



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA

THIAGO OLIVEIRA PONTES

CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA E MICRODUREZA DE UM AÇO
SAE 1010 LAMINADO A QUENTE EM PLANTA INDUSTRIAL

FORTALEZA
2013

THIAGO OLIVEIRA PONTES

**CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA E MICRODUREZA DE UM AÇO
SAE 1010 LAMINADO A QUENTE EM PLANTA INDUSTRIAL**

Monografia submetida à Coordenação do Curso de Engenharia Metalúrgica, da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu

Coorientador: Dr. Luis Flávio Gaspar Herculano

FORTALEZA

2013

THIAGO OLIVEIRA PONTES

**CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA E MICRODUREZA DE UM AÇO
SAE 1010 LAMINADO A QUENTE EM PLANTA INDUSTRIAL**

Monografia submetida à Coordenação do Curso de Engenharia Metalúrgica, da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em ___/___/_____

BANCA EXAMINADORA

Dr. Luis Flávio Gaspar Herculano.
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva
Universidade Federal do Ceará

A minha mãe, Agostinha Oliveira teles,
que sempre me apoiou muito na
realização deste sonho.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, Agostinha ao meu pai José Osvaldo.

A meu filho, Pedro Hendreo, pela motivação de seguir em frente.

A meu orientador Hamilton Ferreira Gomes de Abreu e coorientador Luis Flávio Gaspar Herculano.

As meus amigos de faculdade Abraão Danilo, Émerson Mendonça, Cleber Iury, Neca Alves, Nathalia Figueiredo, Thiago Ivo, Fernando Emerson, Emanuel Seixas, Mateus Segundo, Romulo Araújo, Arthur Cesar, Eduvânio Machado, Mozart Queiroz, Alfredo Leão, Ed Menezes, Gilberto Pereira, Anastacio Mesquita, Daniel Lucena, Luis Fernando e todos os outros que influenciaram de alguma forma para a realização deste trabalho.

A todos os professores do departamento, Carlos Almir, Cleiton Carvalho, Elineudo de Moura, Enio Pontes, Francisco Marcondes, Hélio Cordeiro, Igor Frota, Jeferson Klug, Jesualdo Pereira, Lindberg Gonçalves, Marcelo José Gomes, Raimundo Leite, Ricardo Emílio, Walney Araújo, aos ex professores Walmick Vieira e Alex Maia.

Ao Secretário Francisco José de Souza Junior pelo auxílio nas horas de necessidades.

Aos meus amigos, Sheila Pereira, Francisco Osvaldo, Anderson Pontes Gennilson Fernandes, Yasmin Freire, Tatiana Freitas, Rafaelle Girão, Jéssica Santos, Thiago Reis.

Aos meus irmãos e irmãs Thiara Pontes, Thiala Pontes, Fabiana Oliveira, Fernanda Oliveira, Fabio Oliveira e Olivio Oliveira.

A minha ex-esposa Ana Kerollayne pela paciência ao longo desse trabalho.

Aos membros do Instituto Social Para Motivar, Apoiar e Reconhecer Talentos, em especial à pessoa da Inês Boaventura França.

RESUMO

Aços de baixo carbono e que passam pelo processo de refinamento de grãos são grandemente utilizados nas indústrias automobilísticas, principalmente, na produção de rodas automotivas e estruturas externas e internas dos veículos. Durante a produção desses aços, através da laminação a quente, é importante garantir-se que as propriedades mecânicas e metalúrgicas dos mesmos estejam condizentes para o processo posterior que é a estampagem do material. Para isso, estas propriedades devem possuir as mesmas características durante a produção de bobinas a quente, ao longo de toda a largura do laminado. No final do processo de conformação a quente, especificamente dentro do trem acabador (tandem mill), a tira laminada a quente (ou chapa fina a quente) tem a temperatura nas duas bordas laterais menor devido a não existência de massa externa que proteja as bordas como, por exemplo, no meio da largura do laminado que possui massas laterais de aço que protegem do contato da água que é utilizada no processo, além da radiação e fluxo de ar. Este fato é negativo para as propriedades do material laminado quando se requer posteriormente um processo de estampagem profunda no caso de produção de rodas automotivas, pois nas bordas da chapa fina a quente, dentro do tandem mill, haverá não somente austenita, mas também ferrita- α , já que o material encontra-se no campo bifásico inter-crítico nas bordas, pois estas regiões estão com temperaturas abaixo de A_{r3} . Deste modo, nas bordas da tira, haverá grãos mistos de ferrita (poligonal, acircular, circular, alongada) devido a mesma ter sido laminada dentro do trem acabador. A ferrita laminada é encruada e, desta forma, as propriedades Limite de Resistência e Limite de Resistência à Tração se encontram maiores. Por outro lado, no meio da largura do laminado, com exceção das bordas, haverá, de acordo com a literatura e a prática (provada e aprovada no presente projeto), grãos equiaxiais e homogêneos que garantem excelentes propriedades mecânicas e metalúrgicas. Assim foram feitos estudos detalhados, embasados e práticos na caracterização das microestruturas e microdurezas encontradas no presente aço analisado SAE 1010 C-Mn. Neste trabalho foram feitas caracterizações das microestruturas encontradas nas bordas e no centro da chapa fina, e, de posse das micrografias, foram realizados cálculos dos tamanhos de grãos no centro e nas bordas da tira, de acordo com a norma ASTM. Após o cálculo do tamanho de grão foi feita uma relação do tamanho do mesmo com a microdureza Vickers. Foi

concluído que, para garantir a qualidade do material ao longo de toda a largura da chapa laminada, devem-se descartar as bordas dela.

Palavras-chave: Aços baixo carbono, Rodas automotivas, SAE 1010, microdureza Vickers.

.

ABSTRACT

Low carbon steel and go through the process of refinement of grains are largely used in automobile industries, especially in the production of automotive wheels and external and internal structures of vehicles. During production of these steels by hot rolling, it is important to ensure that the mechanical and metallurgical properties thereof are conducive to the subsequent process is stamping the material. For this reason, these properties should have the same characteristics during the production of coiled hot along the entire width of the rolled. At the end of the hot forming process, specifically within the finishing train (tandem mill), the hot rolled strip (or hot thin plate) is the temperature at the two lateral edges low due to absence of external mass which protects the edges eg, in the middle of the width of the laminate which has lateral masses of steel which protects the contact of water used in the process, in addition to radiation and air flow. This fact is negative to the properties of the laminate when it requires a subsequent deep drawing process in the case of production of automotive wheel as the edges of the thin plate heat within the tandem mill, not only will austenite, but also ferrite- α , since the material is in the biphasic field inter-critical edges, since these regions are at temperatures below A_{r3} . Thus, the edges of the strip will mixed grains of ferrite (polygonal acircular, circular, elongated) because it has been rolled into the finishing train. The ferrite is laminated foundry hardened and thus the properties Resistance Limit and Limit Tensile are larger. Moreover, in the middle of the width of the laminate except the edges, there will, according to the literature and practice (tested and adopted in this design), and equiaxed grains homogeneous ensuring excellent mechanical and metallurgical properties. Thus detailed studies were made, based on practical and characterization of microstructures and microhardness found in this analysis SAE 1010 steel C-Mn. In this paper characterizations were found at the edges of the microstructures and the center of the thin plate, and in possession of the micrographs were performed calculations of grain sizes in the center and the edges of the strip, according to ASTM. After calculation of the grain size was made one size ratio with the same microhardness. It was concluded that, to ensure the quality of the material along the entire width of the rolled sheet must be discarded edges of it.

Key Words: Low Carbon steels, automotive wheels, SAE 1010, Vickers hardness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Cilindros de Laminação.

Figura 2 Cilindros de Acabamento.

Figura 3 Mecanismo de Restauração

Figura 4 Diagrama de fase Fe-C adaptado.

Figura 5 Tamanho de grão pela taxa de resfriamento.

Figura 6 Diagrama Ferro-Carbono Adaptado.

Figura 7 Penetrador e impressão Vickers.

Figura 8 Microscopia da ferrita (a esquerda) ampliação de 90x e da austenita (a direita) ampliação de 325x.

Figura 9 Recolhimento amostras.

Figura 10 Amostras nas Baquelites.

Figura 11 CMR -cut-off.

Figura 12 Embutidora Arotec.

Figura 13 Lixadeira e Politriz.

Figura 14 Microscopio Olympus.

Figura 15 Microdurômetro Shimadzu HMV-2.

Figura 16 1LM aumento de 500x

Figura 17 1LO aumento de 500x

Figura 18 2LM aumento de 500x.

Figura 19 2LO aumento de 500x.

Figura 20 3LM aumento de 500x.

Figura 21 3LO aumento de 500x.

Figura 22 Centro da Chapa aumento de 500x.

Figura 23 Centro da Chapa aumento de 1000x.

Figura 24 Software Tamanho de grão.

Figura 25 Gráfico da Microdureza Vickers 1LO.

Figura 26 Gráfico da Microdureza Vickers 1LM.

Figura 27 Gráfico da Microdureza Vickers 2LO e 2LM.

Figura 28 Gráfico da Microdureza Vickers 3LO e 3LM.

Figura 29 Gráfico Microdureza Vickers no centro da chapa.

Figura 30 Gráfico Microdureza Vickers todas as amostras.

Figura 31 Média das Microdurezas.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Composição Química do Aço SAE 1010.

Tabela 2 Valores de microdureza.

Tabela 3 Tamanho de Grão ASTM x Microdureza média

ABREVIações

Fe- γ - Ferro austenita

D α - Tamanho de grão Ferrítico

A3 - Temperatura de austenitização

HRB- Dureza Rockwell

HV - Dureza Vickers

kgf - Quilogramas Força

N - Força Newton

CE - Centro da Chapa

LO - Lado Operador

LM - Lado Motor

mN - millinewtons

N - Tamanho de grão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVO.....	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1- Laminação a quente.....	15
3.2 - Processo de Laminação a Quente.....	16
3.3 - Recristalização e Refino de grão na Laminação a Quente.....	17
3.4 - Evolução da microestrutura durante a recristalização a quente.....	18
3.5 - Aumento da dureza do material.....	21
3.6 - Microestrutura de um aço baixo carbono.....	22
3.7 – Dureza.....	23
3.8 – Microscopia.....	25
4. METODOLOGIA.....	26
4.1 Materiais.....	26
4.1.1- As Amostras.....	26
4.1.2- Lixas e panos de polir.....	28
4.1.3- Ataque Químico.....	28
4.2 Equipamentos	28
4.2.1 Corte	28
4.2.2 Embutimento.....	29
4.2.3 Lixamento e polimento.....	29
4.2.4 Aquisição de imagens.....	30
4.2.5 Dureza.....	30
4.2.6 Programas.....	31
4.3 Procedimento.....	31
5. RESULTADOS.....	32
5.1 Micrografias.....	32
5.2 Microdurezas.....	37
5.3 Relação da microdureza com o tamanho de grão ASTM.....	43
6. CONCLUSÃO.....	45
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	46
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

1. INTRODUÇÃO

Segundo V. Chiaverini.(1988, Aços e Ferros Fundidos, p. 21)[1], “Aço é a liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação”. Assim o Aço SAE 1010 por possuir teor de carbono de 0,08% a 0,11% se enquadra na definição de aço.

