



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

LAÉRCIO PEREIRA CAITANO

**ESTUDO COMPARATIVO DE RESISTÊNCIA AO DESGASTE DOS AÇOS
FERRAMENTA DIN X 190 WCrV 2-1 E DIN X 155 CrVMo 12-1(AISI D2) EM GUIAS
DE LAMINAÇÃO.**

FORTALEZA
2014

LAÉRCIO PEREIRA CAITANO

**ESTUDO COMPARATIVO DE RESISTÊNCIA AO DESGASTE DOS AÇOS
FERRAMENTA DIN X 190 WCrV 2-1 E DIN X 155 CrVMo 12-1 EM GUIAS DE
LAMINAÇÃO.**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva

FORTALEZA
2014

LAÉRCIO PEREIRA CAITANO

**ESTUDO COMPARATIVO DE RESISTÊNCIA AO DESGASTE DOS AÇOS
FERRAMENTA DIN X 190 WCrV 2-1 E DIN X 155 CrVMo 12-1 EM GUIAS DE
LAMINAÇÃO.**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva

Aprovada em ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Marcelo Ferreira Motta
Universidade Federal do Ceará

FORTALEZA
2014

“É graça divina começar bem. Graça maior persistir na caminhada certa. Mas graça das graças é não desistir nunca.”

Dom Hélder Câmara

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida, proteção e me dar discernimento nas minhas tomadas de decisões.

Aos meus pais Maria do Carmo e Lucimário Caitano, pelo apoio, conselho e direcionamento das corretas escolhas na vida.

À minha amada esposa, Joseneide, que acompanha de perto minha trajetória, apoiando e incentivando em todos os momentos.

À minha família, que está sempre por perto, compartilhando momentos especiais.

Ao Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva pela contribuição valorosa na realização deste trabalho.

Aos professores do departamento de Engenharia Metalúrgica pelas orientações e ensinamentos.

Aos meus colegas de trabalho, pelo apoio profissional e colaboração, viabilizando a realização deste sonho.

RESUMO

A evolução dos aços ferramenta nos processos industriais tem contribuição significativa no desenvolvimento e conseqüentemente no aumento de competitividade no setor siderúrgico. No processo de Laminação este material é muito importante, pois atua diretamente na conformação, corte e acabamento final dos produtos, com temperaturas de trabalhos que variam desde 27 a 1200°C. Ferramentas para trabalho a quente e a frio, corte, estampagem, utilização em altas velocidades de corte, enfim, estes aços possuem grandes variedades de aplicações no processo produtivo.

Este trabalho tem como objetivo estudar a tenacidade, composição química, dureza e resistência ao desgaste entre dois tipos de aços ferramenta, aplicado especificamente em guias de Laminação. Um tipo de aço é amplamente utilizado neste equipamento e o outro possui aplicações em menor escala por ser um desenvolvimento mais recente. Para realização deste estudo, foram executadas diversas análises em laboratórios para evidenciar composições químicas, estruturas metalúrgicas, comportamento mecânico. Outra fonte de estudo foi o ambiente de trabalho, onde os roletes passaram por testes reais em uma Laminação de barras e perfis de uma indústria de grande porte. Desta forma foi possível evidenciar o desempenho dos materiais, tanto no processo, quanto em custo-benefício. Foi observado que o aço ferramenta DIN X 190 WCrV 2-1 apresentou resistência ao desgaste aproximadamente 5x superior se comparado ao aço DIN X 155 CrVMo 12-1.

Palavras-chave: Aços Ferramenta, Laminação, Competitividade, Desempenho, Comportamento Mecânico.

ABSTRACT

The evolution of tool steels in industrial processes has had significant contribution in the development and consequently in increasing competitiveness in the steel industry. This material is very important for the Rolling Mill process because they act directly on conforming, guiding and shearing the product in process, working with temperatures ranging from 27° C to 1200° C. They can be used for hot and cold working tools, shearing, stamping, high speed cutting, and ultimately, these steels can be widely applied in different production processes.

