



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
Curso de Engenharia Mecânica

LUAN ARTELINO LEMOS MADEIRA ARAUJO

**ANÁLISE DA RELAÇÃO ELÁSTICA NO VERGALHÃO DO
AÇO CA-60 TRABALHADO A FRIO A PARTIR DA
VARIÇÃO DE POSIÇÃO APLICADA NUMA BANCADA DE
TENSÕES PRÉ ENDIREITAMENTO**

São Luís

2018

LUAN ARTELINO LEMOS MADEIRA ARAUJO

**ANÁLISE DA RELAÇÃO ELÁSTICA NO VERGALHÃO DO
AÇO CA-60 TRABALHADO A FRIO A PARTIR DA
VARIÇÃO DE POSIÇÃO APLICADA NUMA BANCADA DE
TENSÕES PRÉ ENDIREITAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica,
da Universidade Estadual do Maranhão, apresentado como
requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Professor Dr. Adilto Pereira Cunha

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL
DA MONOGRAFIA DEFENDIDA PELO ALUNO LUAN
ARTELINO LEMOS MADEIRA ARAÚJO E ORIENTADA
PELO PROF. DR. ADILTO PEREIRA CUNHA.

.....
ASSINATURA DO ORIENTADOR

São Luís

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA CENTRAL - UEMA

Araujo, Luan Artelino Lemos Madeira.

Análise da relação elástica no vergalhão do aço CA 60 trabalhado a frio a partir da variação de posição aplicada numa bancada de tensões pré endireitamento / Luan Artelino Lemos Madeira Araujo. – São Luís, 2018. 59 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Adilto Pereira Cunha.

1. Laminação. 2. Aços. 3. Projeto. 4. Ensaio. 5. Microestrutura.
I. Título.

CDU 669.018

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DA RELAÇÃO ELÁSTICA NO VERGALHÃO DO
AÇO CA-60 TRABALHADO A FRIO A PARTIR DA
VARIAÇÃO DE POSIÇÃO APLICADA NUMA BANCADA DE
TENSÕES PRÉ ENDIREITAMENTO

Autor: Luan Artelino Lemos Madeira Araújo

Orientador: Professor Dr. Adilto Pereira Cunha

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Monografia:

Prof. Dr. Adilto Pereira Cunha
Universidade Estadual do Maranhão (CCT/UEMA)

Prof. Dr. Valdemar Silva Leal
Universidade Estadual do Maranhão (CCT/UEMA)

Prof. Msc. Manuel de Jesus Marin Caro
Universidade Estadual do Maranhão (CCT/UEMA)

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

São Luís-MA, 25 de junho de 2018.

“A vitória está reservada àqueles
que estão dispostos a pagar o preço.”

Sun Tzu

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que tanto me abençoou e concedeu-me o dom da vida e toda graça para este momento acontecer.

Minha sincera gratidão ao meu pai Raimundo Lemos Araújo Filho e minha mãe Lucineide Lemos Madeira, pelo apoio incondicional em todas as áreas da minha vida, pelo esforço, dedicação e paciência até aqui.

Ao meu irmão Lucas pelos conselhos e puxões de orelha quando necessário, a mulher do meu pai, Cristiane, pelo apoio e pelas batalhas diárias nas conquistas da vida e aos demais familiares que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação acadêmica.

Gratidão ao excelente corpo docente da UEMA, por me passar os conhecimentos necessários para tornar-me o profissional que sou hoje, em especial ao professor Dr. Adilto Pereira Cunha, pelo suporte técnico e por aceitar o desafio de desenvolver esta pesquisa no chão de fábrica da empresa.

Agradeço também aos meus amigos da UEMA. Rodrigo por ter me aturado nesse período de monografia e em especial aos do Diretório Acadêmico de Engenharia Mecânica: Jacyeude, Andrews, Kaio, Anderson, Sony e Alberto, que me proporcionaram experiências únicas e intensas vividas nesta IES, sendo boas destas compartilhadas no âmbito informal do especial bar do Carlão.

Aos colegas de trabalho, em especial a equipe de manutenção (PCM) e do laboratório de qualidade, pelos aprendizados e experiências acerca da área industrial que complementam minha carreira profissional. E a gerência da empresa pela oportunidade de aplicar meus conhecimentos numa fábrica que só tem a crescer!

Gratidão e um “APAREÇAM, VEI!” também aos meus amigos de infância e jornada, Alecsander, Marcus, Victor, Paulo e Gabriel, que mesmo com certa distância a amizade e apoio prevalecem sempre, amigos para toda a vida!

Agradeço a minha namorada, Srta. Melzinha, por ser fonte de inspiração profissional e pessoal, me dá altos puxões de orelha e vem me apoiando e incentivando nos projetos da vida. Te amo, morena! Vamos na conquista desse mundo! Juntos somos mais fortes!

E a todos que contribuíram para tornar-me o profissional que sou hoje, sempre em busca de conhecimentos e com a humildade no coração! Jah Bless!

RESUMO

Esta pesquisa diz respeito a implantação de uma bancada de tensões no estágio de pré endireitamento de uma máquina de laminação a frio da fabricante italiana *DEM*, na busca de adequar a relação elástica do vergalhão do aço CA-60 tipo bobina, para torná-lo vendável com base na exigência da norma ABNT 7480:2015, haja vista o surgimento de um problema de qualidade no setor fabril de uma indústria maranhense. A metodologia de projeto seguida teve como princípio o projeto de máquinas e dispositivos objetivando boa resistência aos esforços solicitados no processo de conformação mecânica, somados a boa qualidade e preço, bem como as análises computacionais e laboratoriais utilizando durômetro, microscópio ótico e máquina universal para ensaios mecânicos. Portanto, conhecendo a operação, os testes de qualidade exigidos e averiguando a baixa resistência a tração e escoamento do material após o trabalho a frio, projetou-se a bancada de tensões variando o ângulo de contato e, posteriormente, verificou-se graficamente a curva de encruamento de acordo com a posição, os tamanhos de grão e o ganho de resistência obtido.

Palavras-chave: Laminação; aços; projeto; ensaios; microestrutura;

ABSTRACT

This research concerns the implementation of a tensile stand in the pre-straightening stage of a cold rolling machine of the Italian manufacturer DEM, in order to adapt the elastic relation of the rebar of the CA-60 coil steel, to make it salable based on the requirement of ABNT 7480: 2015, given the emergence of a quality problem in the manufacturing sector of a Maranhão industry. The design methodology followed was the design of machines and devices aiming at good resistance to the efforts required in the mechanical conformation process, together with good quality and price, as well as the computational and laboratory analysis using a durometer, optical microscope and universal testing machine mechanics. Therefore, knowing the operation, the quality tests required and checking the low tensile strength and flow of the material after the cold work, the tensile bench was designed by varying the contact angle and, subsequently, graphically verified the curve of hardening according to the position, grain sizes and obtained resistance gain.

Key-works: *Lamination; steels; design; Testing; microstructure;*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Instalações da fábrica. (Grupo Dimensão, 2014).	4
Figura 2 - Desenho esquemático de um corpo de prova submetido à tração: (a) estático; (b) início da deformação; (c) após rompimento. (Souza, 1982).	8
Figura 3 - Instrumento utilizado nesse tipo de ensaio – Escleroscópico. (Souza, 1982).	11
Figura 4 - Representação de penetração de dureza Brinell. (Souza, 1982).	11
Figura 5 – Esquema de ensaio de dureza Meyer. (Souza, 1982).	12
Figura 6 – Passo a passo para ensaio de dureza Rockwell. (Souza, 1982).	13
Figura 7 – Tipos de penetradores. (Souza, 1982).	14
Figura 8 – Exemplo de material que falhou por fadiga. (Callister, 2007).	14
Figura 9 - Representação dos ciclos de tensão. (Callister, 2007).	15
Figura 10 - Comportamento tensão-deformação de engenharia	17
Figura 11 - Representação esquemática dos estágios da solidificação. (Callister, 2007).	18
Figura 12 - Representação esquemática do contorno de grão agindo como barreira para a movimentação das discordâncias. (Callister, 2007).	19
Figura 13 - Representação esquemática da distorção na rede cristalina em função da inserção de átomos intersticiais. (Callister, 2007).	20
Figura 14 - Material com microestrutura a) antes da deformação e b) depois da deformação. (Gerda, 2007).	20
Figura 15 - Variação das propriedades mecânicas no trabalho a frio. (Dieter, 1998).	21
Figura 16 - Curva Tensão Cisalhante X Distorção para monocristais. (Dieter, 1988).	22
Figura 17 - Estrutura tetragonal da Martensita. (Lee, 2010).	23
Figura 18 - Procedimento de projeto e pesquisa adotado. (Autor, 2018).	24
Figura 19. (A) Bobinas de F.M. (B) Corpo de prova o F.M. embutido. (Autor, 2018).	25
Figura 20- (A) Bobinas de aço laminado a frio (B) Corpo de prova do produto final embutido. (Autor, 2018).	26
Figura 21 - (A) Laminador duo não-reversível e retorno por cima; (B) Laminador duo reversível; (C) Laminador trio; (D) Laminador quadro; (E) Laminador Sendzimir. (CELTIN, 1999).	27
Figura 22 - Encruamento em uma operação de laminação. (Kininani, 2013).	27
Figura 23 - Máquina de laminação a frio DEM. (Autor, 2018).	28
Figura 24 - Cassete de Laminação (Manual DEM). (Autor, 2018).	28
Figura 25 - Estágios finais de trabalho da máquina de laminação a frio DEM. (Manual DEM). ...	30
Figura 26 - Vista superior e Isométrica da bancada de tensões montada sob a base da máquina no estágio de pré endireitamento do arame. (Autor, 2018).	30
Figura 27 - Malha de simulação pino de apoio do rolete central móvel. (Autor, 2018).	31

Figura 28 - Medição de bitola do fio no primeiro cassete. (Autor, 2018).	32
Figura 29 - Vergalhão livre de tensão na bancada. (Autor, 2018).	32
Figura 30 - Deslocamento mínimo no vergalhão. (Autor, 2018).	33
Figura 31 - Deslocamento médio no vergalhão. (Autor, 2018).	33
Figura 32 - Deslocamento máximo no vergalhão. (Autor, 2018).	33
Figura 33 - Máquina de Ensaio Mecânico Universal utilizada. (Autor, 2018).	34
Figura 34 - Gabarito utilizado para marcação do corpo de prova. (Autor, 2018).	35
Figura 35 - Procedimento do setor de qualidade da fábrica para recebimento do F.M. ...	35
Figura 36 - Amostra do vergalhão pós ensaio de dobramento (Autor, 2018).	36
Figura 37 - Policorte (Autor, 2018)	37
Figura 39 - Embutidora Metalográfica e resina de baquelite. (Autor, 2018).	38
Figura 40 - Politriz de lixamento e polimento (A) e Abrasivo tipo Alumina 1 μ	39
Figura 41 - Modo correto (A) e incorreto (B) de secar amostra antes do ataque químico. (Colpaert, 1998).	40
Figura 42 - Microscópio Olympus utilizado. (Autor, 2018).	40
Figura 43 - Durômetro Mitutoyo – HR-430MS. (Autor, 2018).	41
Figura 44 - Corpo-de-prova sob efeito do penetrador. (Autor, 2018).	41
Figura 45 - Pontos de fixação e força aplicada no pino do rolete central móvel	42
Figura 46 - Estudo da tensão de Von Misses (Autor, 2018).	43
Figura 47 - Estudo do deslocamento (Autor, 2018).	43
Figura 48 - Curva Limite de Resistência à Tração X Posição do Rolete Central (Autor, 2018).	44
Figura 49 - Curva Limite de Escoamento X Posição do Rolete Central (Autor, 2018).	45
Figura 50 - Grão transversal e longitudinal respectivamente do Fio-máquina (Autor, 2018).	46
Figura 51 - Grão transversal e longitudinal respectivamente do vergalhão aço CA-60 sem aplicação da bancada de tensões (Autor, 2018).	46
Figura 52 - Grão transversal e longitudinal respectivamente do vergalhão aço CA-60 com deslocamento à 55 mm aplicação da bancada de tensões (Autor, 2018).	46
Figura 53 - Grão transversal e longitudinal respectivamente do vergalhão aço CA-60 com deslocamento à 115mm aplicação da bancada de tensões (Autor, 2018).	47
Figura 54 - Grão transversal e longitudinal respectivamente do vergalhão aço CA-60 com deslocamento à 230 mm aplicação da bancada de tensões (Autor, 2018).	47
Figura 55 - Montagem da estimativa do tamanho de grão. (Autor, 2018).	48
Figura 56 - Distribuição do tamanho médio dos grão (Autor, 2018).	48
Figura 57 - Distribuição de Dureza X Deslocamento do rolete central móvel. (Autor, 2018).	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Escala de dureza Mohs. (Callister, 2007).	10
Tabela 2 – Demonstrativo de valores de K. (Souza, 1982).....	12
Tabela 3- Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento, e Coeficiente de Poisson para Várias Ligas Metálicas a Temperatura Ambiente. (Callister, 2007).....	16
Tabela 4 - Propriedades dos principais aços utilizados com baixo teor de carbono. (ABNT NBR NM 87:2000).....	25
Tabela 5 - Especificações do laminador à frio da DEM. (Autor, 2018).....	29
Tabela 6 - Dados da malha utilizada. (Autor, 2018).....	31
Tabela 7 - Características do material do pino. (Autor, 2018).	42
Tabela 8 - Medições de durezas Rockwell. (Autor, 2018).....	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Empresa.....	4
2	OBJETIVOS	5
2.1	Objetivo geral	5
2.2	Objetivos específicos	5
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
3.1	Propriedades mecânicas gerais	6
3.2	Ensaio mecânicos	6
3.2.1	Ensaio de Tração	7
3.2.2	Ensaio de Dureza.....	9
3.2.3	Por risco.....	9
3.2.4	Por choque ou ressalto.....	10
3.2.5	Por penetração.....	11
3.3	Ensaio de fadiga	14
3.4	Comportamento Tensão-deformação.....	15
3.5	Conformação mecânica	17
3.6	Métodos de endurecimento	18
4	MATERIAIS E MÉTODOS	24
4.1	Produto em pesquisa	25
4.2	Processo em pesquisa.....	26
4.3	Ativo em pesquisa	27
4.4	Projeto dimensional	29
4.5	Retirada de amostras	31
4.6	Ensaio de Tração	34
4.7	Análise metalográfica.....	36
4.7.1	Corte das amostras.....	37
4.7.2	Embutimento a quente.....	38

4.7.3	Lixamento e Polimento	39
4.7.4	Ataque químico	39
4.7.5	Exposição das amostras	40
4.8	Ensaio de dureza.....	41
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
5.1	Simulação de esforços na estrutura	42
5.2	Curva de encruamento.....	44
5.3	Microscopia	45
5.3.1	Tamanho de Grão	45
5.4	Tabela de medições de dureza	49

1 INTRODUÇÃO

O ferro é um dos metais mais antigos da civilização humana e a sua reciclagem é igualmente remota. Os mais antigos artefatos de ferro que se tem conhecimento são dois objetos encontrados no grande Egito, mais precisamente na Pirâmide de Gizé, construída aproximadamente em 2900 A.C., e outro na tumba de Abidos, construída aproximadamente em 2600 A.C. No império romano, os soldados encaminhavam para os instrumentos de guerra deixados nas trincheiras para a produção de novos aparatos. Outras aplicações na civilização antiga já demonstravam o grande potencial que este material possuía e iria atingir.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), mesmo com a queda de 14,3% do Produto Interno Bruto (PIB) da construção civil no Brasil desde o 2º trimestre de 2013, é o setor que mais movimenta o mercado a nível nacional e mundial e gera maior impacto no emprego e bem-estar da população. Toda essa infraestrutura e habitação demandam grandes volumes de aço em diversas formas de utilização (IBGE, 2014).

O consumo “per capita” de aço no Brasil, vem se mantendo na ordem dos 100 kg/hab/ano desde 1980 com aumentos singelos tal consumo é baixo quando comparado aos valores observados nas economias desenvolvidas, ou seja, países de primeiro mundo, sendo estas superiores, pois chegam a 400 kg/hab/ano (IBS, 2012).

No atual estágio da economia brasileira, a evolução do consumo de aço apresenta elasticidade de renda elevada e forte correlação com as evoluções do PIB e do produto industrial. Cinco grandes setores - construção civil, automotivo, bens de capital, utilidades domésticas e comerciais, embalagens e recipientes representam mais de 80% do consumo de aço no Brasil. A construção civil responde, sozinha, por cerca de 30%, sendo o segmento de maior potencial de crescimento (IBS, 2012).

A maximização da economia de um país com base na industrialização, demanda no aço um insumo básico. A nível mundial é o material com maior aplicação na indústria, devido as suas propriedades químicas, mecânicas e físicas, baixo custo e diversidade de aplicações. Além disso, pesquisas científicas envolvendo ligas metálicas estão constantemente sendo aprimoradas, em consonância com as novas tendências mercadológicas.

O aço como produto siderúrgico é obtido por via líquida, por meio da fusão do ferro como componente básico e o carbono com um teor em até 2 % resulta em uma liga Fe-C. São

encontrados nessa liga também níquel, volfrâmio, manganês, cromo, fósforo, enxofre entre outros elementos e resíduos resultantes do processo de fabricação (CHIAVERINI, 1982).

Dentro das siderurgias, não há setor de reciclagem específico para os aços novos e nem usados. Em seu reuso, eles se misturam em ligas cada vez mais eficazes. Desse modo, fica evidente que o aço é 100% reciclável. A sucata do aço pode ser transformada infinitas vezes sem perda de qualidade. O metal pode ser fabricado a partir da combinação minério de ferro e carvão, aquecidos em alto-forno, ou por meio da reciclagem da sucata, feita em forno elétrico, ambos com temperatura controlada.

Atualmente os produtos siderúrgicos brasileiros competem diretamente com produtos importados de países como China, Rússia e Índia (IBS, 2013). O mercado dos países anteriormente citados forma um forte e seletivo grupo político-econômico de cooperação mútua. Os chamados BRICS: Brasil, Rússia, China e Índia, embora não sejam ainda um bloco econômico ou associação de comércio formal, como a União Europeia, desde 2009 fortalecem sua aliança no intuito de crescer o poderio econômico em uma maior influência geopolítica.