Aços com baixo teor de carbono possuem baixa dureza e precisam de um mecanismo de aumento de dureza, no aço SAE 1010 em análise esse mecanismo foi o refino de grão, fazendo com que os grãos se tornem menores e melhorando a dureza do material.

Os aços podem ser classificados de diversas formas: de acordo com a sua aplicação, com a composição química e o teor de carbono. A classificação utilizada nesse trabalho foi o teor de carbono, que utiliza a denominação SAE ABXX, onde AB refere-se a elementos de ligas adicionados e XX o percentual em peso de carbono multiplicado por cem.

O aço SAE 1010, SAE 10XX – aço-carbono simples com teor de carbono entre 0,08% a 0,11% em peso, fabricado na linha de laminação a quente na Companhia Siderúrgica Nacional é utilizado em rodas automotivas por possuir boa conformabilidade e média dureza.

Para o aço ser utilizado de maneira confiável devemos garantir suas propriedades ao longo de toda a largura da chapa laminada, sendo assim esse trabalho tem como objetivo analisar as microestruturas e microdurezas no meio e nas bordas da chapa laminada a quente industrialmente.

As propriedades dos aços são funções da composição química e de processamentos posteriores a que este foi submetido, sendo assim o SAE 1010 após passar por refinamento de grão deve possuir todas suas propriedades idênticas ao longo de toda a chapa, mas de acordo com D. Callister (2006, p. 269)[2], a microestrutura de uma liga depende de variáveis tais como os elementos de liga que estão presentes, suas concentrações e o tratamento térmico a que a liga foi submetido (isto é o tempo de aquecimento, à temperatura do tratamento e a taxa de resfriamento até a temperatura ambiente).

Sendo assim esperam-se alguns desvios de propriedades quando comparamos o meio e as bordas da chapa laminada, pois a temperatura de laminação ao longo do centro da chapa é diferente das bordas fazendo com que os grãos se tornem diferente.

Em uma peça que irá passar pelo processo industrial de estampagem deve-se garantir que esse desvio de propriedades seja o menor possível. Assim a investigação desses desvios de propriedades é o primeiro passo para garantir que não aconteçam problemas futuros.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo geral analisar as propriedades de um aço SAE 1010.

Analisando as diferentes microestruturas encontradas em uma chapa de 3 mm de espessura laminada a quente em uma planta industrial.

De posse das micrografias e identificação das fases existentes, calcular o tamanho de grão ASTM.

Relacionar o tamanho de grão ASTM com a microdureza Vickers da chapa laminada a quente.

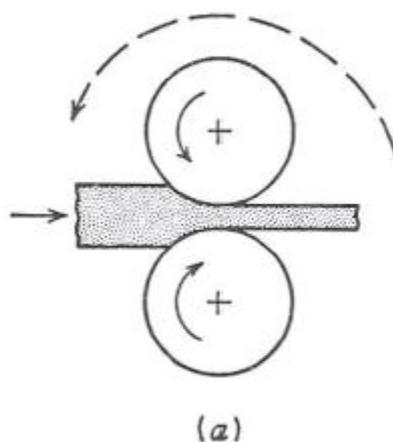
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1- Laminação a quente.

O processo de laminação a quente consiste em diminuir a espessura de uma placa de metal pela passagem entre dois cilindros, deixando entre os cilindros uma espessura menor que a inicial. Esta passagem ocorre devido à força de atrito entre a placa e os cilindros que origina uma força de contato entre a placa e os cilindros. Na passagem da placa entre os cilindros, o material é estendido no sentido longitudinal, o que implica em um forte alongamento dos grãos no sentido de laminação da placa. No sentido paralelo a laminação, também ocorre um alongamento do material, mas em pequena escala. [3]

A figura 1 mostra como ocorre a laminação. Reduzindo a espessura da placa até chegar a espessura desejada em na chapa.

Figura 1 Cilindros de Laminação.



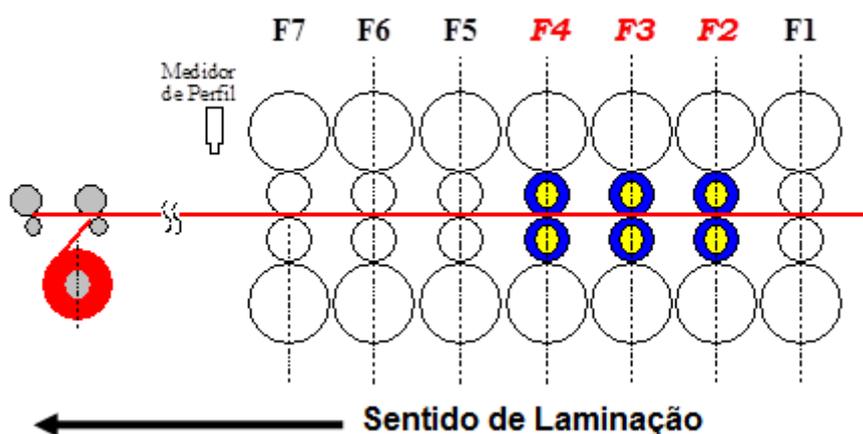
3.2 - Processo de Laminação a Quente.

O produto inicial da laminação a quente é um lingote ou placa, isto é, simplesmente um bloco de metal solidificado vindo da aciaria que posteriormente será deformado por conformação dando origem a uma chapa. Durante o processo de conformação mecânica a forma da placa é constantemente modificada. [3]

Para que o processo de laminação ocorra de maneira correta a placa deve estar acima da temperatura de austenitização e as tensões aplicadas devem ser superiores ao limite de escoamento do material. [4]

Assim no processo de laminação a quente a temperatura de trabalho é sempre maior que a temperatura de recristalização do material. Cada vez que a placa passa entre os cilindros, o tamanho de grãos é reduzido e logo após a retirada da pressão dos cilindros esses grãos crescem novamente. O tamanho final do grão está relacionado com a temperatura final do processo e a quantidade de redução da espessura após a última passagem nos cilindros. [4]

Figura 2 Cilindros de Acabamento.



Fonte: Book treinamento engenheiro Companhia Siderúrgica Nacional. [4]

Os cilindros de acabamento, também conhecidos como trem acabador, possuem vários cilindros de laminação acoplados para que não ocorra o crescimento de grão e perda de temperatura até chegar ao próximo passe.

3.3 - Recristalização e Refino de grão na Laminação a Quente.

Os processos de laminação a quente industriais atuais geram na maioria dos metais e ligas um encruamento e restauração da estrutura, isto é, uma recuperação + recristalização [5].

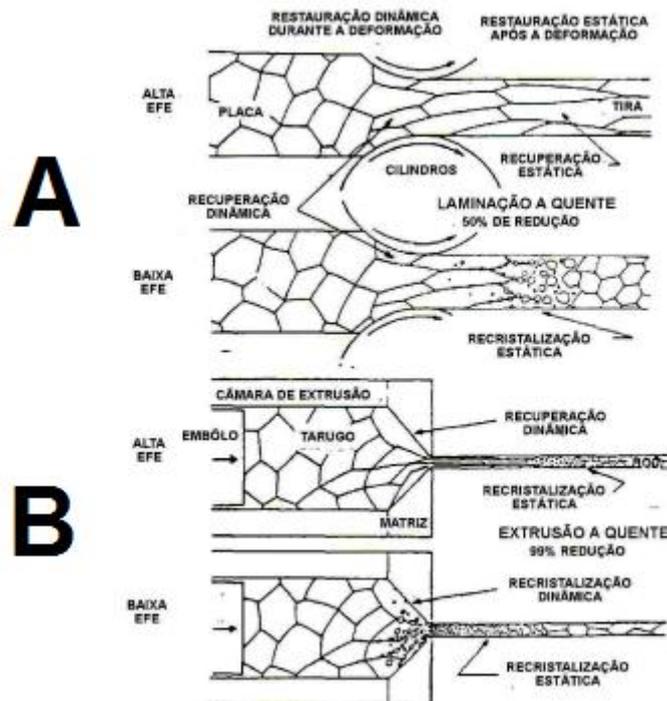
Para o processo de conformação, podemos dizer que a restauração ocorre de forma dinâmica, havendo uma tensão máxima, chamada de tensão estacionária, onde, para um aumento de deformação, não ocorre um aumento na tensão de deformação. [5]

Em algumas ligas metálicas que possuem baixa energia de empilhamento, (por exemplo: Fe- γ), ocorre o processo de deformação dinâmica desde que a tensão de deformação seja maior que a deformação de pico. [5]

Após os passes nos cilindros as microestruturas obtidas são metaestáveis. Se após a saída da deformação, este material for mantido em altas temperaturas podemos observar os mecanismos estáticos de recuperação, recristalização e crescimento de grão. [5]

Na figura abaixo podemos observar a baixa e elevada deformações, A e B respectivamente.

Figura 3 Mecanismo de Restauração



Fonte: Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura. [5]

Na figura 3 pode-se observar que em materiais laminados à quente ocorre à recuperação dinâmica e logo em seguida ocorre à recristalização estática. A velocidade no qual essa recuperação ocorre é lenta e com isso aumenta a quantidade de defeitos cristalinos com a deformação.

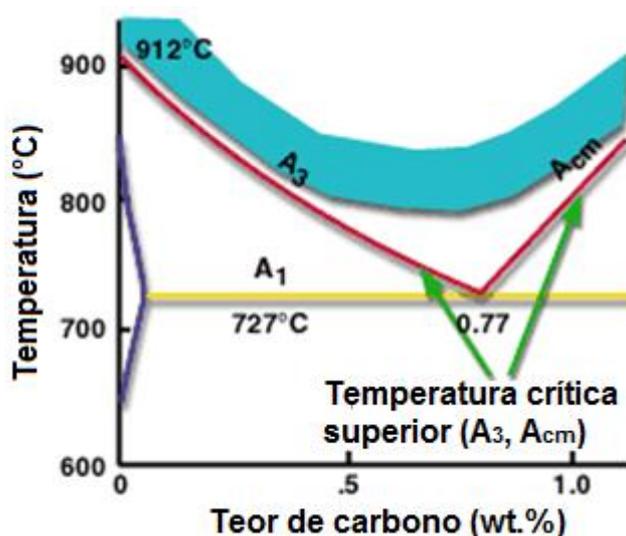
3.4 - Evolução da microestrutura durante a recristalização a quente.

