas Camadas 3 e 4.

Essa afirmação pode ser feita devido tanto as características microestruturais das camadas, quanto aos resultados obtidos pelos ensaios de Microdureza e Tração realizados. Pois no primeiro, há uma acentuada microdureza na Camada 1 medida. Já no segundo ensaio, observamos uma diminuição de 50% do limite de resistência à tração do corpo de prova Como Recebido para o corpo de prova usinado, retirando-se a Camada 1.

Observou-se também uma diminuição na ductilidade, após a usinagem, seguido de uma menor fase elástica e menor da fase plástica, como influência da diminuição da

resistência do material. A capacidade de deformação também foi reduzida de 1,3 mm (como recebido), para 1 mm (usinado).

Já a observação da fratura do corpo de prova também comprova a existência de uma camada exterior de martensita revenida, por haver uma acentuada fratura frágil, quando no centro há fratura dúctil, característica da bainita revenida.

Quanto a variação dos resultados devido a análise de 6 lotes de fabricação diferentes, podemos dizer que apesar das pequenas variações nas medidas da espessura da Camada 1 e nas medidas de Microdureza, essas variações são mínimas, apresentando baixo desvio padrão. Essa observação representa que há um padrão de produção e um alto controle na fabricação de barras de aço fornecidas pela Gerdau/Ce.

Por fim, podemos dizer que foi possível atingir os objetivos propostos, apresentando a influência da martensita nas propriedades mecânicas de barras de aço baixo carbono e a importâncias do processo Thermex® e da adição de elementos de liga para a formação das camadas observadas nas amostras, proporcionando ao material uma ótima combinação entre boa resistência e boa ductibilidade.

Para trabalhos futuros, é sugerido identificar a martensita formada de forma mais precisa e analisar o comportamento do material através de outros tratamentos térmicos.

Agradecimentos

Para a realização deste trabalho agradecemos primeiramente ao auxílio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PIBIC/UFC, por conceder bolsa aos pesquisadores Soraia Castro e Geraldo Freitas. Ao Laboratório de Caracterização de Materiais – LACAM/UFC e ao Laboratório de Ensaio Mecânicos – LEM/UFC. Também agradecemos ao Grupo Gerdau Ceará por conceder as amostras e ao graduando Antonio Aldenor por fazer deste seu projeto de conclusão de curso e por compartilhar seu conhecimento industrial. E a todos os bolsistas e voluntários que de alguma forma contribuíram para esta realização.

REFERÊNCIAS

- 1 MACIEL, P. H. C. **Efeitos De Tratamentos Térmicos De Têpera E Revenimento Em Um Aço Baixo Carbono Visando A Fabricação De Vergalhões Grau Ca50 1mm.** Dissertação de Mestrado. UFOP – UEMG, Minas Gerais, 2010.
- 2 ALVES FILHO, C.H.M A. **Análise da Influência da Taxa de Resfriamento no Gradiente Microestrutural de Barras Laminadas a Quente Tratadas Termicamente.** Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2004.
- 3 SANTOS, Rezende Gomes dos. **Transformações de Fases em Materiais Metálicos** – Campinas, SP. Editora Unicamp, 2006. Capítulo 9 – Endurecimento por Precipitação (p.345).
- 4 ABNT NBR ISO 6892 – Materiais Metálicos, Ensaio de Tração.