This study is focused on analyzing the tenacity, chemical composition, hardness and wear resistance of tool steels applied specifically in Rolling Mill Guide rollers. One is well known and widely applied in the industry and the other has been recently developed and is being applied in a smaller scale. For this study, several analysis were performed in Laboratory to determine steel chemistries, metallurgical structures and mechanical properties. Furthermore, data was collected from the industrial environment where the rollers were put through actual trials on a rebar and merchant bar Rolling Mill. With that analysis it was possible to determine the materials performance in the process and the financial benefits of using those materials. It was observed that the tool steel DIN 190 X 2-1 WCrV outperformed the DIN 155 CrVMo X 12-1.

Keywords: Tool Steel, Rolling Mill, Competitiveness, Performance, Mechanical Properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de moldagem por conformação a partir de um sólido.	3
Figura 2 - Representação da etapa de execução do Processo de Laminação.	4
Figura 3 - Representação esquemática de Laminação de Aço Plano.....	5
Figura 4 - Representação de uma cadeira Quádruo.	6
Figura 5 - Representação esquemática de cadeiras (a) Duo Reversível, (b) Trio, (c) Quádruo.	7
Figura 6 - Diversas posições de cadeiras de laminação - (a) Simples; (b) Aberto ou em Linha; (c) em Série; (d) Contínuo; (e) e (f) Semi-contínuo; (g) Zigue-zague ou alternado; (h) Múltiplo.....	8
Figura 7 - Cilindros de Laminação em um Laminador Quádruo.....	10
Figura 8 - Esboço de uma sequência de canais em um cilindro.	11
Figura 9 - Sequência de calibração de passes de cantoneira e Trilhos	13
Figura 10 - Exemplo de guias de entrada e saída secas.....	15
Figura 11 - Exemplos de guias roletadas	16
Figura 12 - Efeito dos elementos de ligas nas propriedades dos aço	19
Figura 13 - Ciclos de Têmpera para aços carbono SAE 1060 e para Aço Ferramenta AISI D2.....	21
Figura 14 - Variação de dureza da superfície ao núcleo de corpos de prova de diâmetro 100mm. Comparação entre o aço SAE 1045 temperado em óleo e o aço H13 temperado ao ar, ambos com 0,4% C	21
Figura 15 – À esquerda guia de laminação em operação e rolete após o uso à direita.....	23
Figura 16 - (a) Roletes utilizados no estudo; (b) Ilustração do ponto seccionado; (c) Amostras cortadas prontas para a preparação	24
Figura 17 - Politriz e lixadeira Arotec.....	25
Figura 18 - Tela do Software SVRNA.....	26
Figura 19 - Microscópio Ótico Olympus BX60MF5.....	26
Figura 20 - Micrômetro SHIMADZU HMV-2 utilizado no ensaio de microdureza Vickers.....	27
Figura 21 - Equipamento utilizado para o ensaio de impacto.....	28
Figura 22 - Amostras padronizada para realização do ensaio	28

Figura 23 - Relógio comparador utilizado na medição de desgaste dos roletes	29
Figura 24 - Diferenças encontradas entre os elementos químicos.....	32
Figura 25 - Micrografias do aço DIN X 155 CrVMo 12-1 com aumentos de 50, 100 e 500x. Ataque nital 2%.....	33
Figura 26 - Micrografias do aço DIN X 190 WCrV 2-1 com aumentos de 50, 100 e 500x. Ataque nital 2%.....	35
Figura 27 - Quantificação das fases dos materiais DIN X 190 WCrV 2-1 e DIN X 155 CrVMo 12-1	37
Figura 28 - Perfis de microdureza Vickers.....	38
Figura 29 - Perfis de microdureza Vickers na Matriz e Precipitado	38
Figura 30 - Análise de dureza HRC.....	39
Figura 31 - Resultado de Resistência ao Impacto das amostras.	40
Figura 32- Comparativo de resistência ao desgaste	41
Figura 33 - Desempenho entre materiais - Material 1 - DIN X 190 WCrV 2-1; Material 2 - DIN X 155 CrVMo 12-1	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplos de composição química de alguns materiais para cilindros.....	12
Tabela 2 - Classificação Simplificada de guias para laminação de barra e perfis de aço	14
Tabela 3 - Principais Elementos Químicos.....	24
Tabela 4 - Principais elementos químicos especificados no HWC.....	24
Tabela 5 - Parâmetros para acompanhamento do desgaste dos roletes	30
Tabela 6 - Comparativo da composição química entre os materiais	31
Tabela 7 - Diferenças percentuais entre as composições encontradas	31
Tabela 8 - Desgaste observado por campanha e produção.....	42
Tabela 9 - Análise de custo benefício para o rolete DIN X 190 WCrV 2-1	43