Segundo o Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS, 2014), ao considerar o cenário atual do mercado brasileiro, o aço importado custa 25% mais caro em relação ao produto interno. Desse modo, é importante torná-lo mais competitivo em relação aos demais países e grupos econômicos, como a União Europeia, sendo necessário realizar pesquisas a fim de desenvolver novos produtos ou realizar melhoria nos processos, estabelecendo padrões de preço e qualidade.

Em se tratando de produção siderúrgica, os produtos acabados planos e não planos, podem ser classificados como bobinas, chapas, barras, trilhos e acessórios, tubos, vergalhões, fios-máquina, perfis comuns, perfis especiais etc. Nesta pesquisa iremos utilizar o fio-máquina com seção transversal circular laminado a frio. Normalmente, a laminação a quente é usada para as operações de desbaste e a laminação a frio para as operações de acabamento.

O aço CA-60 é fabricado por trefilação ou laminação a frio, com superfície nervurada ou lisa, a partir do Fio-Máquina, de acordo com a norma ABNT NBR 7480:2007, advindo da laminação a quente feita pelas siderúrgicas, por meio de minério de ferro ou sucata. São fornecidos em feixes de barras retas ou dobradas, com peso aproximado de 1 t; em rolos de 200 kg, até 6,0mm de diâmetro; em estocadores de 0,6 a 1t; ou ainda em bobinas de 1,5 a 3 t.

Durante o processo de fabricação esse material sofre alterações em sua microestrutura, fenômeno este conhecido como encruamento de grãos. Esta alteração influi na resistência do material elevando suas propriedades mecânicas, e reduzindo de maneira controlada, o alongamento e a ductilidade.

Há inúmeras maneiras de atingir as propriedades mecânicas solicitadas pela norma, como por exemplo, acrescentar elementos de liga como manganês ou vanádio aumentando resistência do material (como consequência ocorre aumento do custo), utilizar à temperatura de reaquecimento do tarugo na faixa de 1200°C (aumento do consumo de gás) entre outras formas. Além disso, alguns parâmetros podem afetar a microestrutura e as características mecânicas do processo de laminação a frio, como: velocidade da laminação; temperatura de formação de espiras, taxa de resfriamento, passo de redução, aliviador de tensão, etc.

Portanto, essas variáveis de processo interferem nas propriedades mecânicas do material, e, dependendo da máquina, certas adaptações em determinada área do equipamento são necessárias, a fim de manter a qualidade do material dentro dos parâmetros, ao estar de acordo com as exigências estabelecidas pela norma. Desse modo, vem à tona a importância de desenvolver projetos que caibam no plano orçamentário e solucionem problemas que causam esse tipo de interferência.

Na primeira sessão desta pesquisa, foram feitas considerações iniciais desde os primórdios da utilização do aço até o panorama nacional e mundial mercadológico dos dias atuais. A partir daí, objetivou-se qual era a real pretensão deste trabalho, seguido da metodologia de pesquisa e projeto adotada, remetendo aos processos industriais e laboratoriais. Em seguida, na quarta sessão, foi dado ênfase nas referências bibliográficas que serviu de base para a construção deste trabalho com as devidas citações dos autores responsáveis. Em resultados e discussões, foi explorado de forma qualitativa e quantitativa o projeto bem como as análises dos materiais feitas. Ademais, na sexta e última sessão, foram feitas considerações finais sobre o aprendizado obtido e ideias para trabalhos futuros.

1.1 Empresa

A Dimensão Indústria Aços Planos faz parte do grupo Dimensão, um dos maiores grupos empresariais do estado do Maranhão, com forte presença no setor da construção civil e crescente no setor industrial.

A fábrica está localizada no distrito industrial de São Luís do Maranhão, com 34.000 m² de área construída, com instalações modernas, ampla infraestrutura e equipada com os melhores equipamentos de produção. A fábrica investe em qualidade, tecnologia e treinamento dos seus funcionários para garantir produtos com alto padrão de qualidade e certificação.

A empresa foi projetada para atuar em nível nacional, fabricando produtos de aço com diversas aplicações nos setores da indústria e da construção civil, nas linhas de longos com arames, CA-50 e CA-60 além da linha de planos com chapas, tubos e perfis. Possui um moderno sistema de gestão integrada e logística própria, o que caracteriza grande potencial de produção, conforme ilustrado na figura 1.



Figura 1 - Instalações da fábrica. (Grupo Dimensão, 2014).

Trabalhando com matérias-primas certificadas, procedentes das melhores usinas nacionais e internacionais, a Dimensão dispõe de um laboratório completo para realização de ensaios mecânicos destrutivos, não destrutivos e metalográficos, o que garante a qualidade dos seus produtos. A rastreabilidade de todo o processo assegura a conformidade de seus produtos com as normas brasileiras de produção.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar a variação do processo de laminação a frio a partir da adaptação de uma bancada de tensões pré endireitamento que interfere na relação do vergalhão do aço CA—60 do tipo bobina prevista pela norma ABNT 7480:2015.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar o problema de qualidade do aço CA-60 tipo bobina laminado à frio;
- Quantificar os dados pós-instalação, por meio de análise termográfica, metalográfica ensaios destrutivos e não destrutivos;
- Estudar as máquinas de laminação à frio, bem como os processos que influenciam no ganho de propriedades mecânicas do aço CA—60;
- Realizar o projeto e aplicação do dispositivo visando a solução do problema;
- Analisar os resultados do processo de laminação quanto ao crescimento ou não da relação elástica do aço CA—60;
- Demonstrar melhorias e adaptação do processo siderúrgico de Laminação a frio do aço CA—60.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Propriedades mecânicas gerais

As propriedades mecânicas dos materiais são verificadas pela execução de experimentos em laboratório cuidadosamente programados, que reproduzem o mais fielmente possível as condições de serviço. Dentre os fatores a serem considerados incluem-se a natureza da carga aplicada e a sua duração, bem como as condições do ambiente. A carga pode ser de tração, compressiva, ou de cisalhamento, e a sua magnitude pode ser constante ao longo do tempo de um período de muitos anos. A temperatura de operação pode ser também um fator importante (CALLISTER, 2001).

Do ponto de vista da indústria mecânica, esse conjunto de propriedades é considerado o mais importante para a escolha de uma matéria-prima. A resistência mecânica relaciona-se às forças internas de atração existentes entre as partículas que compõem o material, quando as ligações covalentes unem um grande número de átomos, como no caso do carbono, tornando-o mais resistente.

3.2 Ensaio mecânicos

Qualquer projeto de engenharia, especificamente o projeto de um componente mecânico, requer para a sua viabilização um vasto conhecimento das características, propriedades e comportamento dos materiais disponíveis. As propriedades mecânicas dos materiais são verificadas pela execução de ensaios cuidadosamente programados, a fim de estabelecer os parâmetros do material.

O estabelecimento e a publicação dessas normas padrões são frequentemente coordenados por sociedades profissionais, como a Sociedade Americana para Ensaio e Materiais (ASTM – *American Society for Testing and Materials*), que é a organização mais ativa nos Estados Unidos. No Brasil, a entidade responsável pelas normas padrões e fiscalização é a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

As características dos materiais obtidas por meio dos ensaios são fundamentais para o dimensionamento de elementos estruturais. Pode-se definir ensaio como a observação do comportamento de um material quando submetido à ação de agentes externos como esforços. Os ensaios são executados sob condições padronizadas, em geral definidas por normas, de

forma que seus resultados sejam significativos para cada material e possam ser facilmente comparados. Realizar um ensaio consiste em submeter um objeto já fabricado ou um material que vai ser processado industrialmente a situações que simulam os esforços que eles vão sofrer nas condições reais de uso, podendo chegar a limites extremos de solicitação.

De acordo Souza (1982) os ensaios dos materiais podem ser classificados da seguinte maneira:

- a) Quanto à integridade geométrica e dimensional da peça ou componente os ensaios podem ser de dois tipos:
 - Destrutivos: quando após executados provocam a inutilização parcial ou total da peças (tração, dureza, fadiga etc.);
 - Não-destrutivos: quando após executados não comprometem a integridade da peça (raios X, ultrassom etc.).
- b) Quanto à velocidade de aplicação da carga, os ensaios podem ser:
 - Estáticos: quando a carga é aplicada de maneira suficientemente lenta, induzindo a uma sucessão de estados de equilíbrio, caracterizando um processo quase-estático. Nessa categoria têm-se os ensaios tração, compressão, flexão, torção e dureza.
 - Dinâmicos: quando a carga é aplicada rapidamente ou ciclicamente. Nesse têm-se os ensaios de fadiga e de impacto.
 - Carga constante: quando a carga é aplicada durante um longo período, que é o caso do ensaio de fluência.

Os ensaios anteriormente mencionados objetivam verificar a conduta dos componentes ou materiais sujeitos a esforços específicos e aos limites físicos desses tipos de esforços nas estruturas e na estabilidade, além de determinar as características mecânicas inerentes a tais componentes. Existem outros testes, denominados ensaios de fabricação, que objetivam determinar a conduta dos materiais envolvidos diretamente na fabricação, em geral nos processos que envolvem a conformação mecânica de chapas, tiras, tubos e outros, e por meio desses resultados, determinarem os processos e os equipamentos envolvidos. Esses ensaios não avaliam as propriedades mecânicas, apenas fornecem indicações do comportamento do material quando submetido a um processo de fabricação (estampagem, dobramento, embutimento etc.).

3.2.1 Ensaio de Tração

O ensaio de tração consiste em submeter o material a um esforço que tende a alongá-lo até a ruptura. Os esforços ou cargas são medidos na própria máquina de ensaio. Neste tipo de

ensaio o corpo é deformado por alongamento, até o momento em que se rompe, que permite conhecer como os materiais reagem aos esforços de tração, quais os limites de tração que suportam e a partir de que momento se rompem. A Figura 2 abaixo apresenta um arranjo ilustrativo desse tipo de ensaio.

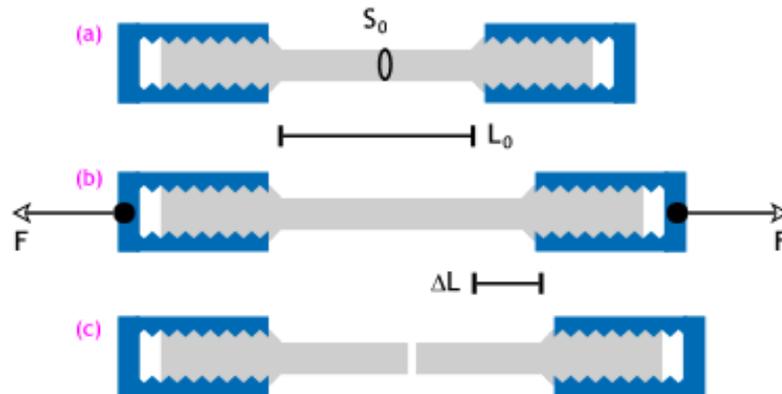


Figura 2 - Desenho esquemático de um corpo de prova submetido à tração: (a) estático; (b) início da deformação; (c) após rompimento. (Souza, 1982).

Na condição inicial, a parte central tem um comprimento (L_0) e área transversal (S_0). O equipamento de ensaio aplica gradativamente a partir do zero uma força de tração no corpo de prova. Assim, de forma genérica, pode-se dizer que, a cada valor de força aplicada F , corresponde uma deformação ΔL do corpo.

O ensaio de tração é padronizado por normas técnicas, entre elas a NBR-6152 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, e a ASTM E 8M da *American Society for Testing and Materials* – ASTM, ambas para materiais metálicos. O resultado de um ensaio de tração é registrado na forma de um gráfico ou diagrama relacionando a carga em função do alongamento. Como as características carga-deformação são dependentes do tamanho da amostra (quanto maior a área da seção reta do corpo de prova, maior a carga para produzir o mesmo alongamento), utiliza-se a normalização da carga e do alongamento de acordo com os seus parâmetros de tensão e deformação de engenharia para minimizar os fatores geométricos.

Sua ampla utilização na indústria de componentes mecânicos deve-se à vantagem de fornecer dados quantitativos das características mecânicas dos materiais, como: limite de resistência à tração (σ_u), limite de escoamento (σ_e), módulo de elasticidade (E), módulo de resiliência (U_r), módulo de tenacidade (U_t), ductilidade ($AL\%$ ou $AS\%$), coeficiente de encruamento (n) e coeficiente de resistência (k).

3.2.2 Ensaio de Dureza

A maioria dos ensaios de dureza estáticos consiste na impressão de uma pequena marca feita na superfície da peça, pela aplicação de pressão, com uma ponta de penetração. Neste tipo de ensaio, têm-se como objetivo conhecer:

- Resistência ao desgaste;
- Aproximação da resistência mecânica através do uso de tabelas de correlação;
- Controle de qualidade de tratamentos térmicos;
- Controle de qualidade em processos de conformação plástica e em processos de ligação;
- Pesquisa e desenvolvimento de novas ligas e propriedades dos materiais;

O ensaio de dureza é considerado não destrutivo e deixa uma pequena marca no material, não comprometendo a utilização da peça ou corpo de prova. Os principais tipos são por risco, penetração ou resalto e por penetração.

3.2.3 Por risco

Dureza Mohs: escala criada em 1812 pelo mineralogista alemão Friedrich Vilar Mohs com dez minerais de diferentes durezas existentes na crosta terrestre. A escala de Mohs quantifica a dureza dos minerais, isto é, a resistência que um determinado mineral oferece ao risco. Portanto, é a retirada de partículas sólidas da superfície de um material em relação a outro. Conforme é apresentado na Tabela 1, a seguir:

Tabela 1- Escala de dureza Mohs. (Callister, 2007).

Dureza	Mineral	Fórmula Química
1	TALCO - Pode ser arranhado facilmente com a unha;	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
2	GIPSITA (ou gesso) - Pode ser arranhado com a unha com um pouco mais de dificuldade que o material anterior;	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
3	CALCITA - Pode ser arranhado com uma moeda de cobre;	$CaCO_3$
4	FLUORITA - Pode ser arranhada com uma faca de cozinha;	CaF_2
5	APATITA - Pode ser arranhada dificilmente com uma faca de cozinha;	$Ca_5(PO_4)_3(OH-, Cl-, F-)$
6	FELDSPATO - Pode ser arranhado com uma liga de aço;	$KAlSi_3O_8$
7	QUARTZO - Capaz de arranhar o vidro; Ex.: Ametista;	SiO_2
8	TOPÁZIO - Capaz de arranhar o quartzo;	$Al_2SiO_4(OH-, F-)_2$
9	CODINDON - Capaz de arranhar o topázio; Ex: Safira e Rubi;	Al_2O_3
10	DIAMANTE - Mineral mais duro que existe, pode arranhar qualquer outro e é arranhado apenas por outro diamante;	C

É um método pouco utilizado nos materiais metálicos, pois, a maioria dos metais apresenta durezas Mohs entre 4 e 8, e pequenas diferenças de dureza não são acusadas por este método.

3.2.4 Por choque ou ressalto

Dureza Shore: Tipo de ensaio dinâmico em que a impressão é causada pela queda livre de um êmbolo. O primeiro instrumento utilizava uma barra de aço (êmbolo) de peso 2,5 N, com uma ponta padronizada (arredondada) de diamante colocado dentro de um tubo de vidro com uma escala graduada de 0 a 140, tal barra é liberada de uma altura padrão (256 mm). O princípio de medição de queda de peso foi substituído por um sistema de medição por mola, apresentado na Figura 3.

O valor da dureza é proporcional à energia consumida para formar a marca no corpo de prova e representada pela altura alcançada no rebote do êmbolo. Materiais dúcteis consomem mais energia na deformação do corpo e o êmbolo alcança uma altura menor no retorno, indicando uma dureza mais baixa.

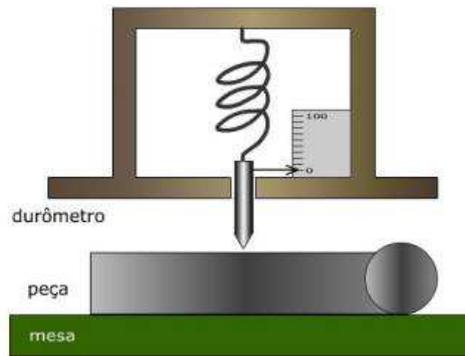


Figura 3 - Instrumento utilizado nesse tipo de ensaio – Escleroscópico. (Souza, 1982).

3.2.5 Por penetração

Dureza *Brinell*: Proposta por Brinell em 1900, leva o seu nome e é simbolizada por HB (*Hardness Brinell*), é o tipo mais usado na engenharia. É definida por N/mm² ou kgf/mm². Consiste em fazer penetrar lentamente a superfície do material com uma esfera de aço endurecido ou metal duro com 10mm de diâmetro “D”, sob a ação de uma força “F” de 3000 kgf. Em materiais mais moles, para reduzir endentação excessiva, pode-se reduzir a força para 1500 ou 500 kgf.

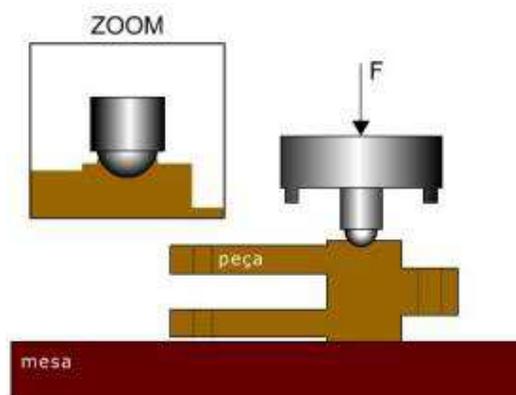


Figura 4 - Representação de penetração de dureza Brinell. (Souza, 1982).

Para alguns materiais, a resistência à tração pode ser estimada a partir da dureza *Brinell* relacionando a fórmula 1, onde K é um valor tabelado de acordo com o material que é utilizado:

$$\sigma_b = K \times HB \left(\frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2} \right) \quad (1)$$

Tabela 2 – Demonstrativo de valores de K. (Souza, 1982).