Os principais fatores que influenciam na evolução da microestrutura da austenita, na laminação a quente, são a cinética da recristalização, o tamanho do grão recristalizado e o crescimento normal do grão após a recristalização. Se a recristalização não for completada entre passes, podemos também considerar que a recuperação estática modifica o potencial termodinâmico retido (densidade de discordâncias). Para que ocorra recristalização dinâmica após a deformação máxima temos que ter reduções suficientemente grandes e altas temperaturas nos primeiros passes de laminação. Assim, a microestrutura recristalizada dinamicamente é modificada como resultado dos processos metadinâmicos (quase estáticos) [6]. A recristalização e crescimento de grão dependem do projeto de esquema de passes e este está ligado a:

1. Taxa de deformação
2. Temperatura de passes
3. Reduções de passe
4. Tempo entre os passes.
5. Parâmetro de resfriamento entre as temperaturas A_3 e a temperatura de laminação de acabamento.

Normalmente deseja-se encontrar uma influência da laminação a quente no tamanho de grão ferrítico ($D\alpha$). Além disso, os próprios parâmetros do material influenciam a recristalização dinâmica, estática e o crescimento de grão da austenita. Sendo assim é necessário que exista uma especificação do tamanho de grão da austenita e da ferrita para varias condições de resfriamento.

Figura 4 Diagrama de fase Fe-C adaptado.

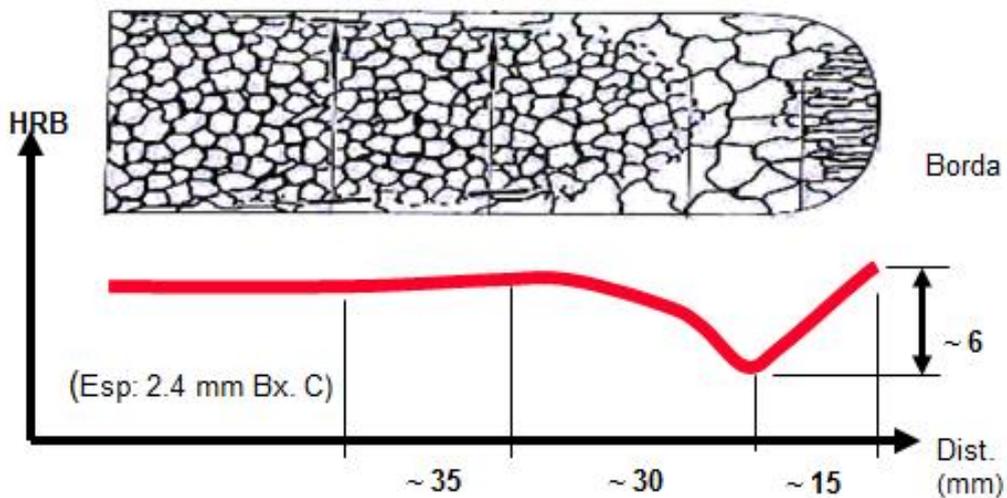


Fonte: Book treinamento engenheiro Companhia Siderúrgica Nacional. [4]

Como podemos observar na figura acima a temperatura de laminação é de grande importância para o processo, pois materiais laminados abaixo da temperatura A_3 sofrem influência do aumento do nível de tensões.

Pode-se também analisar a temperatura de laminação nas bordas da chapa laminada. Sendo as bordas laminadas em temperaturas inferiores a do centro da chapa estão mais propícias a encontrar a baixo da linha A_3 e sendo assim laminadas na fase ferrita, ocorrendo uma heterogeneidade do tamanho de grão do meio da chapa laminada para as bordas.

Figura 5 Tamanho de grão pela taxa de resfriamento.



Fonte: Book treinamento engenheiro Companhia Siderúrgica Nacional. [4]

Na figura acima se pode notar a chapa laminada a quente sendo que nas suas borda e pontas a presença de grãos heterogêneos com níveis de dureza diferentes. Este gradiente na dureza do material é utilizado para inferir o tamanho de grão do material.

3.5 - Aumento da dureza do material.

Podemos aumentar a dureza de um material de diversas formas, tais como pela diminuição do tamanho do grão, pelo encruamento ou pela formação de ligas por solução sólida [2].

Analisando a microestrutura de um material pode-se dizer que as propriedades mecânicas e a microestrutura do material estão diretamente relacionadas, pois quanto menor o tamanho de grão, maior a área da superfície do grão e sendo assim maior a densidade de discordância e menor será o movimento das discordâncias durante uma deformação [7].

Em virtude disso pode-se dizer que materiais laminados a quente mudam de um tamanho de grão grande (quando estão na forma de placa) para um tamanho de grão pequeno (chapa), tendo como consequência um aumento da resistência mecânica pelo refino de grão.

3.6 - Microestrutura de um aço baixo carbono.

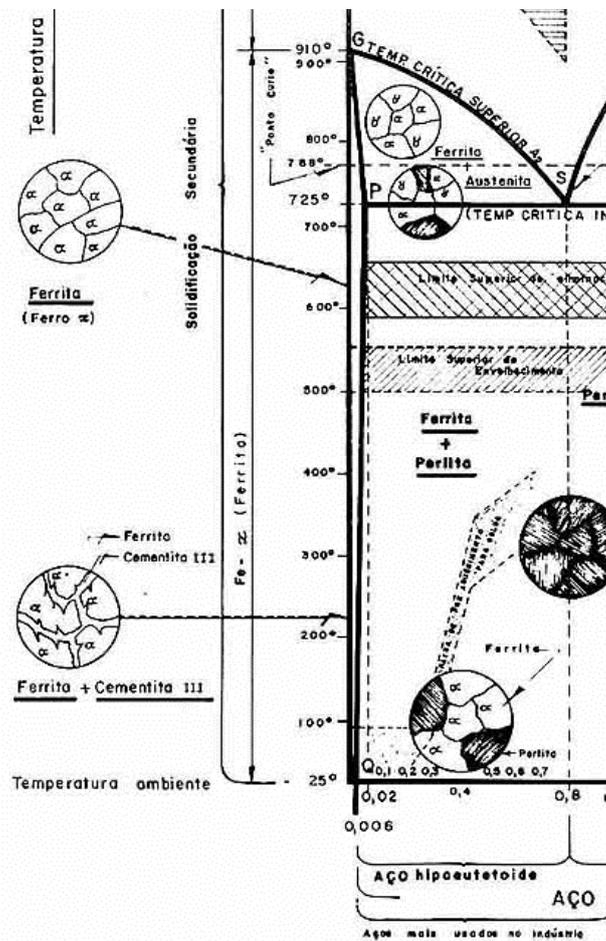
Para ligas de baixo carbono com composição química abaixo:

Tabela 1 Composição Química do Aço SAE 1010

C_MIN	C_MAX	Mn_MIN	Mn_MAX	Si_MIN	Si_MAX	Al_MIN	Al_MAX
0,08	0,11	0,35	0,5	0	0,02	0,015	0,045

A microestrutura dos aços SAE 1010 é rica em ferrita com pouca presença de perlita. No diagrama adaptado abaixo se pode observar a evolução dessas microestruturas.

Figura 6 Diagrama Ferro-Carbono Adaptado.



Fonte: Site estudo Engenharia Mecânica. [8]

Analisando a figura 6 deve-se esperar que o SAE 1010 seja um material mais dúctil em virtude da maior quantidade de ferrítica, com maior ductilidade. A melhoria das propriedades mecânicas ocorre pelo refino de grão.

3.7 – Dureza.

Podemos definir a dureza do material como sendo a capacidade que este tem de resistir à penetração de outro material. Assim podemos definir a dureza Vickers como sendo a capacidade de um material resistir à penetração de uma ponta de diamante com forma piramidal com ângulo de 136° [9].

Figura 7 Penetrador e impressão Vickers.



Fonte: Ensaio Mecânicos em Materiais Metálicos – Fundamentos Teóricos e Práticos. [9]

O cálculo da dureza é feito a partir da geometria do trapézio deixada pelo penetrador na superfície da chapa. De posse dos valores das diagonais do retângulo impresso na peça é feito o seguinte calculo:

$$HV = \frac{\text{Carga}}{\text{área da superfície piramidal}} = \frac{2Q \text{sen} \frac{136}{2}}{L^2}$$

Ou seja:

$$HV = \frac{1,8544Q}{L^2}$$

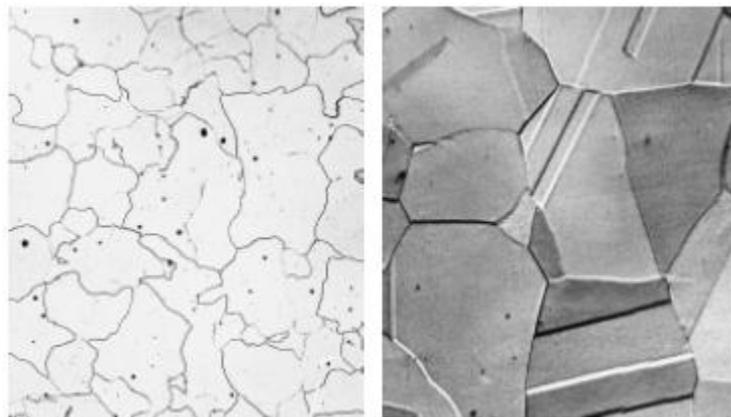
Onde Q é dado em kgf ou N, a dimensão da dureza Vickers é N/mm² ou kgf/mm², com isso este tipo de ensaio fornece uma dureza de HV=5 até HV=1000kgf/mm² [9].

3.8 – Microscopia.

Temos como principal objetivo do microscópio a obtenção de uma imagem ampliada de um objeto, permitindo assim distinguir detalhes que não podem ser visto a olho nu. [10]

Utiliza-se das técnicas de microscopia ótica para conseguir medir o tamanho de grão, fases ou precipitados existentes em um material. [10]

Figura 8 Microscopia da ferrita (a esquerda) ampliação de 90x e da austenita (a direita) ampliação de 325x.



Fonte: Fundamentos da Ciência e Engenharia dos Materiais. [2]

Como podemos notar nas microscopias acima, cada estrutura possui uma ordenação e um tamanho de grão característico. Assim um material que possua grãos diferentes em pontos diferentes, por definição possuirá dureza diferente nesses pontos.