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVOS.....	2
	2.1. Objetivos Gerais.....	2
	2.2. Objetivos Específicos	2
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
	3.1. Processo de Laminação.....	3
	3.2. Classificação do Laminador	5
	3.2.1. Cadeiras de Laminação.....	6
	3.2.2. Disposição das Cadeiras.....	7
	3.3. Cilindros de Laminação.....	9
	3.3. Esquema de passes de Laminação	12
	3.4. Guias de Laminação de Produtos Longos.....	14
	3.4.1. Guias Roletadas.....	15
	3.4.2. Roletes de Guias.....	16
	3.5. Aços Ferramenta.....	17
	3.5.1. Características dos Aços Ferramenta	17
	3.5.2. Composição Química	18
	3.5.3. Tratamento Térmico	20
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
	4.1. Considerações	23
	4.2. Materiais	23
	4.2.1. Amostras	23
	4.2.2. Especificação do Material.....	24
	4.2.3. Preparação das Amostras.....	25
	4.5. Análise Química	25
	4.6. Análise Metalográfica	25
	4.3. Análise de Dureza.....	26

4.4. Análise de Tenacidade.....	27
4.7. Análise de Desgaste	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1. Análise Química	31
5.2. Análise Metalográfica.....	33
5.2.1. Quantificação das Fases	36
5.3. Análise de Dureza.....	38
5.4. Análise de Tenacidade.....	39
5.5. Análise de Desgaste	40
5.6 Custo-benefício.....	42
6. CONCLUSÃO	44
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1. INTRODUÇÃO

É de vital importância a necessidade das indústrias adaptarem-se ao novo cenário mundial de grande concorrência. No setor siderúrgico, a busca por desempenho, redução de custos e inovação é uma temática que deve ser considerada como um fator de sobrevivência, um exemplo disto é o aumento do número de aquisições e fusões entre siderúrgicas que passou de 107 em 2003 para 249 em 2007, parte destes motivos deve-se ao fato das empresas adquiridas não estarem bem financeiramente. O retrato das empresas que sobreviveram a estas mudanças é o de organizações com planejamento estratégico bem definido, pessoas engajadas, austeridade nos custos e contínua inovação em seus processos, desde grandes a simples investimentos em melhorias.

A indústria inicia uma série de ações voltadas para melhorar a estabilidade em seus processos com a redução de desperdício e melhoria no desempenho. Ações como implantação de novos materiais que visam à redução de desgaste com o aumento da vida útil do equipamento, reduzindo interrupções operacionais, minimizando a intervenção, têm contribuído significativamente para a redução dos custos operacionais.

Os aços ferramenta tiveram importante parcela no desenvolvimento industrial. Constantes pesquisas e desenvolvimentos ofereceram a indústria uma vasta gama de materiais e aplicações específicas para cada tipo de operação. No processo de laminação estes aços têm fundamental importância na conformação mecânica ou como auxiliar desta, como é o caso da aplicação em Guias de Laminação, Insertos utilizados nos tratamentos térmicos de vergalhões, rolos e cilindros expostos a temperaturas em torno de 1100°C, o que demonstra que este tipo de material não tem aplicação apenas em ferramentas de corte ou matrizes.

O estudo na redução do desgaste em roletes de laminação leva ao conhecimento do comportamento de cada tipo de material com o produto em processo, temperatura de trabalho e esforços aplicados. Um rolete mais resistente promove um melhor desempenho operacional, redução de consumo de material e conseqüentemente redução de custos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento dos Aços Ferramenta DIN X 155 CrVMo 12-1(AISI D2) e DIN X 190 WCrV 2-1 aplicados em roletes de Guias em um processo de Laminação.