Material	K	Material	K
Aço-carbono	0,36	Bronze fundido	0,23
Aço-liga	0,34	Alumínio fundido	0,26
Cobre, latão	0,4	Liga Al-Cu-Mg	0,43
Bronze laminado	0,22	Liga Al Mg	0,44

O ensaio *Brinell* é usado especialmente para avaliação de dureza de metais não ferrosos, ferro fundido, aço, produtos siderúrgicos em geral e de peças não temperadas. É o único ensaio utilizado e aceito para ensaios em metais que não tenham estrutura interna uniforme.

Por outro lado, o uso deste ensaio é limitado pela esfera empregada. Usando-se de esferas de aço temperado só é possível medir dureza até 500 HB, pois durezas maiores danificariam a esfera.

Dureza Meyer: Idêntica a dureza Brinell, mas em vez da área da calota impressa usa a área da calota projetada no plano da superfície. É dada por:

$$HM = \frac{4 \times F}{\pi \times d^2} \quad (2)$$

A dureza (HM) é definida como pressão média na área projetada. É um método pouco utilizado nos metais. Tem uma liberdade maior de materiais comparado ao método Brinell, mas ainda possui limitações, deixando-o longe do ideal.

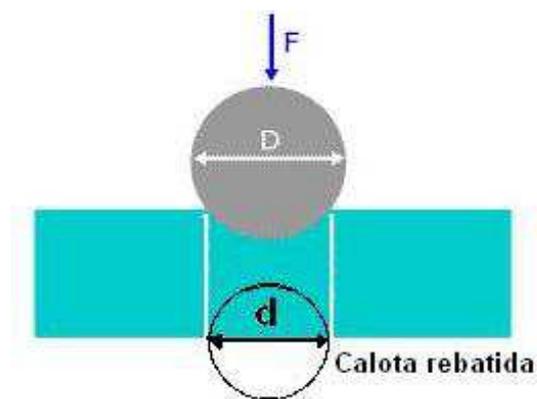


Figura 5 – Esquema de ensaio de dureza Meyer. (Souza, 1982).

Dureza Rockwell: Método proposto pela indústria *Rockwell*, dos EUA, em 1992, é o mais utilizado internacionalmente. Consiste em aplicação de uma pré-carga, para garantir um contato firme entre o penetrador e o material ensaiado, e depois aplica-se a carga do ensaio propriamente dita.

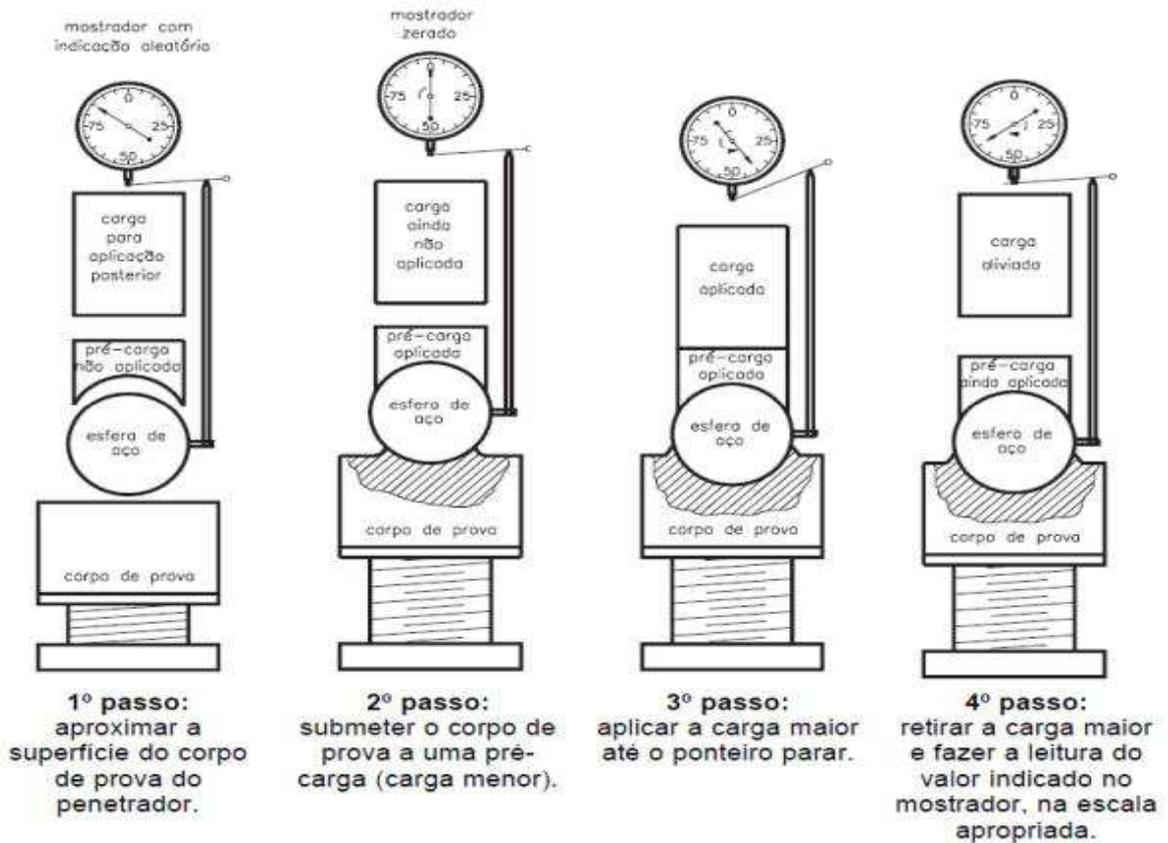


Figura 6 – Passo a passo para ensaio de dureza Rockwell. (Souza, 1982).

Esse tipo de ensaio torna-se vantajoso por ser rápido, caso tenha pequenas irregularidades elas são eliminadas pela pré-carga, não necessita de polimento na superfície da peça estudada e por se tratar de um equipamento de simples manuseio.

Os penetradores utilizados na máquina de ensaio de dureza Rockwell são do tipo esférico (esfera de aço temperado) ou cônico (diamante com 120° de conicidade), a figura 7 apresenta os modelos.

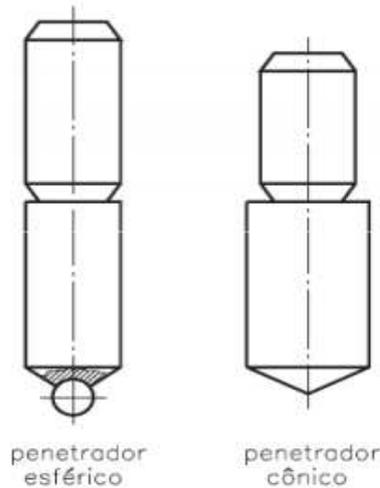


Figura 7 – Tipos de penetradores. (Souza, 1982).

Consiste na relação ideal entre o diâmetro da esfera do penetrador Brinell e o diâmetro da calota esférica obtida, e vai além porque utiliza outro tipo de penetrador, que possibilita medir qualquer valor de dureza, incluindo desde os materiais mais duros até os mais dúcteis.

3.3 Ensaio de fadiga

O ensaio de resistência à fadiga é um meio de especificar limites de tensão e de tempo de uso de uma peça ou elemento de máquina. É utilizado também para definir aplicações de materiais. A ruptura por fadiga começa a partir de uma trinca (nucleação) ou pequena falha superficial, que se propaga ampliando seu tamanho, devido às solicitações cíclicas. Quando a trinca aumenta de tamanho, o suficiente para que o restante do material não suporte mais o esforço que está sendo aplicado, a peça se rompe repentinamente. A fratura por fadiga é típica, pois geralmente apresenta-se fibrosa na região da propagação da trinca e cristalina na região da ruptura repentina.



Figura 8 – Exemplo de material que falhou por fadiga. (Callister, 2007).

O estudo da fadiga é importante porque a grande maioria das falhas de componentes de máquinas em serviço se deve à fadiga. E a ruptura por fadiga ocorre sem nenhum aviso prévio, ou seja, num dado momento a máquina está funcionando perfeitamente e, no instante seguinte, ela pode falhar. De maneira geral, peças sujeitas a fadiga estão submetidas a esforços que se repetem com regularidade.

A tensão cíclica mais comum é caracterizada por uma função senoidal, em que os valores de tensão são representados no eixo das ordenadas e o número de ciclos no eixo das abscissas. As tensões de tração são representadas como positivas e as tensões de compressão como negativas. A Figura 9 apresenta três tipos de ciclos de tensão.

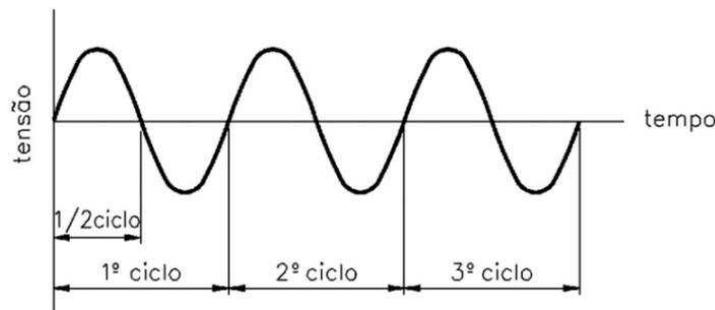


Figura 9 - Representação dos ciclos de tensão. (Callister, 2007).

Um ciclo de tensão corresponde a um conjunto sucessivo de valores de tensão, que se repete na mesma sequência e no mesmo período de tempo. Se a solicitação que está sendo imposta na peça for ligeiramente superior as características geométricas e limites de resistência da mesma, ela pode vir a falhar em pequenas quantidades de ciclos de trabalho.

3.4 Comportamento Tensão-deformação

O grau ao qual uma estrutura se deforma ou se esforça depende da magnitude da tensão imposta. Para a maioria dos metais que são submetidos a uma tensão de tração em níveis relativamente baixos, a tensão e a deformação são proporcionais entre si, de acordo com a relação:

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (2)$$

Tal relação é conhecida por Lei de *Hooke*, e a constante de proporcionalidade E (GPa ou 10^6 PSI) é o módulo de elasticidade, ou módulo de Young. Para a maioria dos metais típicos,

a magnitude desse módulo varia entre 45 GPa ($6,5 \times 10^6$ PSI), para o magnésio, e 407 GPa (59×10^6 PSI) para o tungstênio. Os valores para o módulo de elasticidade para vários metais à temperatura ambiente estão apresentados na Tabela 6 a seguir.

Tabela 3- Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento, e Coeficiente de Poisson para Várias Ligas Metálicas a Temperatura Ambiente. (Callister, 2007).

<i>Liga Metálica</i>	<i>Módulo de Elasticidade</i>		<i>Módulo de Cisalhamento</i>		<i>Coefficiente de Poisson</i>
	<i>GPa</i>	<i>10⁶ psi</i>	<i>GPa</i>	<i>10⁶ psi</i>	
Alumínio	69	10	25	3,6	0,33
Latão	97	14	37	5,4	0,34
Cobre	110	16	46	6,7	0,34
Magnésio	45	6,5	17	2,5	0,29
Níquel	207	30	76	11,0	0,31
Aço	207	30	83	12,0	0,30
Titânio	107	15,5	45	6,5	0,34
Tungstênio	407	59	160	23,2	0,28

Todos os materiais sólidos podem ser deformados quando submetidos a uma carga externa e que, além disto, até certo limite de cargas, o sólido recuperará suas dimensões originais quando a carga for retirada. Esta recuperação das dimensões originais de um corpo deformado quando se retira a carga aplicada é denominado comportamento elástico. Ao valor limite a partir do qual o material não se comporta mais elasticamente denomina-se limite elástico. Se excedido tal limite, o corpo apresentará uma deformação permanente após a retirada da carga aplicada. Define-se, então, como deformação plástica aquela presente em um corpo que está permanentemente deformado. Para a maioria dos materiais a deformação é proporcional à carga, se esta não excede o limite elástico.

A deformação linear média de um material é definida como a razão entre a variação de comprimento de certa dimensão e o seu comprimento inicial.

$$e = \frac{\delta}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L-L_0}{L_0} \quad (3)$$

Onde:

e = deformação linear média.

δ = alongação.

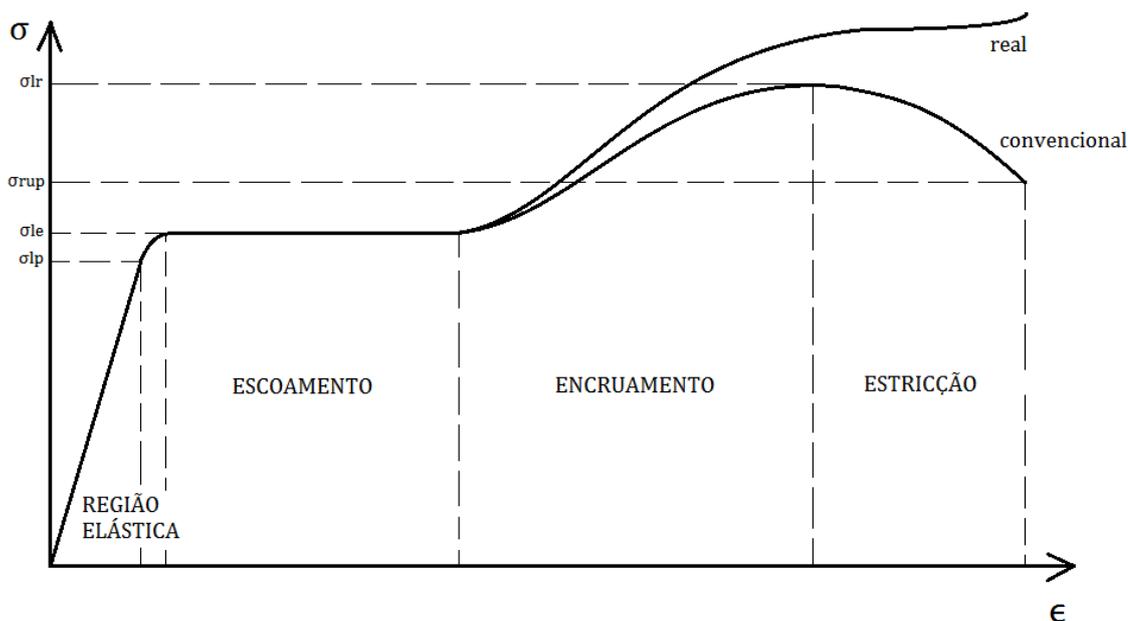


Figura 10 - Comportamento tensão-deformação de engenharia

3.5 Conformação mecânica

Os processos de conformação geralmente oferecem produtos semiacabados, haja vista a dificuldade de escoamento para formar produtos com seções complexas, tolerâncias dimensionais e geométricas abertas devido à contração térmica, distorção por tensionamento interno, alterações dimensionais devidas à recuperação elástica, normalmente esses produtos sofrem um trabalho posterior de acabamento seja por usinagem ou mesmo em muitos casos, por processos de conformação.

Alguns processos de conformação possibilitam a obtenção de produtos acabados ou muito próximos da condição de utilização. Normalmente, são processos realizados à temperatura ambiente, nos quais se destaca a utilização de equipamentos de elevada rigidez, ferramentas de qualidade dimensional e superficial elevada e com a possibilidade de lubrificação eficiente ao longo de todo o processo. Os produtos obtidos apresentam tolerâncias dimensionais, rugosidade superficial e tolerâncias geométricas próximas às obtidas em processos de acabamento por usinagem. Outra característica importante desse tipo de processo é a possibilidade de controlar as propriedades mecânicas do produto por meio da escolha adequada dos parâmetros de processamento.

3.6 Métodos de endurecimento

Com a evolução do processo industrial houve a necessidade de desenvolver materiais com maior resistência mecânica para enfrentar as diversas condições de uso que são impostas aos mesmos, sem perda das demais propriedades que acabam sendo afetadas quando sofrem endurecimento, tais como a ductilidade e tenacidade.

A resistência mecânica dos materiais pode ser alterada por meio de técnicas de endurecimento. As técnicas de endurecimento em metais um princípio simples: quanto maior for a restrição ao movimento de discordâncias, maior será a resistência mecânica de um material metálico (CALLISTER 2007). Essa alteração podem ser das seguintes formas: endurecimento por refino de grão, endurecimento pela formação de solução sólida, endurecimento por encruamento, endurecimento por dispersão de partículas e endurecimento por transformação de fase.

I. Refinamento de Grão:

A maioria dos materiais metálicos é obtida a partir do metal líquido e posteriormente sofre conformação mecânica. Na solidificação o encontro das diferentes orientações cristalográficas caracteriza o contorno de grão. A Figura 11 abaixo apresenta uma representação esquemática dos estágios da solidificação de um material policristalino.

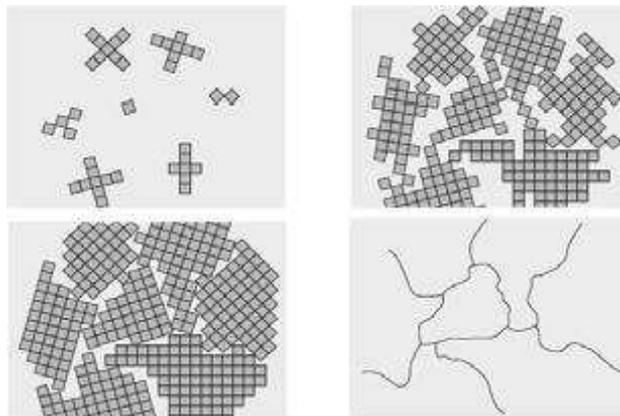


Figura 11 - Representação esquemática dos estágios da solidificação. (Callister, 2007).

O contorno de grão cria uma dificuldade para a discordância se movimentar. Quanto menor o tamanho do grão, mais contornos são evidenciados, como demonstra a Figura 10 abaixo.

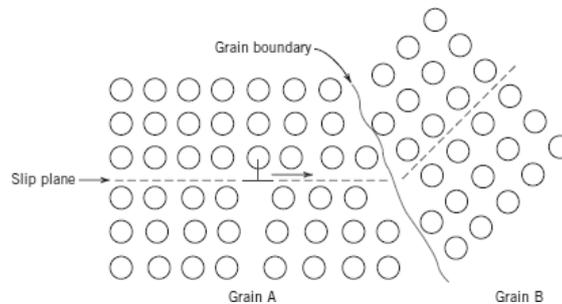


Figura 12 - Representação esquemática do contorno de grão agindo como barreira para a movimentação das discordâncias. (Callister, 2007).