4. METODOLOGIA

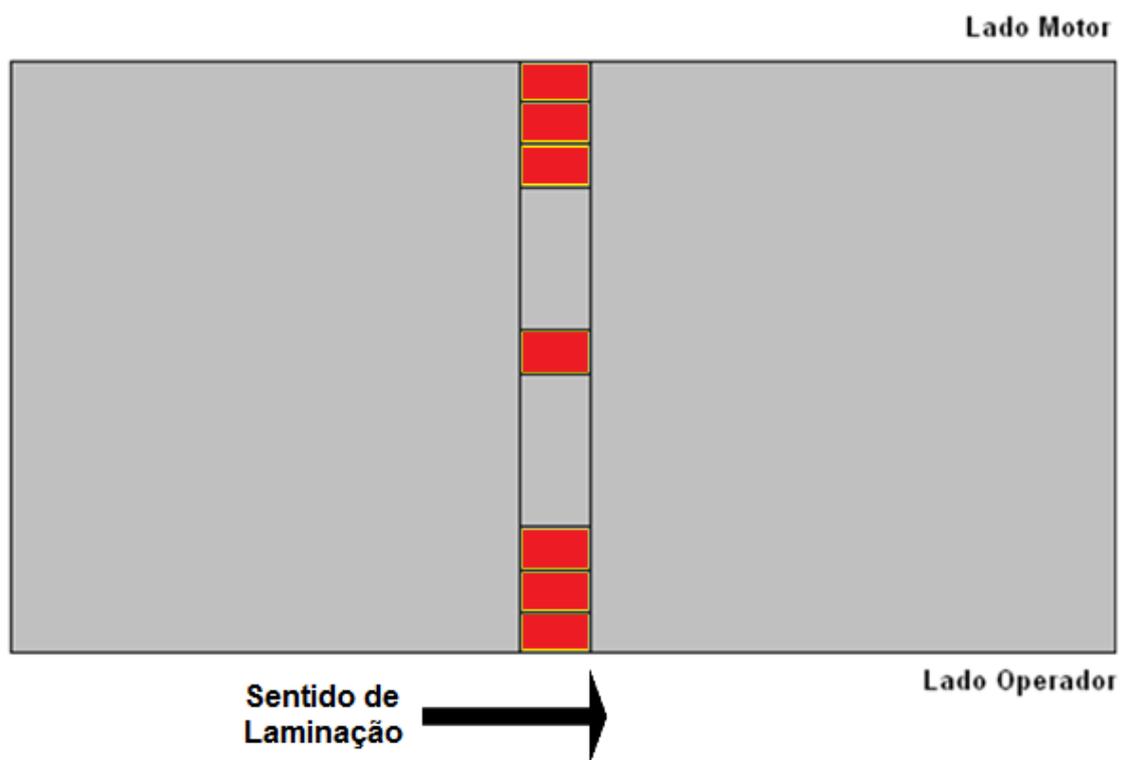
Foram utilizados materiais, procedimentos e equipamentos que foram de extrema importância para que o trabalho alcançasse seu objetivo.

4.1 Materiais.

4.1.1- As Amostras.

Foram utilizadas amostras retiradas de uma chapa laminada a quente em planta industrial com 3 mm de espessura. A configuração da retirada dessas amostras segue abaixo:

Figura 9 Recolhimento amostras.



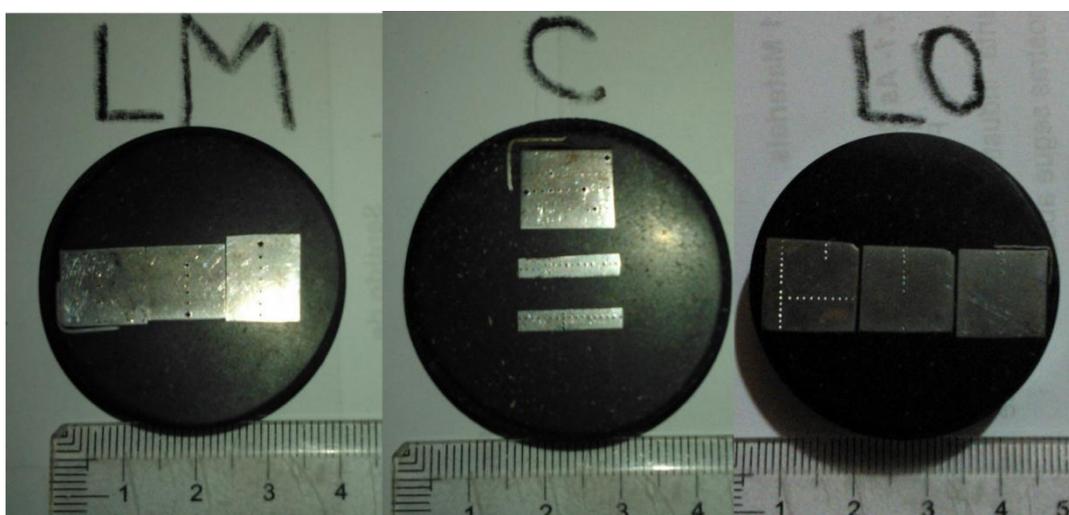
Fonte: Elaborada pelo autor.

Foi-se retiradas amostras do aço SAE 1010 laminado a quente com 3 mm de espessura na seguinte configuração: 1LO iniciando em 0 mm da borda à 10 mm da borda, 2LO iniciando em 12 mm da borda à 20 mm da borda e 3LO iniciando em 22 mm da borda à 30 mm da borda da chapa, mesma retirada de amostra segue para o lado motor LM.

As distancias possuem um intervalo de 2 mm que é a espessura do disco de corte utilizado.

Pode-se entender a disposição das amostras embutidas em Baquelites na figura 10.

Figura 10 Amostras nas Baquelites.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na figura 10, acima, pode perceber que na primeira baquelite existem 3 amostras LM (Lado Motor) 1LM, 2LM e 3LM, na figura central foi-se utilizada apenas a amostra da superfície da chapa e a direita pode-se notar as 3 amostras LO (Lado Operador) 1LO, 2LO e 3LO.

4.1.2- Lixas e panos de polir.

Foram utilizadas lixas de diferente granulação, variando de 200 mesh a 1200 mesh, para a preparação das amostras.

Panos de polir e pastas de diamantes com granulação variando de 6 microm a 1 microm.

4.1.3- Ataque Químico.

O ataque químico para revelação de fases foi utilizado o Nital 4% (Ácido nítrico + álcool) com o tempo de ataque de 20 segundos. [11]

4.2 Equipamentos

4.2.1 Corte.

Foi-se utilizado maquina de corte CMR-cut-off, com disco de corte de 2mm de espessura refrigerada para a realização dos cortes das amostras..

Figura 11 CMR -cut-off.



Fonte: catalogo Axitom-5. [12]

4.2.2 Embutimento.

Foi-se utilizado uma embutidora modelo Arotec Pre-30Mi para embutir as amostras em Baquelites.

Figura 12 Embutidora Arotec.



Fonte: Foto do autor.

4.2.3 Lixamento e polimento.

Na preparação da amostra foi utilizadas lixadeiras e politriz modelo arotec aropol.

Figura 13 Lixadeira e Politriz.



Fonte: Catalogo Arotec. [13]

4.2.4 Aquisição de imagens.

Para a aquisição das micrografias foi utilizado o microscópio Olympus de base invertida.

Figura 14 Microscópio Olympus.



Fonte: Catalogo Microscópio CKX41. [14]

4.2.5 Dureza.

Na medição da microdureza Vickers foi utilizado o microdurômetro modelo Shimadzu HMV-2.

Figura 15 Microdurômetro Shimadzu HMV-2.



Fonte: Foto do autor.

4.2.6 Programas.

Ao longo do trabalho foram utilizados 3 programas:

- 1- Image Pro Plus para a aquisição e melhoramento das imagens no microscópio óptico.
- 2- Tamanho de grão. (software criado por alunos do curso de engenharia metalúrgica na Universidade Federal do Ceará)
- 3- Minitab para a realização dos gráficos de microdureza Vickers e tamanho de grão ASTM.

4.3 Procedimento.

Inicialmente as amostras foram retiradas conforme mostrado na figura 9. As amostras foram cortadas de modo a caber na disposição desejada nas baquelites.

Foi realizado o embutimento das baquelites conforme mostrado na figura 10. E marcado na parte de trás da baquelite para que não houvesse trocas de amostras.

A preparação para a aquisição das imagens foi feita com o lixamento das amostras com lixas de diferentes granulações, partindo da lixa 200 mesh até a lixa de 1200 mesh.

Após o lixamento as amostras foram polidas utilizando panos de polimentos e pastas de diamantes partindo de 6 microns até 1 microns.

De posse das amostras devidamente polidas foi feito um ataque utilizando ácido nítrico + álcool. (Nital 4%) [11].

Com as fases devidamente reveladas as amostras foram levadas ao microscópio óptico para a aquisição das micrografias.

Após as micrografias foram realizados ensaios de microdureza de acordo com a norma ASTM E92. Onde esta dita a carga utilizada e o tempo necessário para cada tipo de aço.

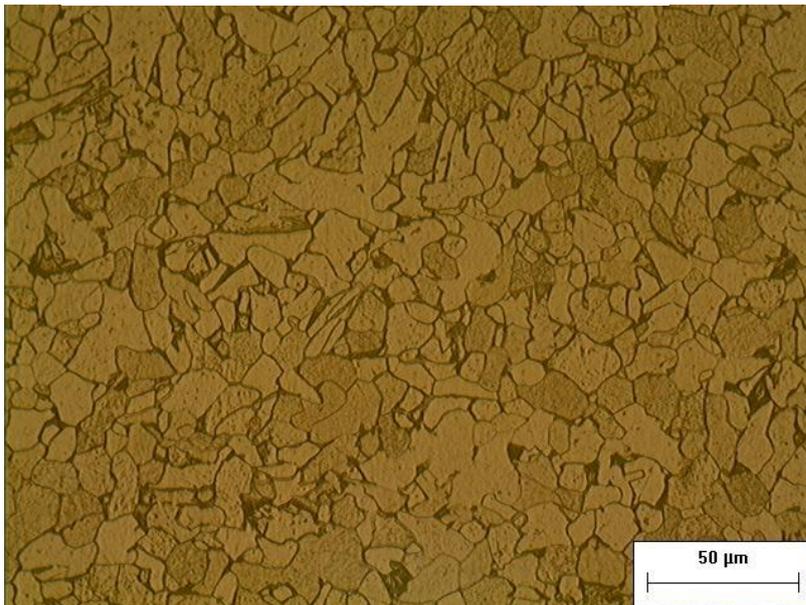
Para o aço SAE 1010 foi utilizado uma carga de 245,2mN durante 15 segundos.

Foram realizados 16 ensaios em cada amostra com um espaçamento de 0,5mm.