Um material de granulação fina é mais duro e resistente porque tem uma maior área de contorno de grão, de forma que dificulta com mais eficiência o movimento de discordâncias.

Atualmente, com a exploração cada vez maior do processo de laminação controlada, o mecanismo de endurecimento por refino de grão tem sido destacado em diversos estudos, principalmente pelo fato de esse mecanismo promover simultaneamente aumento da resistência mecânica e dureza (LEE, 2010).

II. Formação de Solução Sólida

Quando misturas homogêneas de duas ou mais espécies atômicas ocorrem no estado sólido, elas são chamadas de soluções sólidas. Suas propriedades mecânicas são modificadas pela introdução de átomos de soluto.

Os campos de tensão gerados por átomos de soluto interagem com os campos de tensão existentes no material, dificultando a movimentação das discordâncias e, conseqüentemente, promovendo o endurecimento.

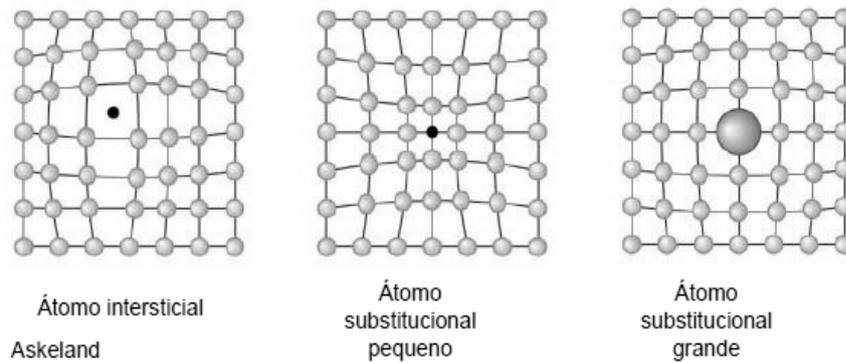


Figura 13 - Representação esquemática da distorção na rede cristalina em função da inserção de átomos intersticiais. (Callister, 2007).

III. Encruamento ou Deformação Plástica a frio

Materiais encruados são aqueles trabalhados a frio, o qual o processo de conformação mecânica (ou deformação plástica) age a uma temperatura inferior a de recristalização, como por exemplo, em processos de trefilação ou laminação.

Esse endurecimento ocorre devido ao aumento de discordâncias e imperfeições promovidas pela deformação, que impedem o escorregamento dos planos atômicos. A medida que se aumenta o encruamento, maior é a força necessária para produzir uma maior deformação. Grande parte dos mecanismos de deformação e encruamento de metais relaciona-se com a movimentação de discordâncias e sua interação com vazios, átomos de solutos, outras discordâncias e contornos de grão.

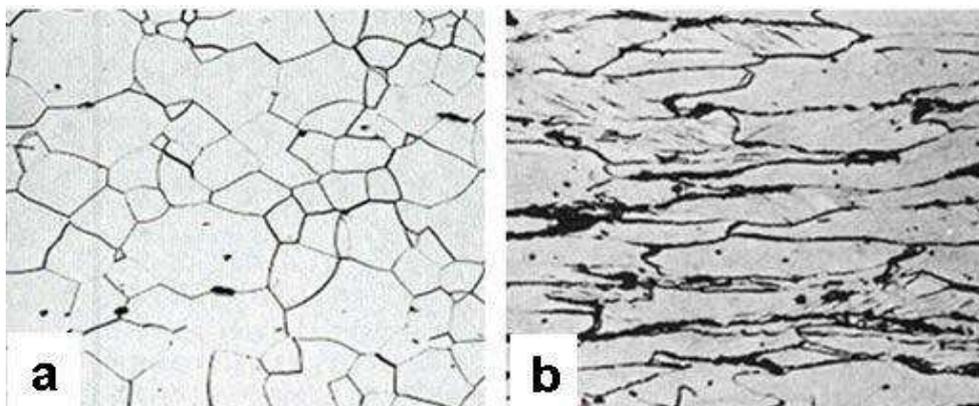


Figura 14 - Material com microestrutura a) antes da deformação e b) depois da deformação. (Gerdau, 2007).

O gráfico da figura 15 extraído de DIETER apresenta a variação das propriedades mecânicas de um material metálico sujeito ao trabalho a frio. Nele pode-se observar um crescimento constante das tensões limites de escoamento e resistência a tração e, inversamente proporcional a isso, o decaimento acentuado da ductilidade representada pela estricção e alongamento.

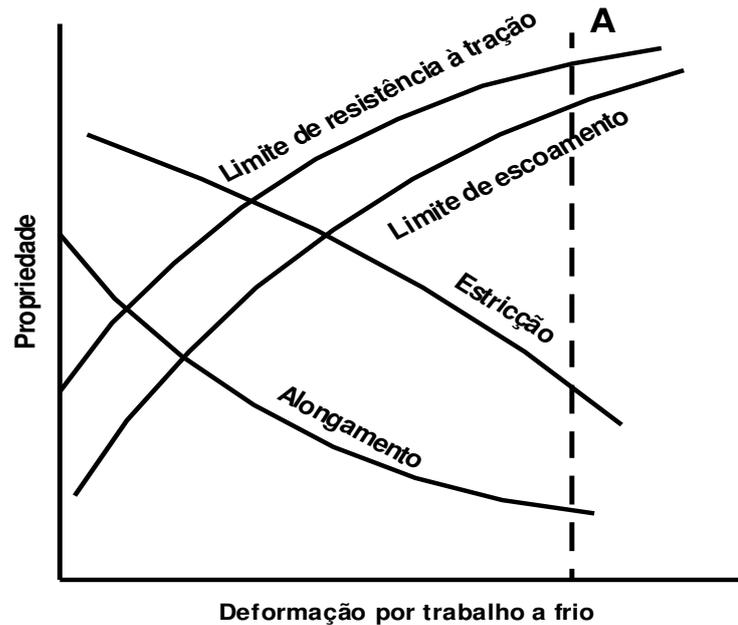


Figura 15 - Variação das propriedades mecânicas no trabalho a frio. (Dieter, 1998).

Para as deformações próximas da linha A, encontra-se o denominado limite de conformabilidade, ou seja, quando a tensão limite de escoamento é muito próxima da tensão limite de resistência, o que associado à baixa ductilidade, faz com que o material apresente-se num estado em que a continuidade da deformação leva-o à ruptura, tornando-o inutilizável para aplicações estruturais e afins.

O comportamento sob tração de monocristais de metais é mostrado na figura 16, na qual a tensão uniaxial é representada pela tensão de cisalhamento τ e a deformação linear, pela distorção γ presente no plano preferencial de deslizamento.

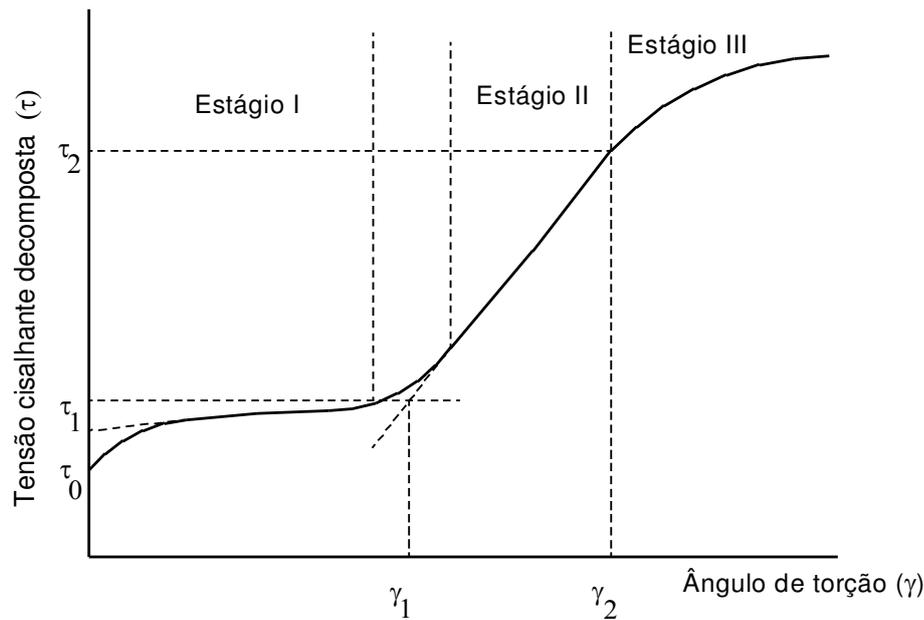


Figura 16 - Curva Tensão Cisalhante X Distorção para monocristais. (Dieter, 1988).

Ultrapassado τ_0 inicia-se o escoamento sob baixa taxa de encruamento, evidenciado no estágio I, conhecido como região de escoamento fácil. Dependendo dos níveis de impureza, o estágio I pode vir a não se manifestar, devido a deformação a temperaturas elevadas ou pela orientação cristalográfica, tendo em vista vários sistemas de deslizamento que são favorecidos pela força de tração exigida. Em materiais policristalinos não manifesta esse estágio, pois possuem um número elevado de grãos aleatoriamente orientados favorecendo o deslizamento.

A região de encruamento linear tem aumento rápido da taxa de encruamento até atingir um valor constante, de tal forma que a tensão cisalhante é função linear da distorção. É caracterizado pelo estágio II do gráfico. O coeficiente de encruamento nesse estágio é bastante estável. Regiões de encruamento semelhantes ao estágio II têm sido observadas também no ensaio de materiais policristalinos.

No início do estágio III, ou região de encruamento parabólico, a taxa de encruamento decresce continuamente e a tensão cisalhante passa a ser uma função parabólica da distorção. O início do estágio III e a taxa de encruamento nesse estágio são fortemente dependentes da temperatura e da taxa de deformação empregadas.

IV. Partículas de Segunda Fase

O endurecimento por partículas de segunda fase pode ser classificado como sendo de dois tipos: dispersão ou precipitação. No endurecimento por dispersão as partículas usualmente são visíveis ao microscópio óptico e já se fazem presente durante o processo de solidificação/resfriamento do material. Enquanto que o endurecimento por precipitação ou por envelhecimento, é produzido por um tratamento térmico de solução em que partículas pequenas de segunda fase entram em solução sólida em temperaturas elevadas, mas precipitam depois sofrerem têmpera e envelhecimento a baixas temperaturas.

Para que ocorra a precipitação, tais partículas devem ser solúveis em temperaturas elevadas, mas devem reduzir a sua solubilidade à medida que a temperatura decresce. Os precipitados dificultam a movimentação das discordâncias, aumentando a resistência do material.

V. Transformação de Fase (Martensita)

Este mecanismo de endurecimento é um dos mais utilizados na indústria. Ocorre devido ao deslocamento dos átomos de ferro na presença dos átomos de carbono na estrutura tetragonal (TCC) da martensita. Esta distorção do reticulado é que provoca o endurecimento devido à dificuldade de movimentação das discordâncias. Além disso, a subestrutura da martensita incorpora uma grande densidade de discordâncias e maclas, que dificultam ainda mais o movimento de discordâncias.

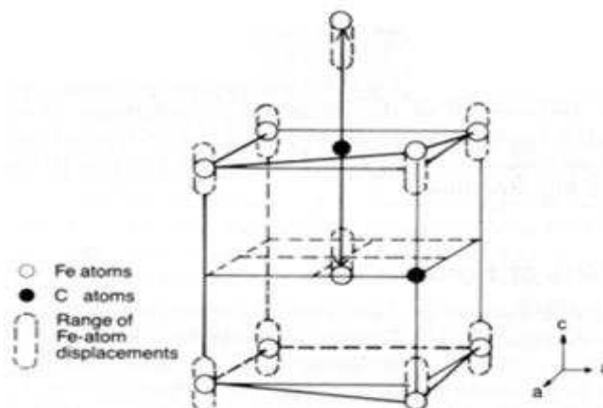


Figura 17 - Estrutura tetragonal da Martensita. (Lee, 2010).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com Barros e Lehfel'd (2000), a metodologia corresponde a um conjunto de procedimentos a serem utilizados na obtenção do conhecimento e aplicação do método, por meio de processos e técnicas que garantem a legitimidade do conhecimento adquirido. Nesse sentido, a primeira etapa deste estudo consistiu-se na obtenção de conhecimentos específicos referentes às máquinas de laminação a frio, bem como os processos que influenciam no ganho de propriedades mecânicas para os materiais que são produzidos.

Desse modo, projetou-se uma bancada de tensões, tendo em vista que na utilização de máquinas, comumente ocorre o desgaste das peças originais ocasionando a sua substituição, seja peças originais, o que pode repercutir na variação de parâmetros usuais de produção, tornando necessárias adaptações para manter ou aproximar a fabricação do material o mais original possível.

Foram analisados tanto o material produzido e suas propriedades mecânicas antes e depois do experimento, quanto a bancada de tensões mecânicas em si, mediante análise computacional de fadiga, tendo em vista que o mesmo possui ciclos de trabalho e velocidade contínua. A figura 18 expõe as etapas da metodologia de pesquisa seguida.

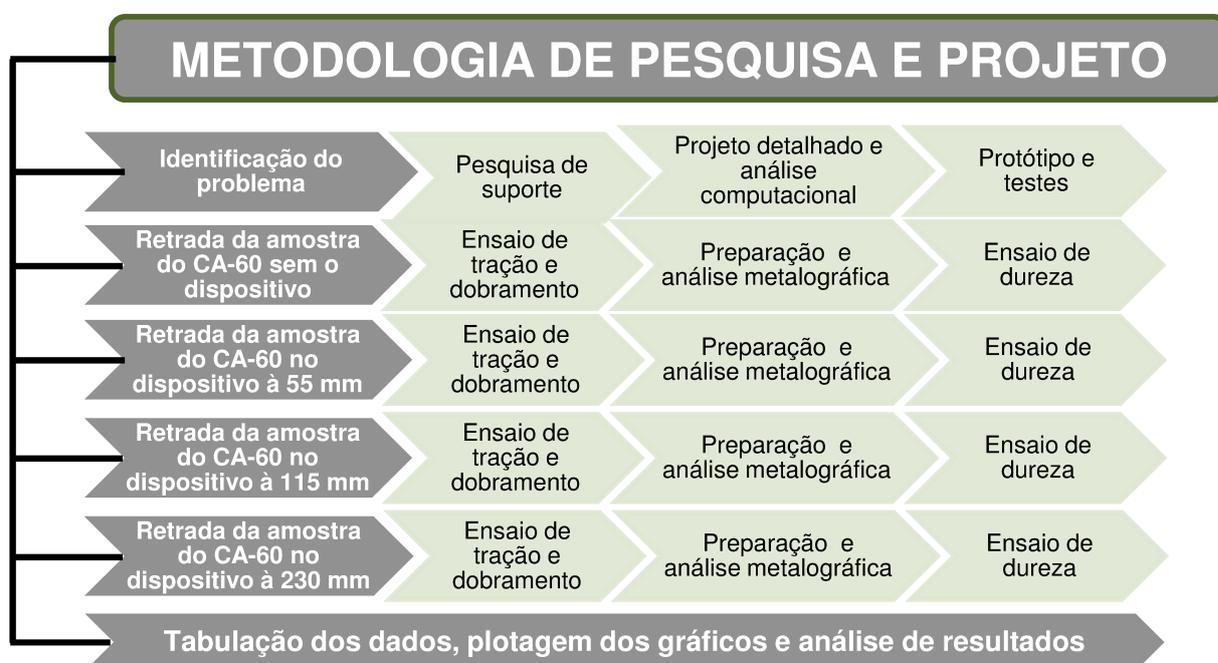


Figura 18 - Procedimento de projeto e pesquisa adotado. (Autor, 2018).

4.1 Produto em pesquisa

A matéria prima adquirida pela empresa, aquém das siderurgias que processam o aço, por meio de material de minério ou de sucata. Desse modo, os fornecedores produzem “fio-máquina” com diferentes bitolas e composições químicas, resultantes do processo de laminação a quente.

Por meio de corridas de lote, o recebimento dos produtos é realizada a estocagem no pátio. No ato do recebimento, os engenheiros de produção, juntamente com a equipe de qualidade devem estar atentos na composição química que está sendo recebida, para analisar as porcentagens do material de acordo com a norma. A tabela 4 apresenta a relação de fios-máquina que a empresa citada trabalha.

Tabela 4 - Propriedades dos principais aços utilizados com baixo teor de carbono. (ABNT NBR NM 87:2000).

SAE-AISI	Carbono(C) mín. - máx.	Manganês(Mn) mín. - máx.	Fósforo (P)máx.	Silício (Si) mín. - máx.	Enxofre (S)máx.
1005	0,06 máx.	0,35 máx.	0,040	0,15 – 0,30	0,050
1006	0,08 máx.	0,25 - 0,40	0,040	0,15 – 0,30	0,050
1008	0,10 máx.	0,30 - 0,50	0,040	0,15 – 0,30	0,050
1009	0,15 máx.	0,60 máx.	0,040	0,15 – 0,30	0,050
1010	0,08-0,13	0,30 - 0,60	0,040	0,15 – 0,30	0,050
1012	0,10 - 0,15	0,30 - 0,60	0,040	0,15 – 0,30	0,050
1013	0,11 - 0,16	0,50 - 0,80	0,040	0,15 – 0,30	0,050
1015	0,13 - 0,18	0,30 - 0,60	0,040	0,15 – 0,30	0,050
1016	0,13 - 0,18	0,60 - 0,90	0,040	0,15 – 0,30	0,050
1017	0,15 - 0,20	0,15 - 0,20	0,040	0,15 – 0,30	0,050
1018	0,15 - 0,20	0,15 - 0,20	0,040	0,15 – 0,30	0,050

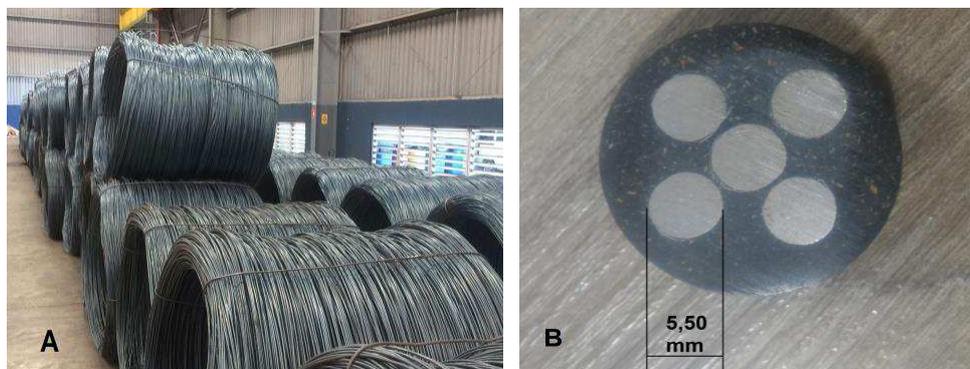


Figura 19. (A) Bobinas de F.M. (B) Corpo de prova o F.M. embutido. (Autor, 2018).



Figura 20- (A) Bobinas de aço laminado a frio (B) Corpo de prova do produto final embutido. (Autor, 2018).

Como demonstrado no item A da figura 19, observa-se o estoque de fio máquina apto para ser posicionado e tracionado nas máquinas de laminação à frio, posteriormente explicadas no item 3.3, formando as bobinas de CA-50, CA-60 e arame, demonstradas no item A da figura 20. O item B das figuras também expõem os diâmetros dos materiais nos corpos de prova embutidos, evidenciando a diferença de diâmetro antes e depois do trabalho a frio. Esta pesquisa tratará apenas do CA-60, tendo em vista as características de qualidade previstas por norma.

4.2 Processo em pesquisa

A laminação a frio de bobinas ou encruamento a frio é um processo de conformação mecânica que ocorre por meio de tracionamento do fio-máquina e matriz cônica ou cilíndrica, ocasionando redução na área e alongamento do comprimento total. Trata-se de um processo mecânico que confere ao material precisão dimensional e melhores propriedades mecânicas. O princípio do processo de trefilação é semelhante, aplicando passes de redução no material.

Esse processo é entendido como um fenômeno que altera a estrutura dos metais ao serem submetidos à deformação plástica abaixo da temperatura de recristalização e causará o endurecimento e aumento da resistência do metal. O escoamento plástico é produzido pela combinação da força de tração com as forças compressivas provenientes da reação da matriz sobre o material.

A figura 21 abaixo evidencia os cinco (5) tipos de laminadores existentes e o sentido de giro dos rolos, bem com o sentido de tracionamento do fio ou chapa para esquerda. Ademais,

na figura 22, demonstra-se as três (3) etapas de evolução dos grãos micro constituintes no material trabalhado a frio.

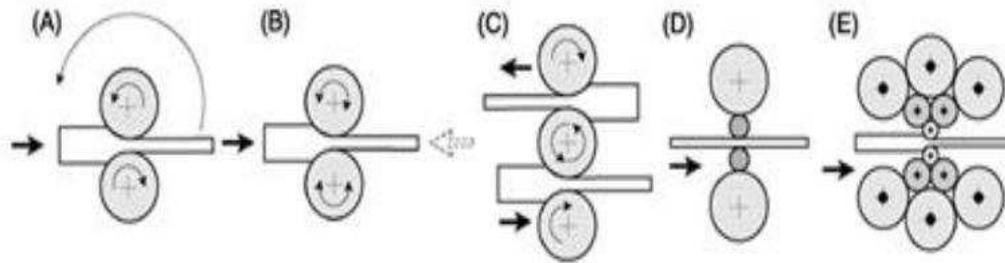


Figura 21 - (A) Laminador duo não-reversível e retorno por cima; (B) Laminador duo reversível; (C) Laminador trio; (D) Laminador quadro; (E) Laminador Sendzimir. (CELTIN, 1999).

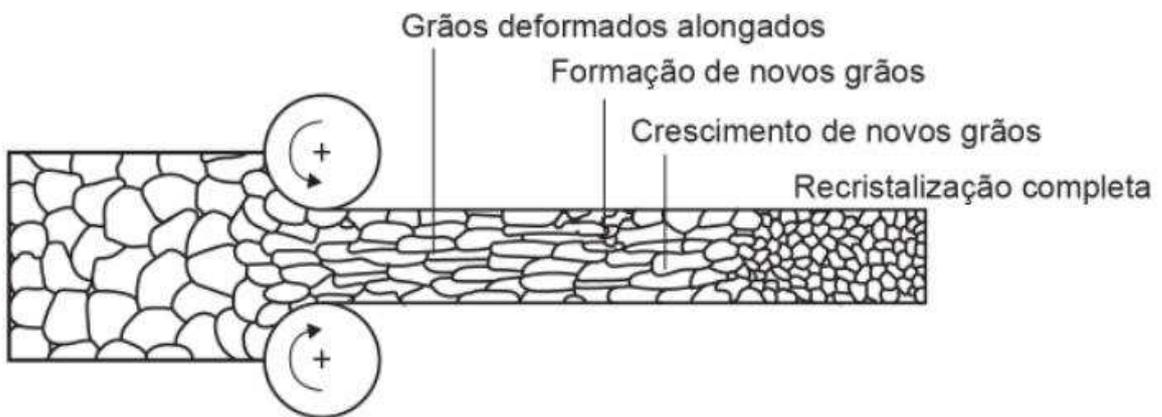


Figura 22 - Encruamento em uma operação de laminação. (Kininani, 2013).

4.3 Ativo em pesquisa

O grupo DEMCOSTRUZIONI SPECIALI SRL, com sede em *Pavia di Udine*, na Itália, é responsável pela fabricação e montagem de máquinas, sendo um provedor abrangente de tecnologia para conformação a frio de metais com renome mundial. Suas linhas de laminação a frio são dimensionadas para garantir altas taxas de produção, visando alimentar os equipamentos automáticos mais exigentes de conformação, com resultados dimensionais altamente precisos. A figura 23 demonstra a máquina objeto da pesquisa.



Figura 23 - Máquina de laminação a frio DEM. (Autor, 2018).

Máquina de laminação a frio DEM. (Autor, 2018).

A linha de laminação possui oito (8) estágios de trabalho, envolvendo operação direta e indireta, possui velocidades de trabalho que chega até 14 m/s, com sistema de refrigeração por água para controle de temperatura no processo produtivo. A máquina detém de seis (6) botões de parada rápida e quatro (4) botões de parada de emergência, além de placas de sinalização e alerta garantindo boas condições de segurança ao operador, dentro das conformidades da NR-12.

A figura 8 demonstra o principal componente do equipamento, responsável por comprimir por meio dos rolos em trio o fio máquina em 3 passes de redução até chegar o produto final do CA-50, CA-60 ou arame.

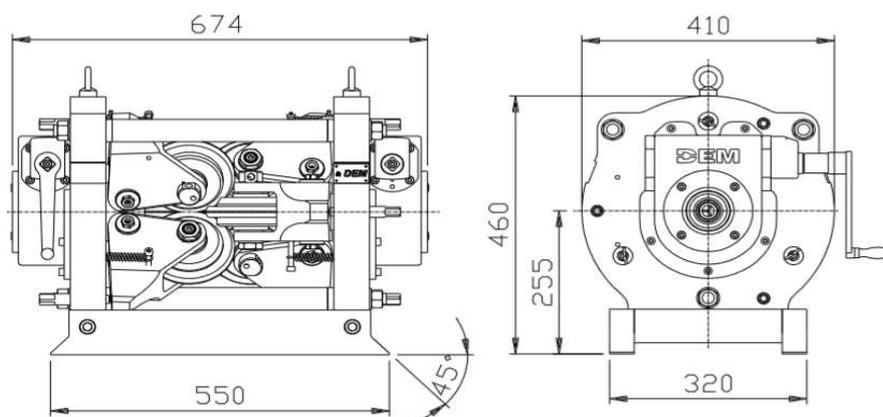


Figura 24 - Cassete de Laminação (Manual DEM). (Autor, 2018).

Tabela 5 - Especificações do laminador à frio da DEM. (Autor, 2018).

TIPO	Linha de laminação à frio
FABRICANTE	DEM
MODELO	CRL-C-760 3-H K132013
VELOCIDADE MÁXIMA	14 m/s
PRESSÃO DE OPERAÇÃO	5,0 - 6,0 bar
MOTOR DO BLOCO	Siemens - IPH7228-2HD00-0EC3
	129KW - 390V
	1150 rpm - 4 polos
CASSETE	CLF-150-XX-33-F-EUR
	674x410x459 mm
	260 KG
Nº DE ROLOS CASSETE	3+3
CAPACIDADE	Min.: 3,4 - Máx.: 12 mm
RESFRIAMENTO	A água

4.4 Projeto dimensional

A partir das inconformidades no produto acabado laminado a frio, quanto ao baixo valor da relação elástica obtido através dos limites de resistência a tração e escoamento (LR/LE), definido pela norma ABNT 7480 como no mínimo 1,05, tornou-se necessário a realização do estudo de adaptação de mecanismos, visando solucionar o problema e tornar o produto vendável novamente.

Para diminuição de erros de projeto e melhor aproveitamento da bancada, as etapas possuíram interação entre si. Seguindo a metodologia proposta por Norton (2013), inicialmente buscou-se sintetizar o mecanismo escolhido, analisando o mais viável para a aplicação, tendo em vista que a real exigência de esforços solicitados na articulação seria estática, ou seja, na própria estrutura mecânica da bancada. Tal articulação servirá para variar a posição da tensão aplicada, haja vista que não se sabe ao certo o ponto ideal sem antes tabular os dados. Desse modo, o escolhido foi o de barras articuladas por possuir baixo custo de fabricação e boa gama de trabalho. A partir disto, verificou-se a melhor forma de trabalhar sua cinemática, sintetizando e analisando-a para então, determinar os cálculos das forças dinâmicas do sistema e o coeficiente de segurança que seria escolhido.

O projeto detalhado foi iniciado a partir de um *croqui* feito *in loco* no equipamento, tendo em vista as limitações de espaço. No penúltimo estágio de trabalho, logo antes do

bobinador de fios e em cima do endireitamento da máquina, foram retiradas as medidas e verificado o espaço onde seria adaptado o dispositivo de forma que a bancada fosse paralela ao vergalhão, de acordo com a figura 25.

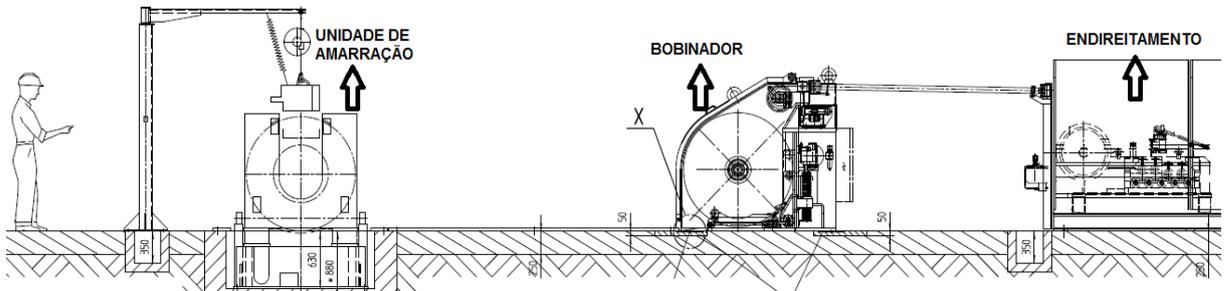


Figura 25 - Estágios finais de trabalho da máquina de laminação a frio DEM. (Manual DEM).

Por meio do software BIM de prototipagem *SOLIDWORKS*, desenhou-se com base no croqui a bancada de tensões como dispositivo de melhoria e adaptação na máquina de laminação a frio. Na parte inferior optou-se por fixar um mancal para guiar o fuso que faz o rolete central deslocar-se. Os anexos 1 e 2 detalham o desenho.

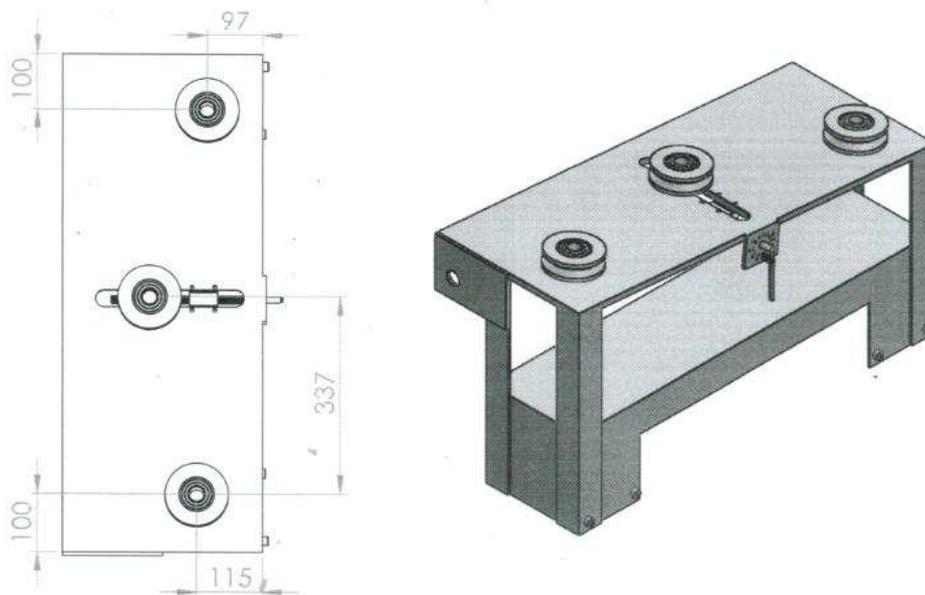


Figura 26 - Vista superior e Isométrica da bancada de tensões montada sob a base da máquina no estágio de pré endireitamento do arame. (Autor, 2018).

Com a escolha dos materiais e o dispositivo desenhado, foi simulado o esforço que seria exigido para verificar se o sistema estaria sub ou super dimensionado via análise de carregamento remoto.

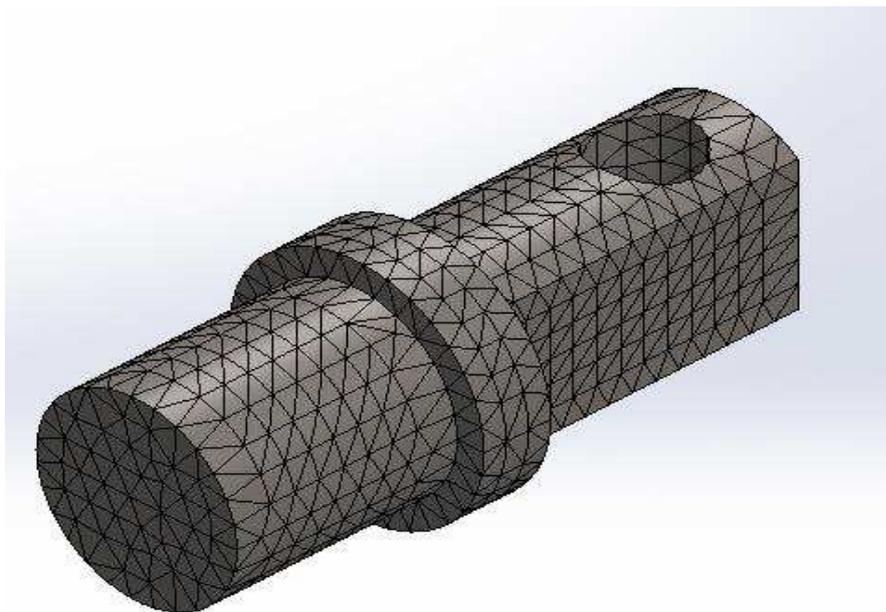


Figura 27 - Malha de simulação pino de apoio do rolete central móvel. (Autor, 2018).

Tabela 6 - Dados da malha utilizada. (Autor, 2018).

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	3.8173 mm
Tolerância	0.190865 mm
Plotagem de qualidade de malha	Alta
Total de nós	10631
Total de elementos	6724

4.5 Retirada de amostras

Com base no deslocamento efetivo do rolete central após regulagem operacional evidenciada na figura 28, onde observa-se o diâmetro da bitola de saída a partir de cada um dos cassetes, as amostras foram retiradas em 4 tipos, passagem livre do fio, deslocamento mínimo a 55 mm, médio a 115 mm e máximo a 230 mm, tracionando o vergalhão de aço em diferentes curvaturas.



Figura 28 - Medição de bitola do fio no primeiro cassete. (Autor, 2018).



Figura 29 - Vergalhão livre de tensão na bancada. (Autor, 2018).



Figura 30 - Deslocamento mínimo no vergalhão. (Autor, 2018).



Figura 31 - Deslocamento médio no vergalhão. (Autor, 2018).



Figura 32 - Deslocamento máximo no vergalhão. (Autor, 2018).

4.6 Ensaio de Tração

De acordo com as normas ISSO 9001:2008, ABNT NBR 7480:2007 e a Portaria nº 073 de março de 2010 do Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, os ensaios de tração são realizados em quatro momentos distintos. Na busca pelas propriedades mecânicas de limite de resistência à tração, limite de escoamento e alongamento, os ensaios são feitos no recebimento do fio-máquina, no início, meio e final do trabalho a frio, a fim de verificar se a laminação está de acordo com os parâmetros exigidos pela norma 7480:2010 já citada. Desse modo, o procedimento padrão operacional da empresa em pesquisa é sempre realizar os ensaios nesses quatro momentos durante o processo, verificando conformidades e não conformidades. As figura 33 e 34 expõem o modelo da máquina de ensaios mecânicos universais disponível no setor de qualidade da fábrica, além do gabarito que é utilizado para marcação dos corpos-de-prova. Ademais, na figura 35, está evidenciado o fluxograma do processo de qualidade que é utilizado pela fábrica.



Figura 33 - Máquina de Ensaio Mecânico Universal utilizada. (Autor, 2018).