5. RESULTADOS

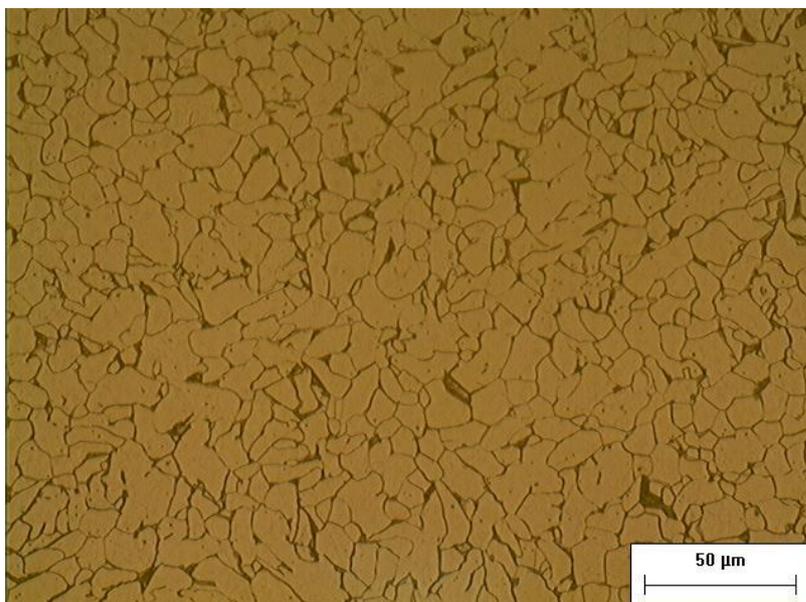
5.1 Micrografias.

Figura 16 1LM aumento de 500x



A figura 16 ao lado mostra a micrografia da borda lado motor, podem observar grãos heterogêneos e calculando o tamanho de grão ASTM com o auxílio do programa “Tamanho de Grão” tem-se $N=10.451$ que foi aproximado para $N=10$.

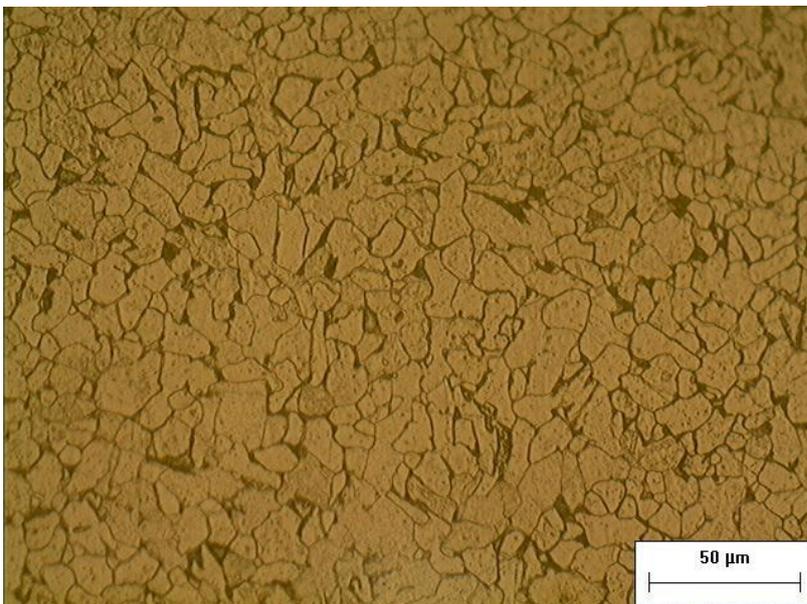
Figura 17 1LO aumento de 500x



A figura 17, ao lado, tem-se a micrografia da borda mais externa do lado operador onde podem observar grão de vários tamanhos e sem organização, grãos totalmente heterogêneos. Com o auxílio do programa “Tamanho de grão” tem-se o tamanho de grão calculado em $N=10.502$ aproximado

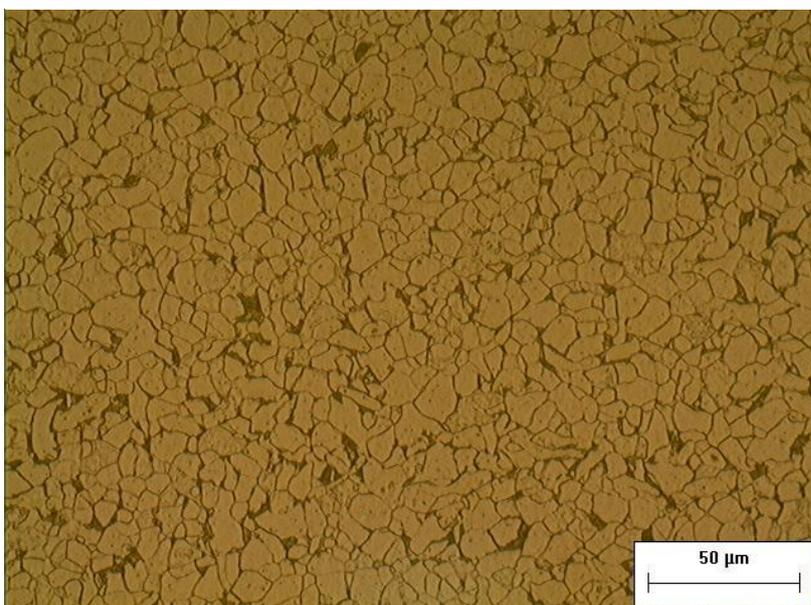
para $N = 10$.

Figura 18 2LM aumento de 500x.



Na figura 18, ao lado, pode-se notar grãos heterogêneos e quando utilizado o programa para calcular o tamanho de grão ASTM 2LM $N=10.794$ aproximado para $N=10$. Assim, as amostras 1LM e 2LM, iniciando em 0 mm da borda da chapa até 20 mm contém grãos heterogêneos e com tamanho muito próximos.

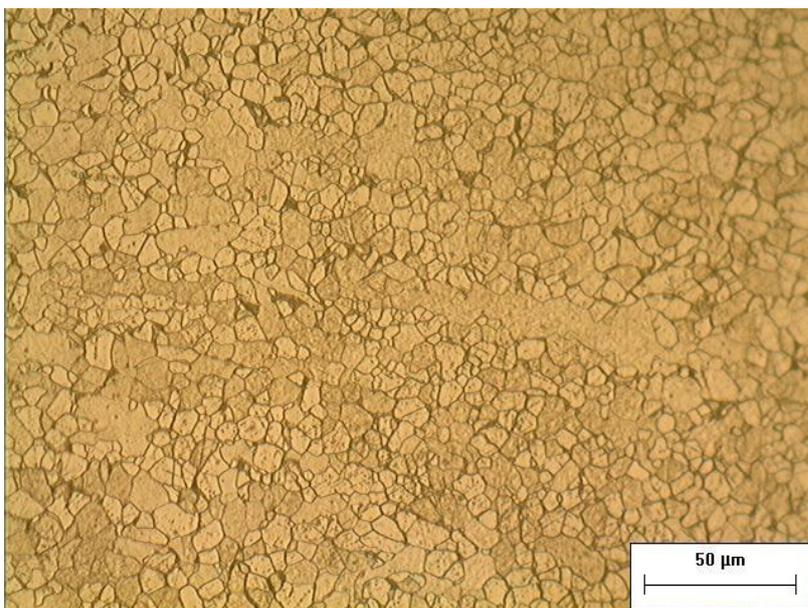
Figura 19 2LO aumento de 500x.



Ao lado tem-se a figura 19 onde se notam grãos heterogêneos, mas com menor tamanho de grão. Assim, utilizando a mesma norma para cálculo do tamanho de grão norma ASTM E112. O lado operador 2LO calcula $N=11.438$ aproximado para $N=11$.

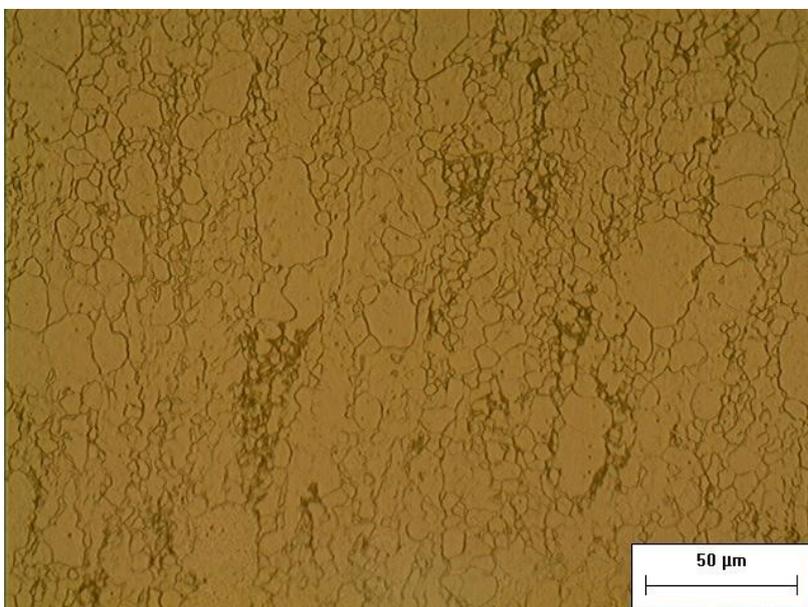
Pode-se notar claramente que na figura 18 os grãos são maiores.

Figura 20 3LM aumento de 500x.



Na figura 20, ao lado, pode-se perceber que o tamanho dos grãos estão menores quando comparado as amostras 1LM e 2LM, calculando o tamanho de grão ASTM para 3LM tem-se $N=13.514$ ou $N=13$.

Figura 21 3LO aumento de 500x.



A figura 21 ao lado mostra a micrografia do lado operador iniciando em 22 mm até 30 mm podem-se notar grãos heterogêneos, mas com menor tamanho quando comparados às amostras 1LO e 2LO. Quando calculado o tamanho de grão tem-se $N=12.350$ ou $N=12$.

Abaixo tem-se a figura 22 representando a micrografia central da chapa onde pode-se perceber grãos mais homogêneos e melhores quando comparado as bordas da chapa, assim utilizando o programa para calcular o tamanho de grão ASTM tem-se $N=14.649$ ou $N=14$.

Figura 22 Centro da Chapa aumento de 500x.