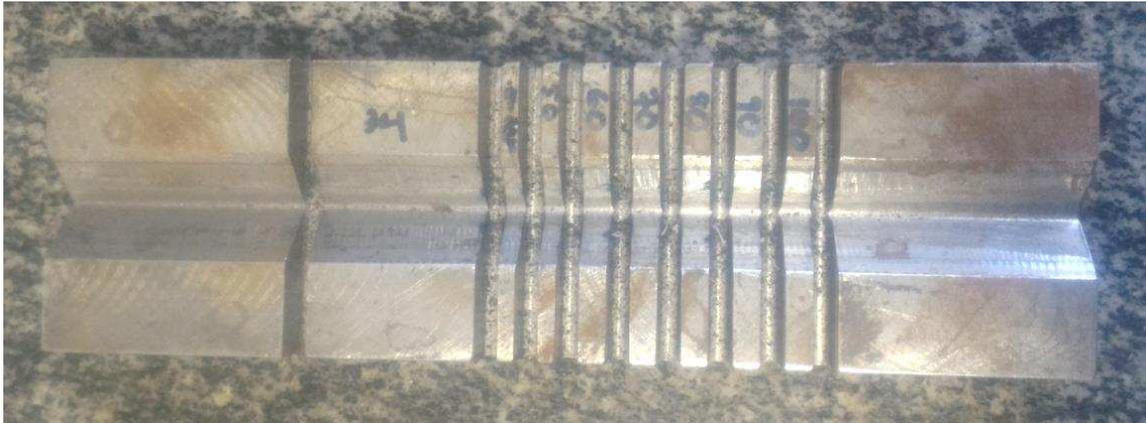


Figura 34 - Gabarito utilizado para marcação do corpo de prova. (Autor, 2018).

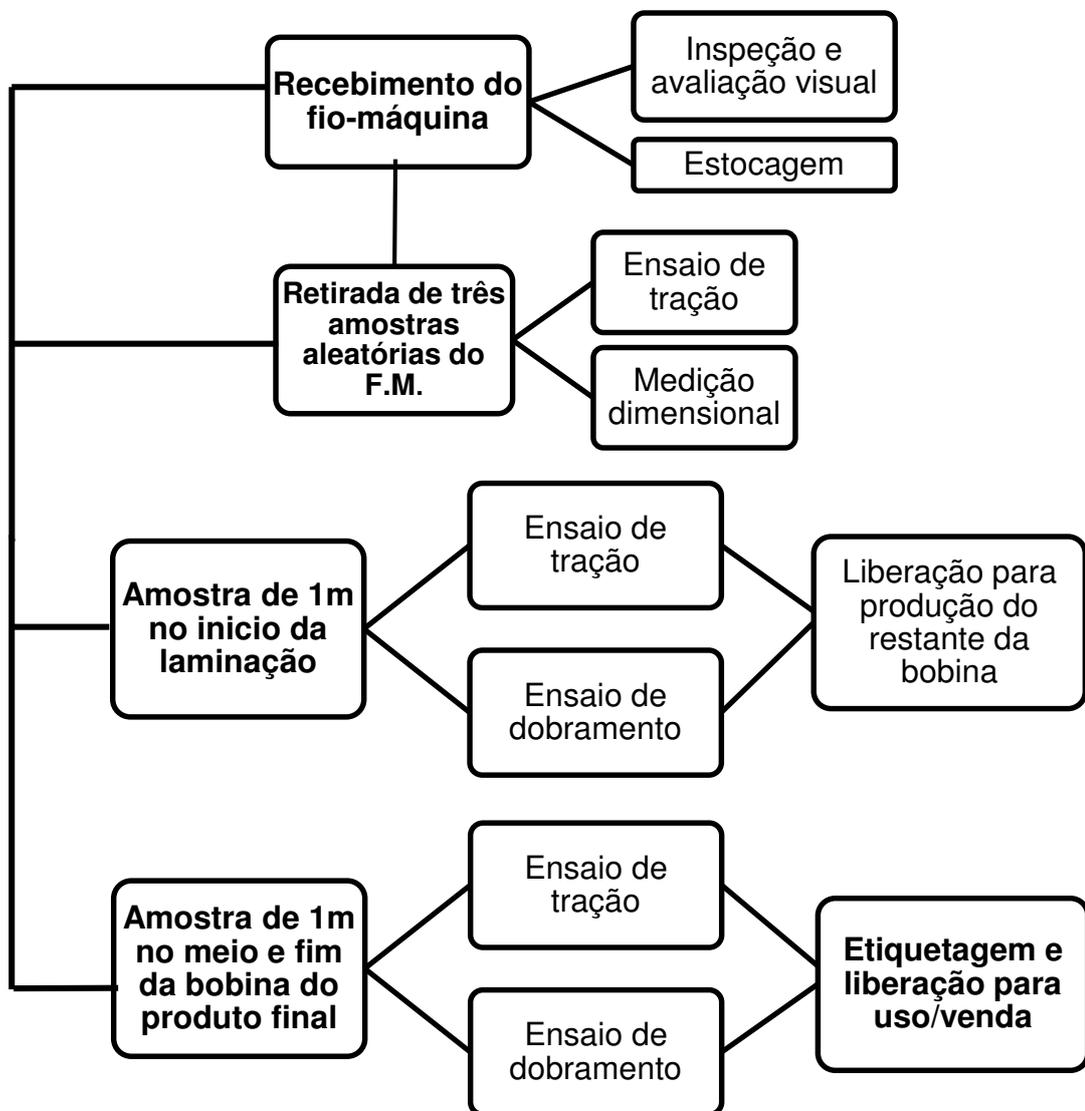


Figura 35 - Procedimento do setor de qualidade da fábrica para recebimento do F.M.

Para a verificação do escoamento no fio máquina e no vergalhão CA-60 foi pertinente marcar no centro do corpo-de-prova, um comprimento útil para a colocação do extensômetro, na tentativa de verificar o comprimento final do corpo-de-prova e determinar o alongamento após a realização do ensaio. Além disso, foram realizados 4 ensaios para cada amostra retirada, afim de calcular um bom desvio padrão, os dados estão apresentados nos apêndices 3 ao 6.

O comprimento inicial do corpo-de-prova de qualquer que seja o fio-máquina é igual a 5 diâmetros nominais, já para o vergalhão CA-60, é igual a 10 diâmetros nominais. Para exemplificar, o vergalhão CA-60 de diâmetro de 5.0 mm, utiliza $10 \times 5.0 \text{ mm} = 50 \text{ mm}$ de comprimento, necessário para o ensaio. Para o ensaio de dobramento também foi realizado com base na norma que orienta enrolar o vergalhão em pelo menos três (3) voltas completas em torno de um diâmetro nominal duas vezes o utilizado. Nesse caso, foi realizado no próprio aço CA-60.



Figura 36 - Amostra do vergalhão pós ensaio de dobramento (Autor, 2018).

4.7 Análise metalográfica

Em 1808, *Aloys Beck von Widmanstätten* realizou observações da estrutura de meteoritos. A utilização do microscópio óptico neste tipo de atividade teve início mais tarde, quando *Paul Annosow*, em 1841, usou o instrumento para analisar lâminas de espadas orientais (HIGGINS, 1993). Coube a *Henry Clifton Sorby* desenvolver uma técnica de análise sistemática de metais ao microscópio, em 1863, sendo então considerado o fundador da metalografia (ASM HANDBOOK, 2004). Desde então, o microscópio óptico de luz refletida se tornou a principal ferramenta da análise metalográfica, fornecendo aumentos que vão tipicamente de 50 a 1000 vezes, com resolução da ordem de $0,2 \mu\text{m}$. (ASM HANDBOOK, 2004).

Este tipo de estudo permite a observação de superfícies perfeitamente planas e polidas. Em razão disto, a preparação metalográfica tem grande importância na qualidade de uma análise. Os microscópios metalográficos, em geral, possuem sistemas de fotografia integrados que permitem o registro das análises realizadas.

Para a análise dos contornos de grão, inicialmente foi realizada a separação das amostras do aço CA-60 antes e depois da bancada de tensões instalada. A metodologia seguida teve como base a normatização dada pela ASTM E 3-10 bem como o procedimento descrito por Colpaert, (1998).

4.7.1 Corte das amostras

O seccionamento das amostras foi realizado na máquina policorte, um motor com disco abrasivo rotativo e duas mangueiras flexíveis para lubrificação do corpo-de-prova, para que não haja altas temperaturas no aço e alterações em sua microestrutura. O corte deve ser feito de maneira que não prejudique os trabalhos subsequentes, logo, a escolha e localização da seção a ser estudada depende de fatores como: homogeneidade da peça, natureza do material, profundidade de têmperas, entre outras. No caso do vergalhão CA-60, foi realizado o corte tanto longitudinal quanto transversal, para análise das fases microconstituintes e proporcionalidade de crescimento do grão respectivamente. A figura 36 demonstra o equipamento utilizado no início da análise.



Figura 37 - Policorte (Autor, 2018)

Um bom critério para a escolha da ferramenta de corte é a dureza da amostra. Assim, amostras com dureza elevada são seccionadas com discos de corte de baixa dureza e vice-versa (ASM HANDBOOK, 2004).

4.7.2 Embutimento a quente

O item A da figura 16 demonstra a máquina embutidora a quente, que possui sistema de resfriamento por água e configurações em sua programação que os corpos-de-prova chegam até 250 °C. Consiste no embutimento por meio de materiais termoplásticos e de prensas, utilizando-se pressão e aquecimento para efetuar a polimerização. O método consiste em colocar o corpo de prova com a face que se quer analisar em contato com o êmbolo inferior da máquina de embutimento. Após apertar o êmbolo, coloca-se o baquelite na câmara de embutimento, uma resina sintética quimicamente estável e bastante resistente ao calor evidenciada no item B da figura, e aplica-se pressão controlada por um manômetro que vai de 0 a 250 bar.

Foi aplicada configurada para atingimento de 200°C e pressão média de trabalho de 125 bar, tempo de resfriamento por água de 5 minutos e ventoinha até o *beep* final. Tal processo se torna de importante para a análise metalográfica, pois facilita o manuseio de pequenas peças e evita que arestas rasguem a lixa ou o pano que são posteriormente utilizados na etapa 3.6.3.



Figura 38 - Embutidora Metalográfica e resina de baquelite. (Autor, 2018).

4.7.3 Lixamento e Polimento

Devido ao grau de perfeição requerida no acabamento de uma amostra metalográfica com necessidade ideal de preparação, é essencial que cada etapa da seja executada cautelosamente. Lixar e polir é um dos processos mais demorados da preparação de amostras metalográficas. Nessas duas etapas, feitas de forma sequencial, a máquina utilizada foi a politriz, evidenciada na figura 39, com sistema de refrigeração por água e duas velocidades de acionamento.

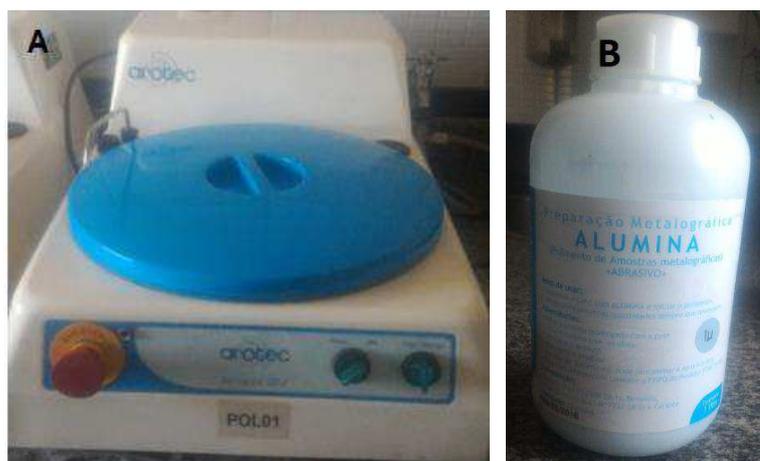


Figura 39 - Politriz de lixamento e polimento (A) e Abrasivo tipo Alumina 1 μ

Foram utilizadas as lixas: 100, 220, 320, 420, 600, 1000 e 1200. Para cada lixa ultrapassada mudava-se o ângulo de orientação de risco em 90° para diminuir a aspereza e deixar o mais perfeito possível. No processo deve-se ter água constantemente refrigerando o corpo-de-prova para evitar o super aquecimento e a consequente mudança nos microconstituintes.

O Polimento visa o acabamento superficial final do corpo-de-prova, utilizando pasta de diamante ou alumina (item B da figura 13), deixando a superfície do corpo-de-prova bem nítida. É necessário também abrir minimamente o registro da água, a fim de lubrificar junto ao abrasivo e eliminar alguma impureza. Pressionou-se levemente a amostra e girou-se no sentido contrário ao movimento do pano.

4.7.4 Ataque químico

Esta etapa do processo objetiva revelar os contornos de grão e as diferentes fases microconstituintes existentes. Alguns grãos e fases são mais atacados pelo reagente utilizado do que outros, isso faz com que cada fase reflita a luz de maneira diferente de seus vizinhos.

Isso realça os contornos de grão e dá diferentes tonalidades às fases permitindo sua identificação das mesmas no microscópio. Esse processo utiliza um reagente ácido que é colocado em contato com a superfície após o polimento durante certo período de tempo, vale ressaltar que cada material tem seu reagente já tabelado por norma, aqui foi utilizado o Nital 3% durante 16 segundos.

Antes de a amostra sofrer o ataque, a mesma deve estar perfeitamente limpa e seca, por isso utilizam-se líquidos de baixo ponto de ebulição como o álcool, éter, etc., os quais são posteriormente secados rapidamente através de um jato de ar quente fornecido por uma ventoinha elétrica ou secador.

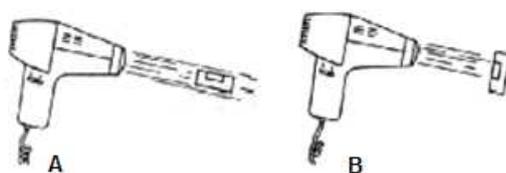


Figura 40 - Modo correto (A) e incorreto (B) de secar amostra antes do ataque químico. (Colpaert, 1998).

4.7.5 Exposição das amostras

Para a exposição das amostras foi utilizado o microscópio Olympus CX-21, um aparelho do tipo metalúrgico invertido próprio para análise dos contornos de grãos. O equipamento possui lentes de aumento de até 1000 vezes e mesa com alta precisão na regulagem posição.



Figura 41 - Microscópio Olympus utilizado. (Autor, 2018).

4.8 Ensaio de dureza

O teste de dureza dos vergalhões de aço CA-60 foram feitos no durômetro HR-430MS, que utiliza escala em dureza¹ *Rockwell C*, *Vickers* e *Brinell*. Após todo o processo metalográfico, utilizou-se dos próprios corpos-de-prova embutidos para análise, a fim de facilitar o manuseio da ferramenta de diamante do durômetro e evitar ter que fazer novos cortes transversais nas amostras.

Na figura 42 e 43 está evidenciado o modelo de durômetro que foi utilizado nesta pesquisa, bem como a amostra com durezas com marcas da penetração,



Figura 42 - Durômetro Mitutoyo – HR-430MS. (Autor, 2018).

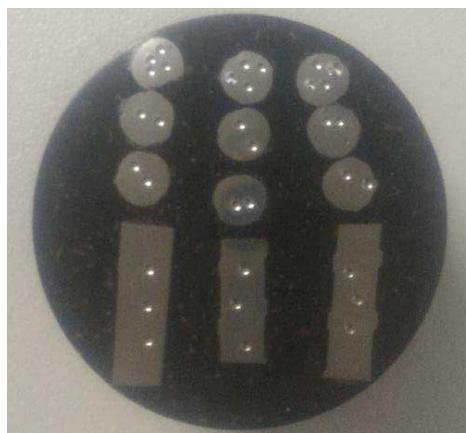


Figura 43 - Corpo-de-prova sob efeito do penetrador. (Autor, 2018).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base na metodologia explicitada no item 4 desta pesquisa, será tratado nesta sessão sobre os dados e imagens obtidas e sua consequente análise.

5.1 Simulação de esforços na estrutura

A simulação feita na estrutura buscou investigar o ponto que sofre maior esforço na bancada de tensões e averiguar a máxima tensão que suporta, prevenindo a falha. Desse modo, esta sessão evidencia os valores com base na tensão de von misses e deslocamento do eixo do rolete central, tendo em vista que esse componente é caracterizado como o ponto mais solicitado da estrutura e com aplicação de força normal à manivela determinada em 980 N, aproximadamente 10 kgf.

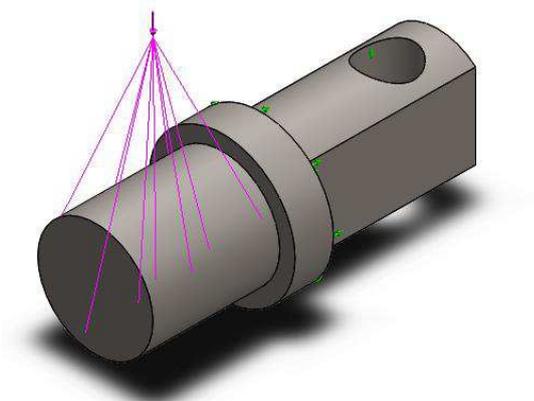


Figura 44 - Pontos de fixação e força aplicada no pino do rolete central móvel

Tabela 7 - Características do material do pino. (Autor, 2018).

Material	AISI Aço 1045
Tipo de modelo:	Isotrópico linear elástico
Critério de falha predeterminado:	Fadiga
Limite de escoamento:	5.3e+008 N/m ²
Resistência à tração:	6.25e+008 N/m ²
Módulo elástico:	2.05e+011 N/m ²
Coefficiente de Poisson:	0.29
Massa específica:	7850 kg/m ³
Módulo de cisalhamento:	8e+010 N/m ²
Coefficiente de expansão térmica:	1.2e-005 /Kelvin

Aplicada uma carga remota no ponto que tangencia o vergalhão passando pelo rolete, fixado pelo pino, os resultados demonstram-se dentro do esperado tendo e longe de falha por fadiga, tendo em vista que o coeficiente de segurança 4 utilizado.

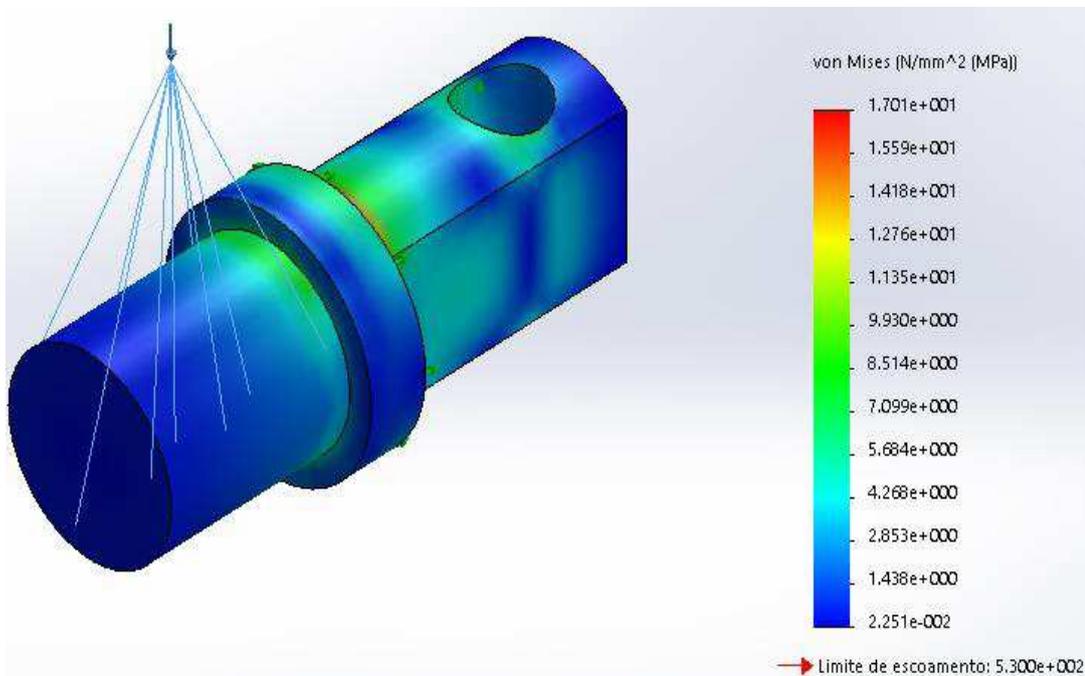


Figura 45 - Estudo da tensão de Von Mises (Autor, 2018).

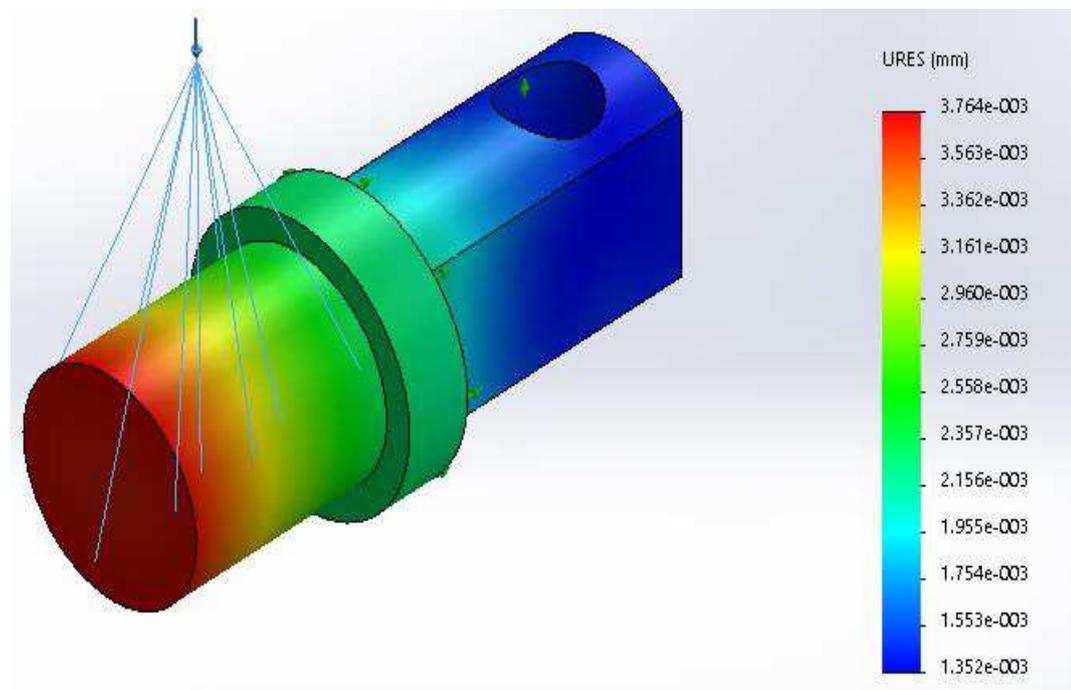


Figura 46 - Estudo do deslocamento (Autor, 2018).

5.2 Curva de encruamento

Para comprovação do ganho de resistência a partir da bancada de tensões projetada, foi retirado 4 pares ordenados (X, Y), que diz respeito ao limite de resistência à tração (LRT) obtido por meio de ensaio para cada amostra e o deslocamento aplicado no fio, respectivamente. Desse modo, por meio do software de programação e simulação computacional *MATLAB*, foi construída uma rotina que interpolasse todos os pontos dados e diminuísse o erro obtido utilizando cálculos numéricos, mais precisamente o método dos mínimos quadrados, gerando uma equação que mais se aproxima dos pares ordenados e plotando um gráfico que evidenciasse a curva de encruamento, ou seja, encontra o melhor ajuste para um conjunto de dados minimizando a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados. De maneira semelhante, foi traçado o gráfico para o limite de escoamento dos materiais, como mostrado nas figuras 47 e 48.

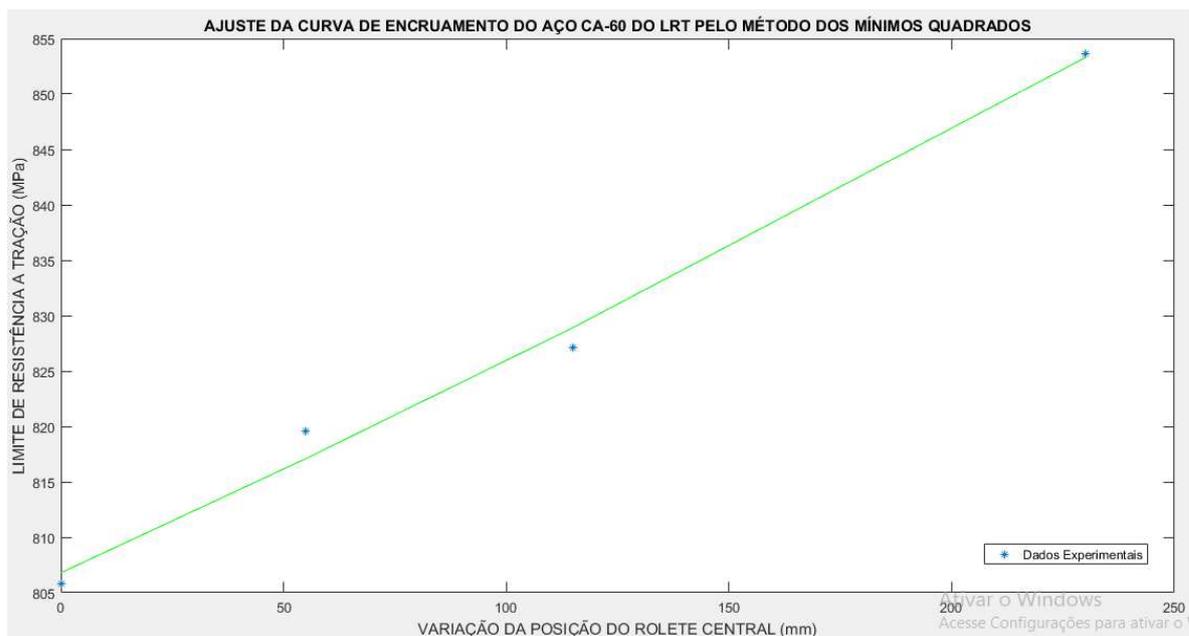


Figura 47 - Curva Limite de Resistência à Tração X Posição do Rolete Central (Autor, 2018).

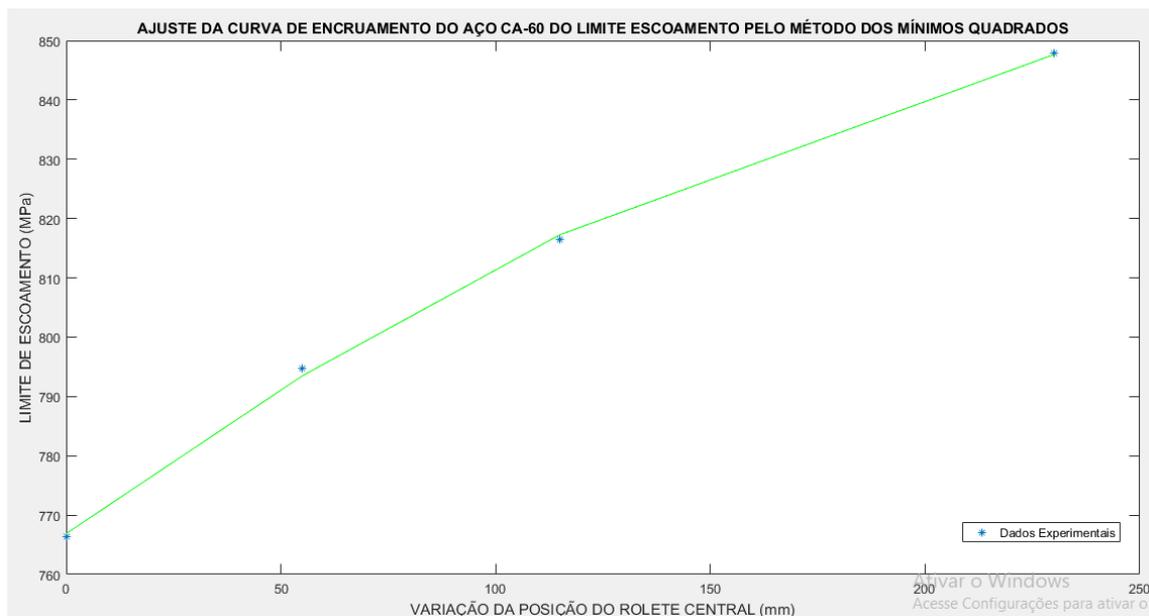


Figura 48 - Curva Limite de Escoamento X Posição do Rolete Central (Autor, 2018).

De acordo com os gráficos, observa-se que a ambos tendem a aumentar quanto maior for o deslocamento do rolete central. A bancada tem ponto máximo de 230 mm, ou seja, para o aço 1012 estudado nessa sessão, se torna aconselhável deixar o material o mais tensionado possível afim de garantir boa resistência.

5.3 Microscopia

5.3.1 Tamanho de Grão

De acordo com Callister (2007), propriedades o aumento do encruamento é inversamente proporcional ao tamanho do grão. Desse modo, para o ganho de resistência e consequente diminuição da ductilidade, o grão obrigatoriamente deve diminuir e ter caracterização alongada em relação aos materiais não tensionados. Abaixo estão dispostos as imagens obtidas das metalografias realizadas e uma posterior comparação do tamanho de grão gerando um gráfico de distribuição por área conhecida, obtida a partir do software de análise imagens microscópicas. Em relação as dimensões dos grãos, olho nu já se observa que o transversal cai gradativamente de tamanho, diferentemente do longitudinal que apresenta alongamento considerável. Na parte preta das imagens está evidenciado os grãos equiaxiais de ferrita, característicos de aços com pouco carbono. Já na parte clara, a perlita se apresenta.

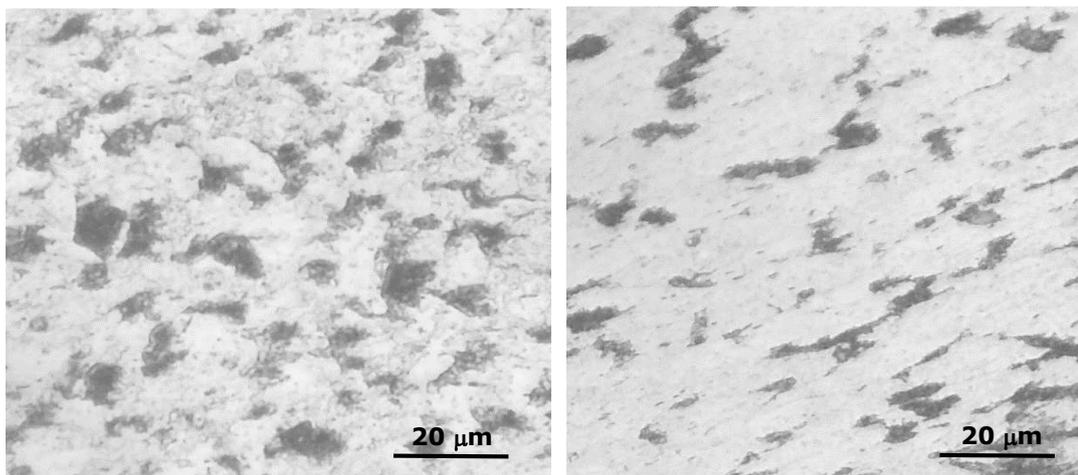


Figura 49 - Grão transversal e longitudinal respectivamente do Fio-máquina (Autor, 2018).

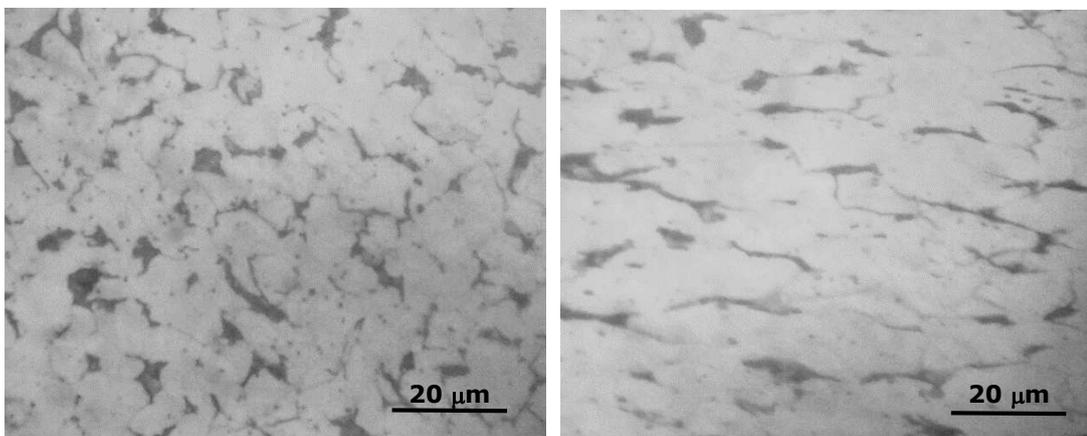


Figura 50 - Grão transversal e longitudinal respectivamente do vergalhão aço CA-60 sem aplicação da bancada de tensões (Autor, 2018).

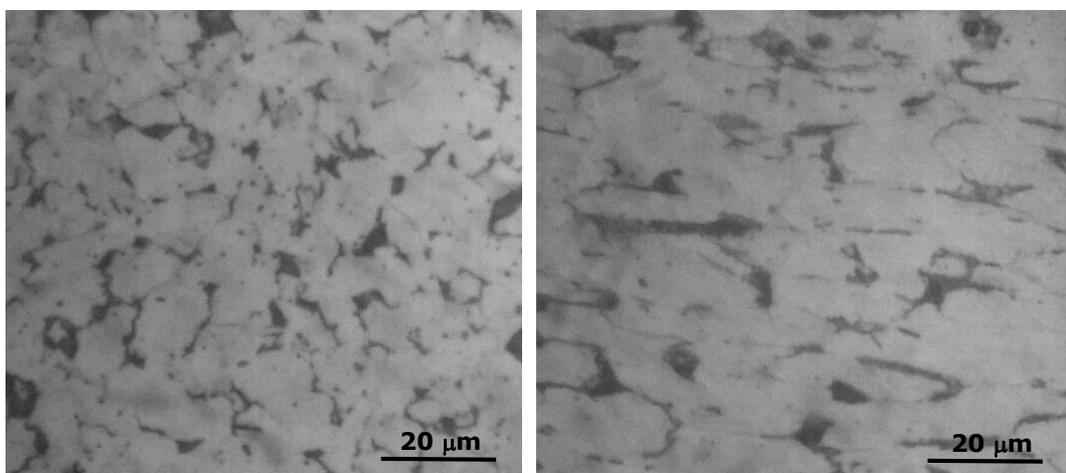


Figura 51 - Grão transversal e longitudinal respectivamente do vergalhão aço CA-60 com deslocamento à 55 mm aplicação da bancada de tensões (Autor, 2018).

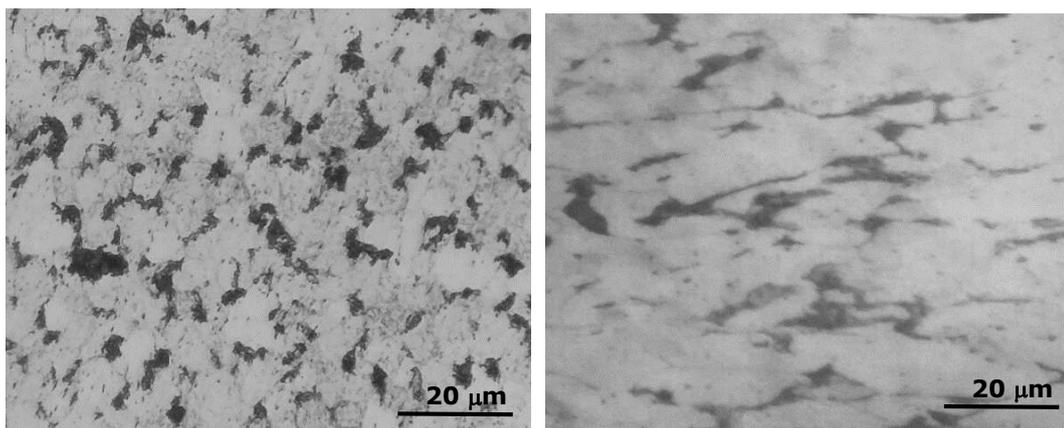


Figura 52 - Grão transversal e longitudinal respectivamente do vergalhão aço CA-60 com deslocamento à 115mm aplicação da bancada de tensões (Autor, 2018).