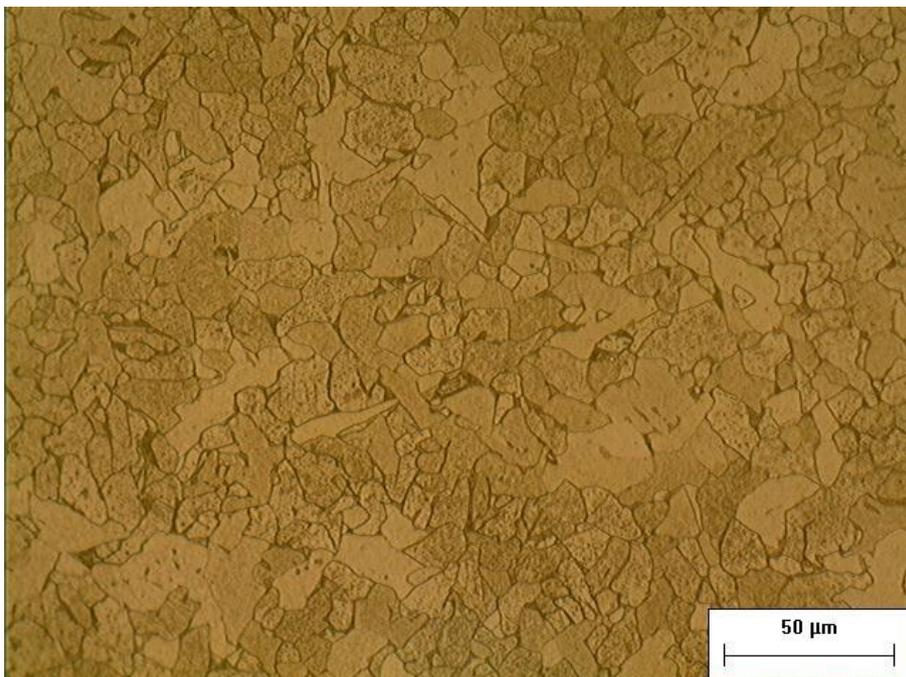
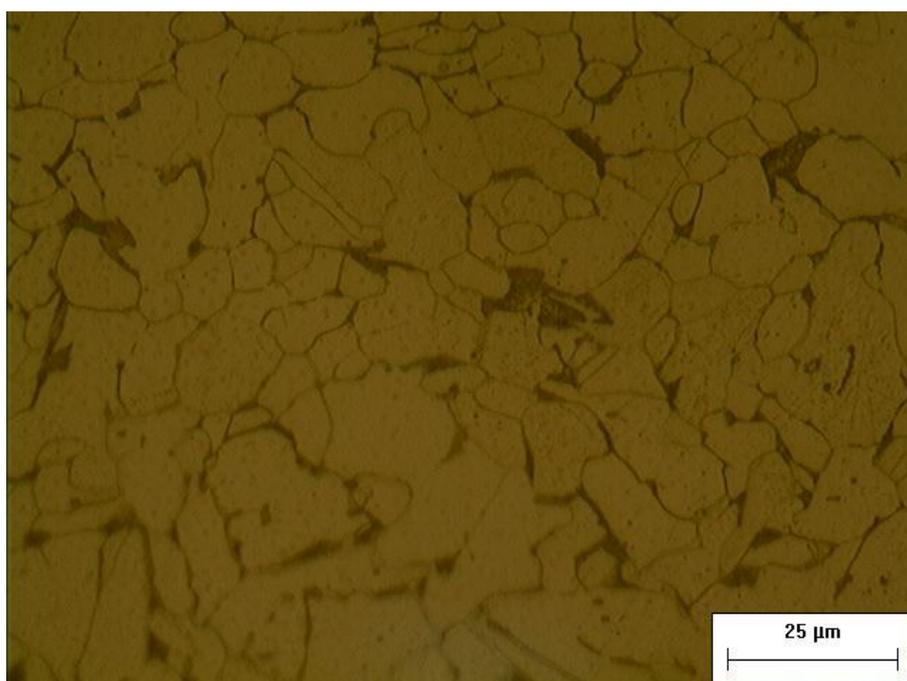


Figura 23 Centro da Chapa aumento de 1000x.



A figura 23, ao lado, mostra a micrografia da amostra central da chapa em destaque com aumento de 1000x para melhor visualização dos grãos.

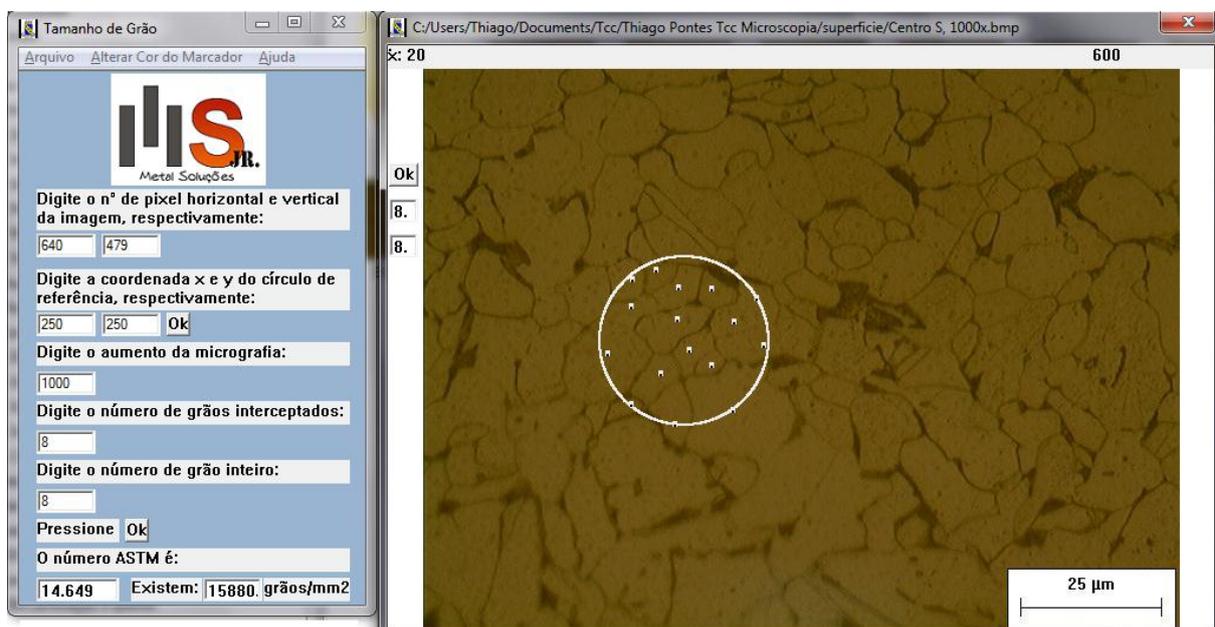
Abaixo tem-se a figura 24 destacando o programa utilizado para o cálculo do tamanho de grão ASTM e tem-se o exemplo de como é feito esse cálculo. O cálculo é feito utilizando a norma ASTM E112. Onde diz:

Faz-se um círculo com $0,5\text{mm}^2$ na micrografia e contam-se os grãos inteiros dentro do círculo e grãos cortados pelo círculos, aplicando na formula:

$$N=(N_{\text{dentro}} + (N_{\text{cortados}}/2))/\text{área}$$

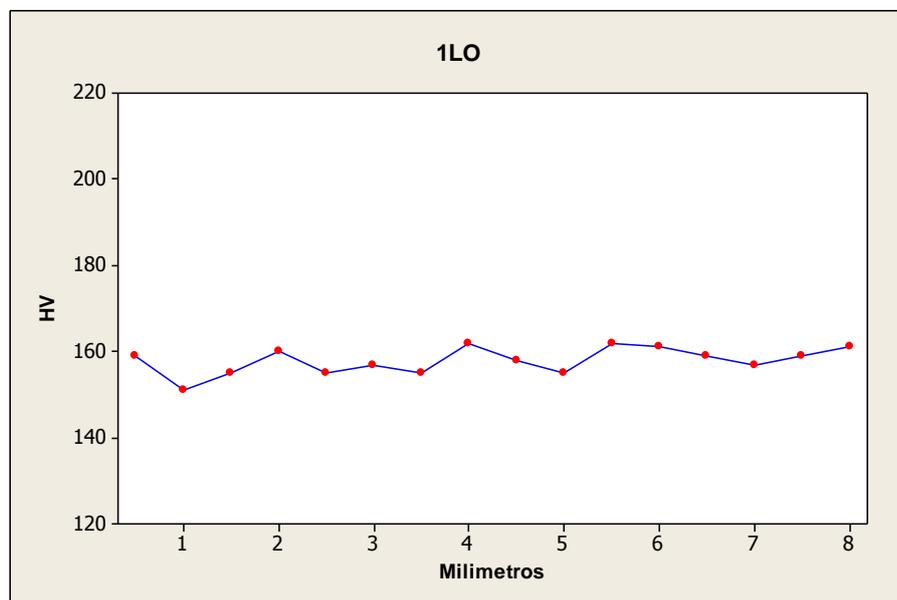
Assim como pode ser visto o $N=14.649$ ou $N=14$.

Figura 24 Software Tamanho de grão.



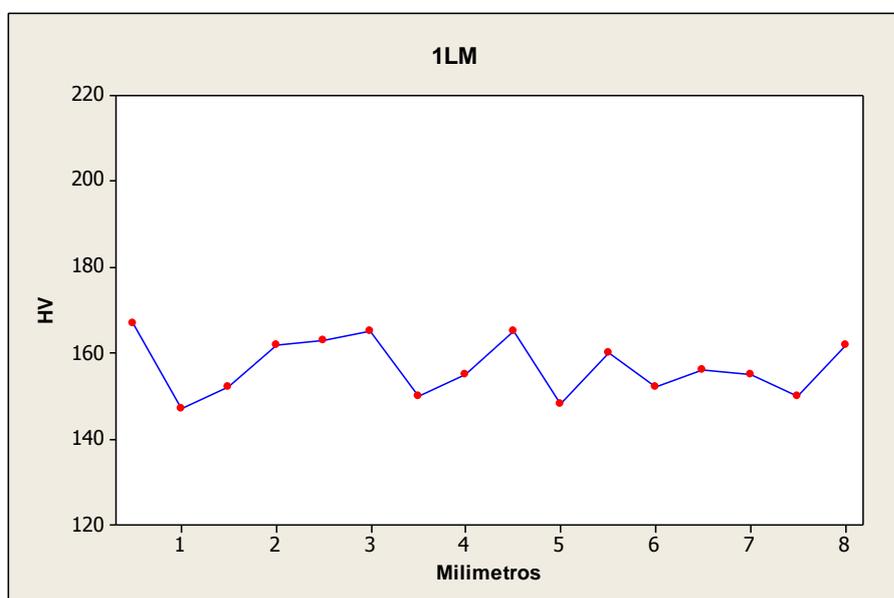
5.2 Microdurezas.

Figura 25 Gráfico da Microdureza Vickers 1LO.



Ao lado tem-se a figura 25 que representa o gráfico de microdureza Vickers na borda 1LO. Tem-se 16 pontos medidos na amostra. Observam-se pequenas diferenças de microdurezas.

Figura 26 Gráfico da Microdureza Vickers 1LM.