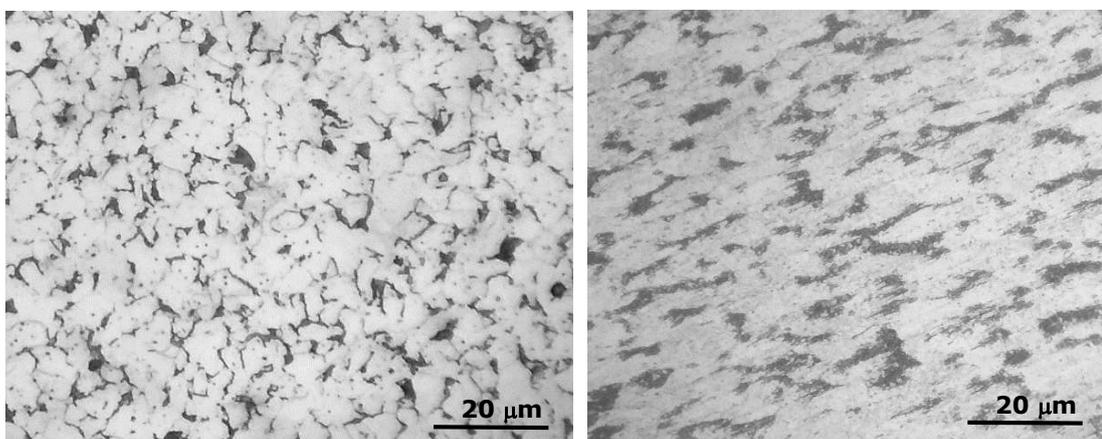


Figura 53 - Grão transversal e longitudinal respectivamente do vergalhão aço CA-60 com deslocamento à 230 mm aplicação da bancada de tensões (Autor, 2018).

Com base nestas imagens é perceptível a diminuição no tamanho do grão transversal e alongamento do longitudinal, o que remete ao entendimento do ganho de resistência, vinculado ao item 5.2 desta sessão, com base no aumento do encruamento a partir das variáveis de resistência a tração e escoamento.

Para comprovação desse aumento, a análise quantitativa do tamanho de grão por *software* computacional é descrita abaixo, por meio do Image J, com base na norma ASTM E1382-97, “Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis”, e exposto o histograma da variação de tamanho.

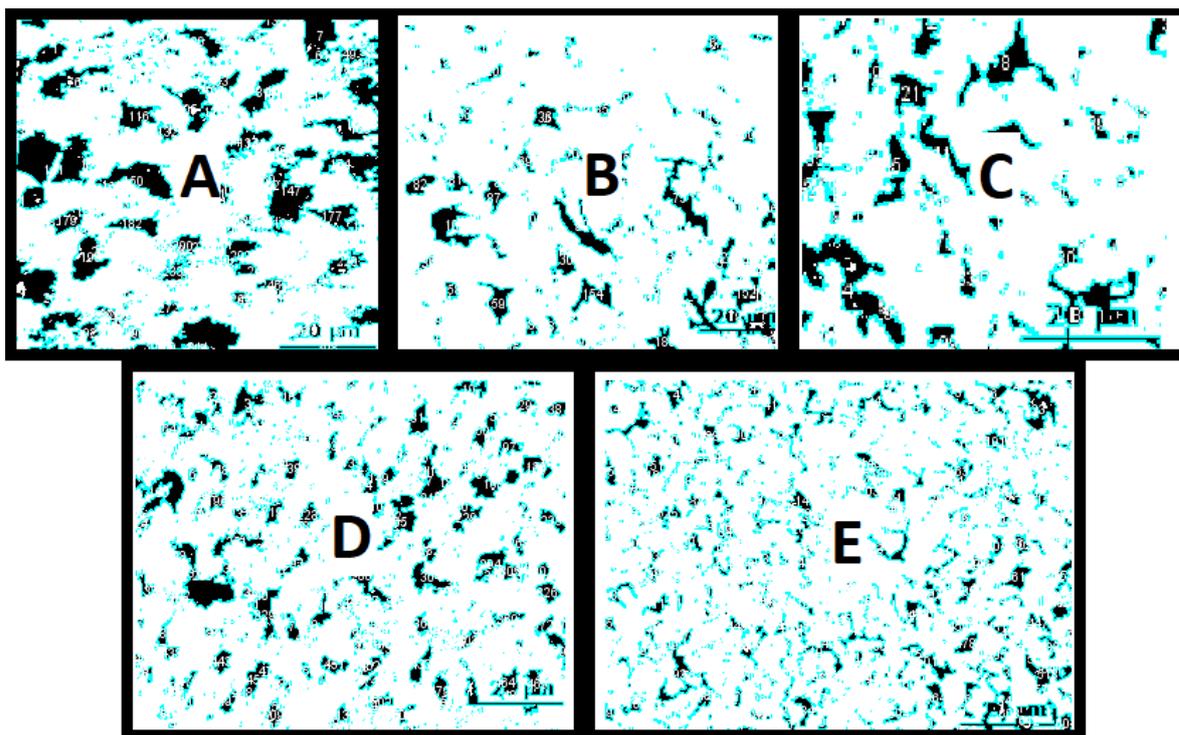


Figura 54 - Montagem da estimativa do tamanho de grão. (Autor, 2018).

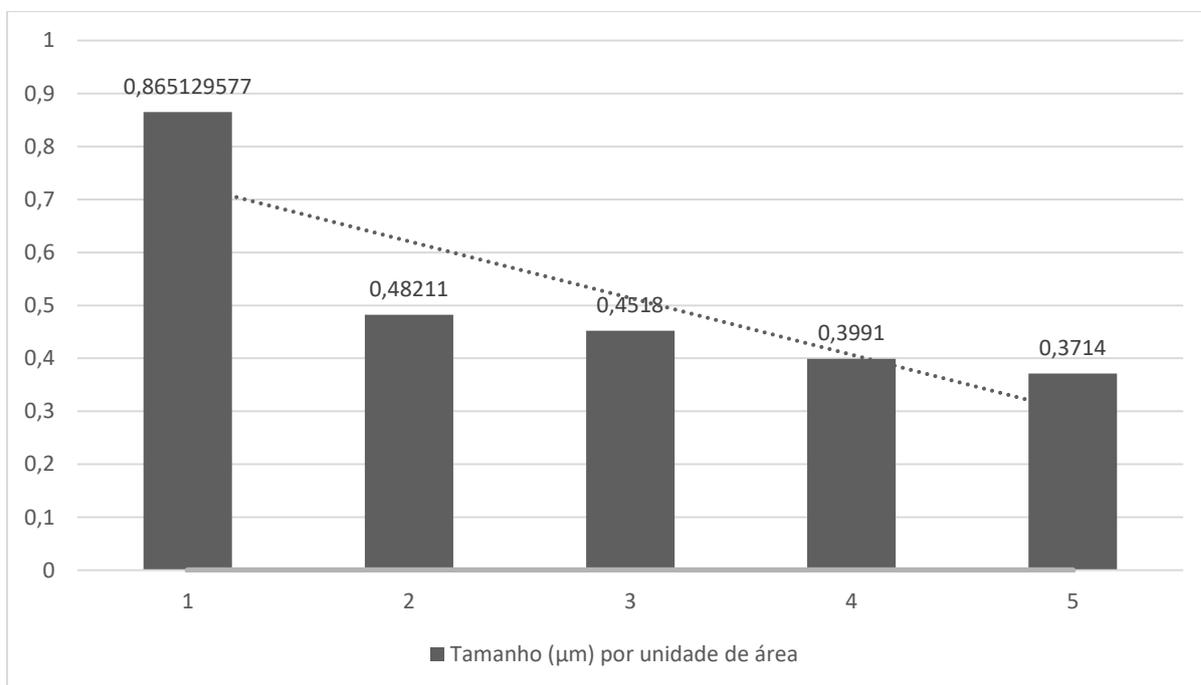


Figura 55 - Distribuição do tamanho médio dos grão (Autor, 2018).

5.4 Tabela de medições de dureza

Tabela 8 - Medições de durezas Rockwell. (Autor, 2018).

Dureza Rockwel - Escala B				Desvio Padrão
Deslocamento mínimo	111	120	113	4,671545069
Deslocamento médio	122	127	125	2,553429067
Deslocamento máximo	124	130	125	3,074627349
MÉDIA				3,074627349

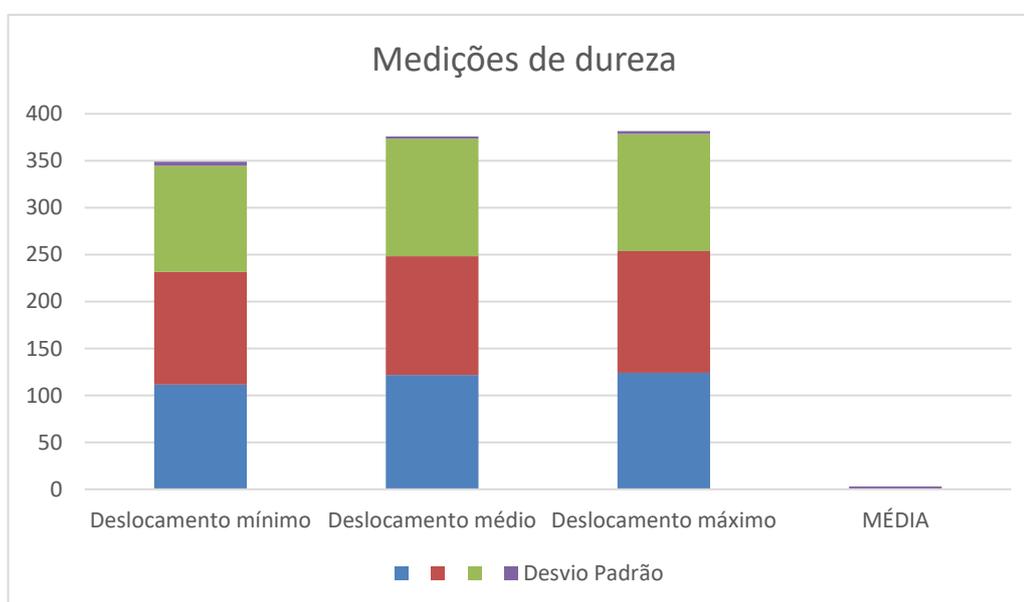


Figura 56 - Distribuição de Dureza X Deslocamento do rolete central móvel. (Autor, 2018).

Com os valores da tabela acima em comparação ao gráfico, observa-se que os valores de dureza para o aço trabalhado a frio, em qualquer uma das posições, encontra-se dentro da faixa limite estipulada pela norma ABNT 7480: 2015, que pode variar entre 111 e 140 Rockwell na escala B. Ademais, nota-se um aumento significativo entre os posicionamentos garantindo a melhoria do aço estrutural. O desvio padrão também mostra-se numa porcentagem aceitável de variação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em meio a todas as análises feitas, esta pesquisa tem seus objetivos concluídos, haja vista que de maneira comprobatória via curva de encruamento a partir do ensaio de tração, limite de escoamento, análise do tamanho dos grãos e ensaios de dureza, o vergalhão do aço CA-60 trabalhado a frio tem um ganho de resistência bastante significativo, quando comparado a métodos como mudança de matéria prima, adição de carbono ou até mesmo temperabilidade, visto que são mais caros e menos viáveis para o processo estudado.

A adequação do problema de qualidade que foi solucionado, tornando o CA-60 dentro dos padrões da norma ABNT 7480:2015, tem como princípio baixo custo, alta eficácia e alta durabilidade. Os números da relação elástica encontrados nos ensaios de tração além dos encontrados no estudo das simulações feita, determina o quão determinante foi o projeto da bancada de tensões e gratificante resolver uma complicação do setor fabril de uma indústria, com métodos eficazes.

Como trabalhos futuros, esta pesquisa objetiva traçar curvas de encruamento a partir de um maior número de pares ordenados, variando em mais posições e determinando mais precisamente a taxa máxima e mínima de encruamento em que a bancada altera o material. Ademais, comparar esses dados com a influência desse ganho nos mais variados tipos de percentuais de carbono das matérias primas, que variam de 8% a 18%, como evidenciado na tabela 1 da pesquisa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5589**: Arames de baixo teor de carbono. Diâmetros, tolerâncias e pesos. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 6330**: Fio-máquina de aço carbono, de uso geral, destinado à trefilação e laminação à frio, 1980

_____. **NBR 6354**: Fio-máquina de aço destinado à trefilação e laminação a frio, 1980.

_____. **NBR NM 87**: Aço carbono e ligados para construção mecânica, designação e composição química. Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR 6892**: Materiais metálicos. Ensaio de tração à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 7480**: Barras e fios de aço destinados a armadura para concreto armado. Rio de Janeiro, 1996, 7p. Última atualização em 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM E – 112 – 13**: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size.

_____. **ASTM E – 1382 – 97**: Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis.

GEORGE F., V. VOORT. ASM Handbook Volume 9: **Metallography and Microstructures**, 2004.

BARROS, A. J. S.; LEHFELD, N. A. S. **Fundamentos de metodologia científica: um guia para iniciação científica**. 2. ed. São Paulo: MAKRON, 2000.

BRASIL, IBGE. **Censo Demográfico, 2014**. Disponível em: <www.ibge.gov.br>.

TEOH, L. L. **Thermo-mechanical processing and microstructure of microalloyed steel bar and wire rod products**. Journal of Materials Processing Technology 48, 1995.

CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering: an introduction**. 7. ed. New York. John Wiley & Sons, 2007.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica- Estrutura e propriedades das ligas metálica**, 2ª ed. v.1. São Paulo: Editora McGraw-Hill, 1986.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos. Associação Brasileira de Materiais e Metalurgia**. 6ª Edição. São Paulo: Editora McGraw-Hill, 1990.

COLPAERT, H., “**Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**”, 3ª Edição, Edgard Blücher, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1974.

DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**. 3. ed. Singapore. McGraw-Hill Book Company (UK) Limited, 1988.

Gerdau do (Brasil). Disponível em: <[https:// www.gerdau.com/br/pt/produtos/catalogos-e-manuais](https://www.gerdau.com/br/pt/produtos/catalogos-e-manuais)> acesso em 23/06/2016

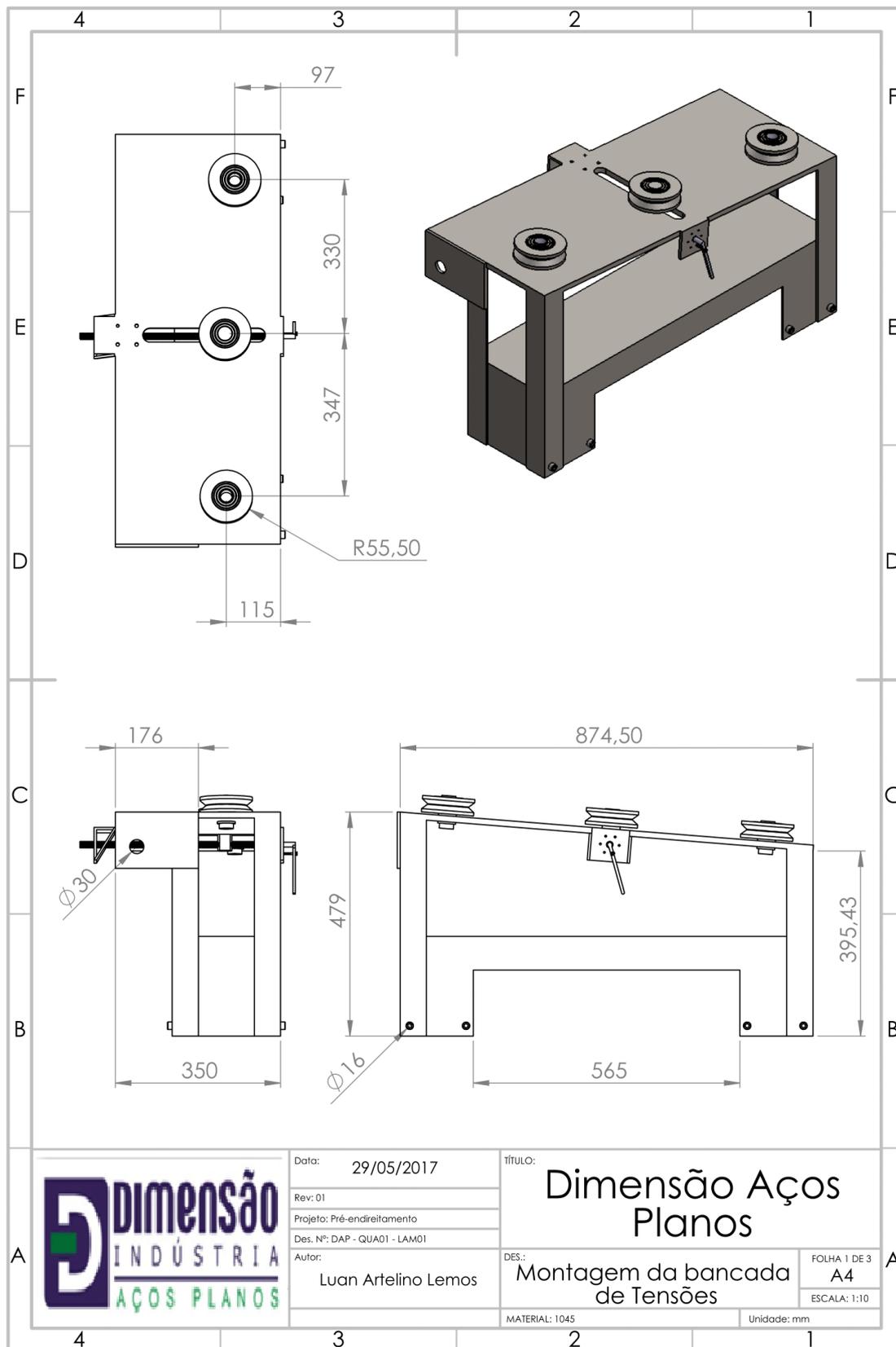
Rodrigues, L. M.; Santos, C. H. R.; Veloso, R. R.; Lemos, M. V.; Santos, C.; Cabral, R. F., 2014, “Estudo da microestrutura e da microdureza dos aços 1020 e 1060”, Cadernos UniFOA

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos, Fundamentos teóricos e práticos** - São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda, 1982.

VOTORANTIM. **Linha de laminação a frio**. Rio de Janeiro: Votorantim Siderúrgica, 2013.

APÊNDICES

APÊNDICE A – DESENHO TÉCNICO DO PROJETO CONCEITUAL



APÊNDICE B – PERSPECTIVA DA BANCADA MONTADA