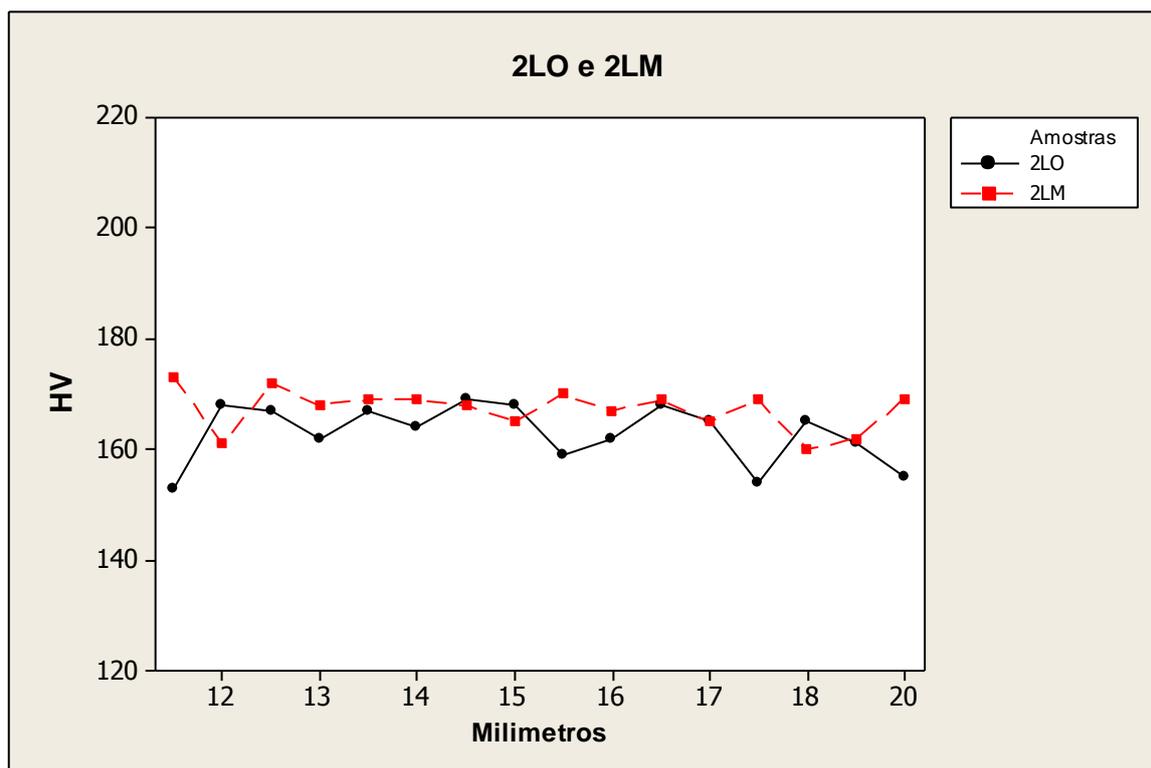


Pode-se notar na figura 26, ao lado, o gráfico de microdureza Vickers na borda 1LM. Tem-se 16 pontos medidos na amostra. Observam-se algumas diferenças de microdurezas, mas em pequena escala.

Ao calcular a média da dureza no lado 1LO, figura 25, tem-se 157,87HV com tamanho de grão ASTM N=10 e faz-se as mesmas operações para o lado 1LM, figura 26, tem-se dureza média igual a 156,81HV e mesmo tamanho de grão ASTM N=10. É o que se devem esperar para um mesmo tamanho de grão médio de durezas muito próximas.

A figura 27 mostra as medidas de microdureza Vickers pras as amostras 2LM e 2LO, juntas em um mesmo gráfico melhor visualização.

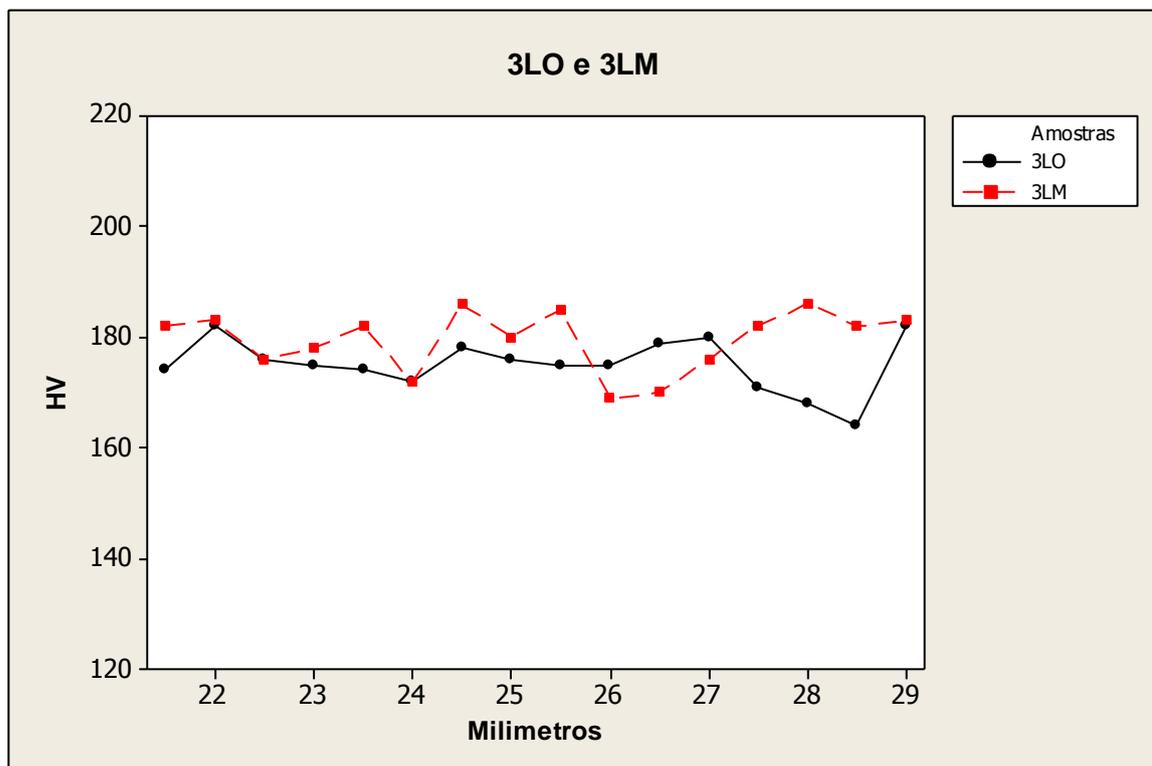
Figura 27 Gráfico da Microdureza Vickers 2LO e 2LM.



Analisando o gráfico acima, figura 27, pode-se perceber que os pontos de microdureza estão muito próximos, tendo em vista que os números de grãos ASTM do 2LO e 2LM são 11 e 10 respectivamente, era pra ser esperado que a borda 2LO com tamanho de grão menor possuísse maior média de dureza em relação à borda 2LM, mas não foi o que aconteceu. O lado operado 2LO teve média de dureza 162,93HV e lado motor 2LM 167,25HV.

A figura 28 mostra as microdurezas Vickers iniciando em 22 mm da borda até 30 mm da borda. Assim pode-se notar que mesmo em pequena escala o lado motor possui maior microdureza.

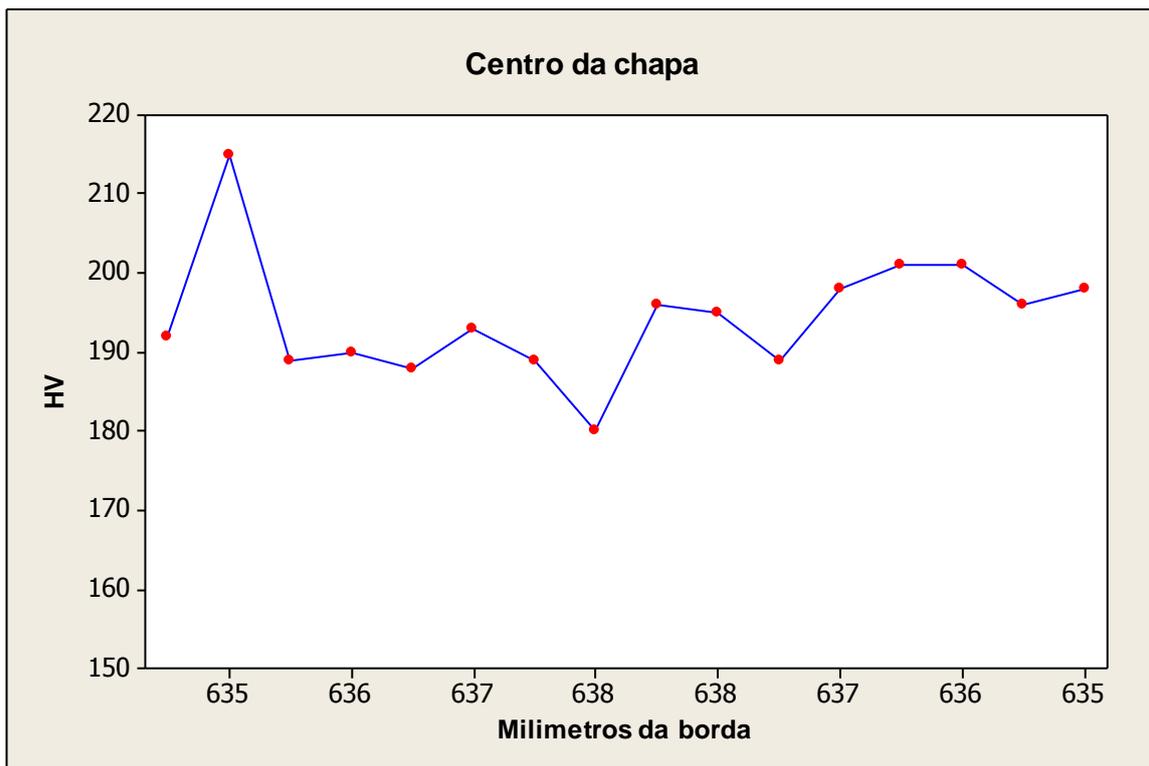
Figura 28 Gráfico da Microdureza Vickers 3LO e 3LM.



Pode-se notar o fato de o lado motor 3LM possui uma maior microdureza. As médias de microdureza Vickers são 3LM 179,50HV e 3LO 175,06HV. O tamanho de grão ASTM para o lado motor é N=13 e N=12 para o lado operando. Como o tamanho de grão do lado motor é melhor faz sentido este lado possuir maior microdureza.

A figura 29 representa as medidas de microdureza Vickers do centro da chapa em um único gráfico.

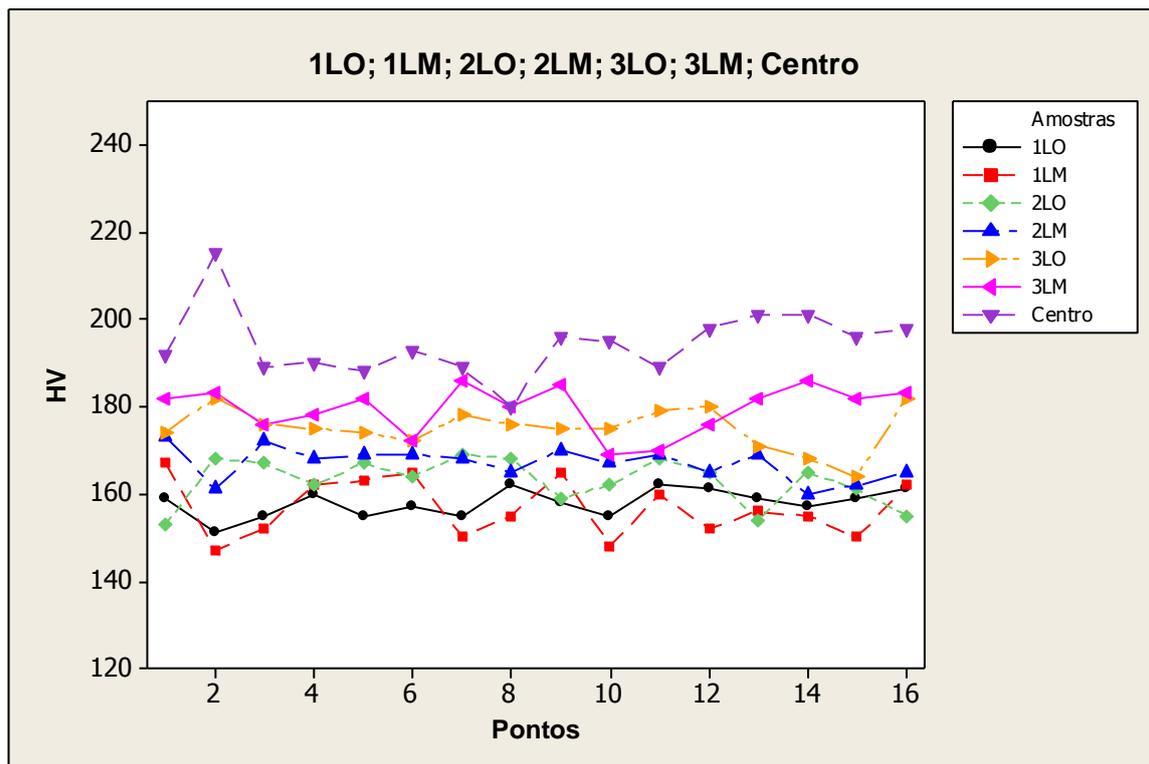
Figura 29 Gráfico Microdureza Vickers no centro da chapa.



A chapa em destaque tinha 1280 mm e em destaque na figura 29 tem-se os pontos indo do centro da chapa em direção a borda. Os valores no centro da chapa estão na ordem de 200HV uma diferença de quase 40HV em relação às bordas 1LM e 1LO.

Na figura 30 tem-se o gráfico com todas as medidas pode-se notar a diferenças de microdureza Vickers do centro em relação às bordas da chapa.

Figura 30 Gráfico Microdureza Vickers todas as amostras.



Nesta figura 30, pode-se notar facilmente a relação do tamanho de grão ASTM com a microdureza. No centro da chapa laminada que apresentou tamanho de grão ASTM N=14 tem-se pico de dureza que supera os 200HV e em contra partida tem-se as bordas destacando a linha vermelha que equivale à borda 1LM que possui tamanho de grão ASTM N=10 e sua microdureza Vickers está na ordem de 160HV.

Abaixo temos a tabela com todos os pontos das microdurezas Vickers das amostras.

Tabela 2 Valores de microdureza.

Amostra Pontos	1LO/A	1LM	2LO	2LM	3LO	3LM	Centro
1	159	167	153	173	174	182	192
2	151	147	168	161	182	183	215
3	155	152	167	172	176	176	189
4	160	162	162	168	175	178	190
5	155	163	167	169	174	182	188
6	157	165	164	169	172	172	193
7	155	150	169	168	178	186	189
8	162	155	168	165	176	180	180
9	158	165	159	170	175	185	196
10	155	148	162	167	175	169	195
11	162	160	168	169	179	170	189
12	161	152	165	165	180	176	198
13	159	156	154	169	171	182	201
14	157	155	165	160	168	186	201
15	159	150	161	162	164	182	196
16	161	162	155	169	182	183	198
Média	157,875	156,8125	162,9375	167,25	175,0625	179,5	194,375

Todas as durezas acima são em HV.

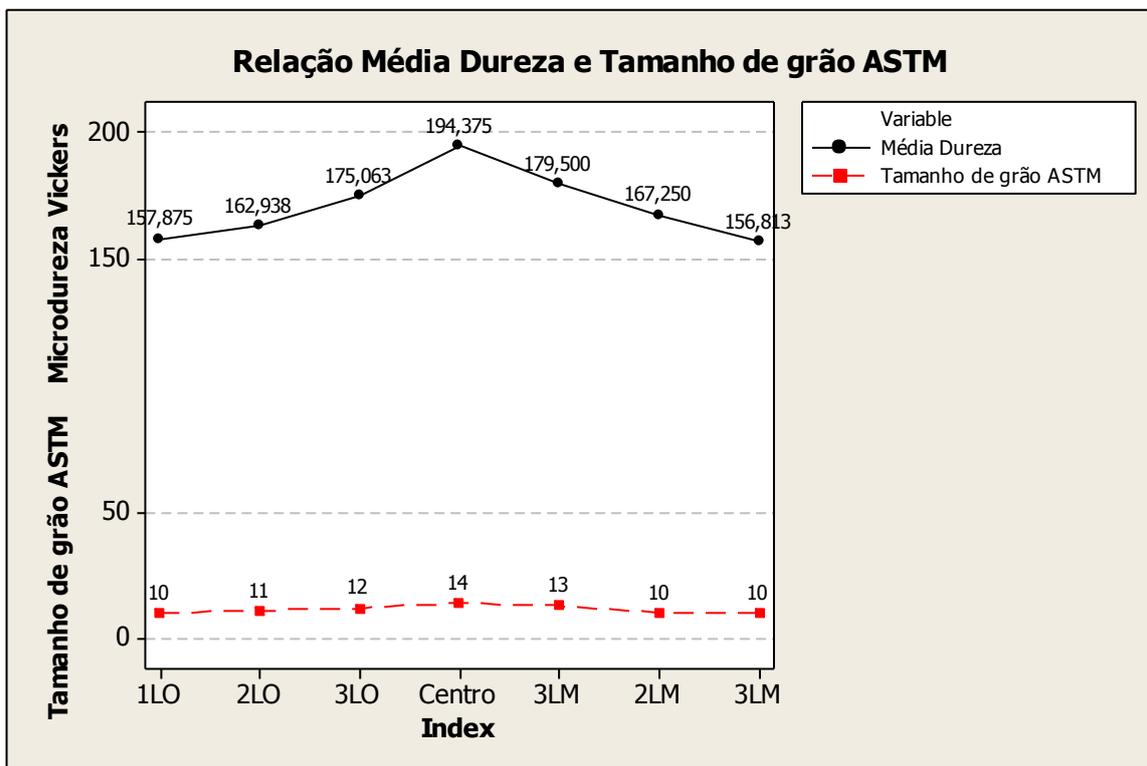
5.3 Relação da microdureza com o tamanho de grão ASTM.

Relação do tamanho de grão ASTM com a microdureza média obtidas nas amostras é mostrado na tabela abaixo, pode-se perceber que quanto menor o grão maior será a microdureza Vickers apresentada.

Tabela 3 Tamanho de Grão ASTM x Microdureza média

Amostra	Média Dureza	Tamanho de grão ASTM
1LO	157,87	10
1LM	156,81	10
2LO	162,93	11
2LM	167,25	10
3LO	175,06	12
3LM	179,50	13
Centro	194,37	14

Figura 31 Média das Microdurezas.



A figura 31, acima, mostra a variação da média das microdurezas partindo do ponto 0 (centro da chapa) e os 3 pontos na borda.

Pode-se notar claramente a variação da dureza (linha preta) e a variação do tamanho de grão ASTM (linha vermelha).

6. CONCLUSÃO

Com base nas microscopias e nos ensaios realizados neste trabalho, pode-se concluir que para esta temperatura de laminação e esta espessura da chapa não se pode garantir uma total confiabilidade do material ao longo de toda a sua largura.

Tendo em vista que a temperatura de laminação influencia diretamente no tamanho de grão, deve-se estar ciente que as bordas da chapa laminada a quente irão sofrer um maior resfriamento tornando os grãos mais grosseiros e heterogêneos.

Como era esperado de acordo com a literatura a microdureza está diretamente relacionada com o tamanho de grão do material, assim pode-se notar na figura 30 que com a variação do tamanho de grão conseqüentemente variou a microdureza.

Assim para que a qualidade do material possa ser garantida devemos descartar as bordas do material.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tomando como base este trabalho pode-se sugerir a caracterização de outros aços também laminados a quente em planta industrial e com outras taxas de resfriamento.

Pode-se também sugerir que no futuro possa ser colhidas amostras ao longo de todo a largura da chapa. Assim podemos criar um perfil de microdureza e microestrutura com toda a garantia, não apenas no centro e nas bordas.

Aumentar a temperatura de laminação nas cadeiras de acabamento e avaliar as propriedades mecânicas.

Analisar de forma mais aprofundada o local exato para que possa ocorrer o descarte da borda de maneira eficiente.

Analisar a existência de fases ferritas laminadas que possam influenciar nas propriedades da chapa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. 6.ed. SÃO PAULO: ABM, 1988.
- [2] Callister, William D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia dos Materiais**. LTC, Rio de Janeiro, 2006
- [3] Geoger E. Dieter - **Mechanical Metallurgy, SI Metric Edition**,1988, Singapore.
- [4] **Book treinamento engenheiro Companhia Siderúrgica Nacional - 2009**
- [5] Siciliano junior, F; Padilha a. F. **Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura**. ABM, São Paulo, 1995 p 86 -93
- [6] ROBERTS,W. et al. Prediction of microstructure development during recrystallization hot rolling of Ti-V steels. HSLA Steels, Technology and Applications; Philadelphia, Pa; U.S.A ; 3-6 Oct. 1983. p. 67-84
- [7] HILL, R. E. R. **Princípios de Metalurgia Física**. 2 ed. Rio de Janeiro 1973. Editora Guanabara Dois.
- [8] Acervo de imagens disponível em < <http://estudomec.info/> > Acesso em 10/11/2012
- [9] SOUZA, Sérgio agosto de, **Ensaio Mecânicos em Materiais Metálicos – Fundamentos Teóricos e Práticos**, Edgard Blücher, São Paulo, 1982, 125 p.
- [10] Walter Mannheimer, **Microscopia dos Materiais: Uma Introdução**, 1ª Ed, Editora E-papers, 2002.
- [11] Voort, G. F. Vander; Manilova, E. P. **Hints for IMAGING PHASES IN STEELS, Advanced Materials & Processes**, Volume 163, Issue 02, February, 2005 (ASM International).
- [12] Catalogo disponível em < <http://www.struers.com> > Acesso em 11/12/2012.
- [13] Catalogo disponível em < <http://www.arotec.com.br> > Acesso em 11/12/2012
- [14] Catalogo disponível em < <http://www.brzmg.com.br> > Acesso em 11/12/2012