Analisar o custo benefício do aço ferramenta DIN X 190 WCrV 2-1 em relação ao DIN X 155 CrVMo neste tipo de aplicação.

2.2. Objetivos Específicos

Caracterizar amostras do Aço DIN X 155 CrVMo 12-1 e DIN X 190 WCrV 2-1, utilizando análise de composição química, microdureza e metalográfica, bem como avaliar suas propriedades mecânicas através do ensaio de impacto tipo charpy e resistência ao desgaste com medições em cada rolete utilizando um micrômetro digital.

Relacionar as análises com o desempenho apresentado pelos materiais no processo de laminação, através da medição de desgaste, observação quanto à presença de trincas ou materiais agregados. Estas evidências foram obtidas durante a operação dos roletes.

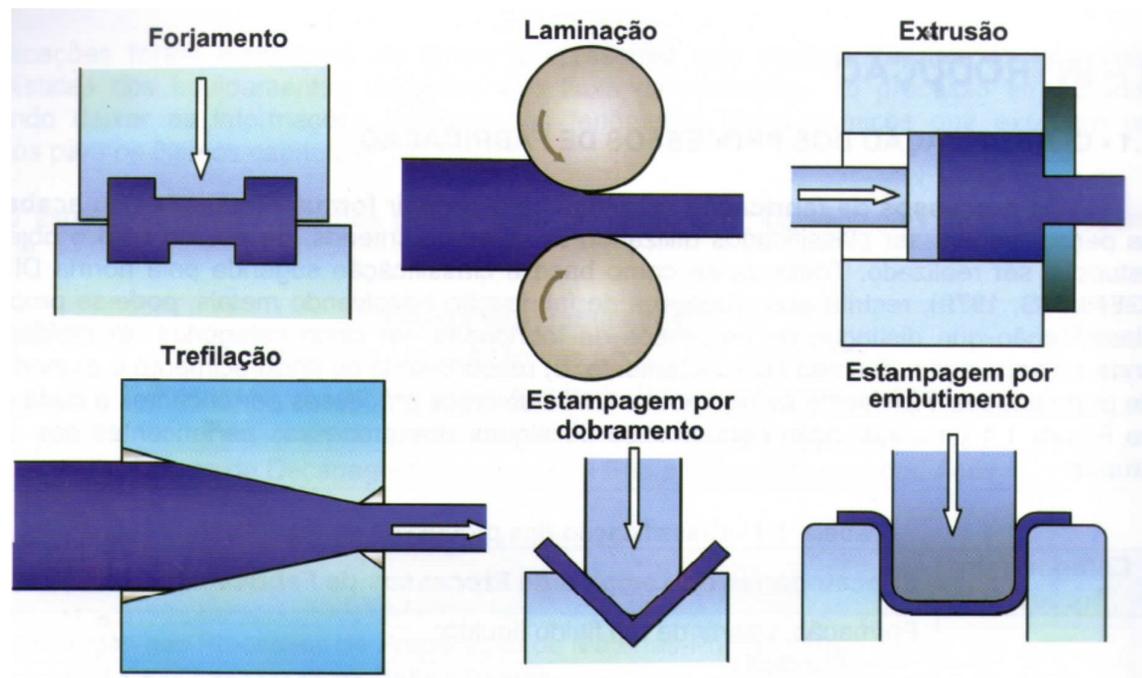
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Processo de Laminação

O processo de Laminação está incluído na categoria denominada moldagem, pertencendo à subcategoria de conformação a partir de um sólido. Estes processos também são denominados de Processos de Conformação Mecânica ou Processos de Conformação Plástica (Rizzo, 2007).

Caracterizar mostras do Aço DIN X 155 CrVMo 12-1 e DIN X 190 WCrV 2-1, utilizando análise de composição química, microdureza e microestrutura, bem como avaliar suas propriedades mecânicas e resistência ao desgaste.

Figura 1 - Processo de moldagem por conformação a partir de um sólido.

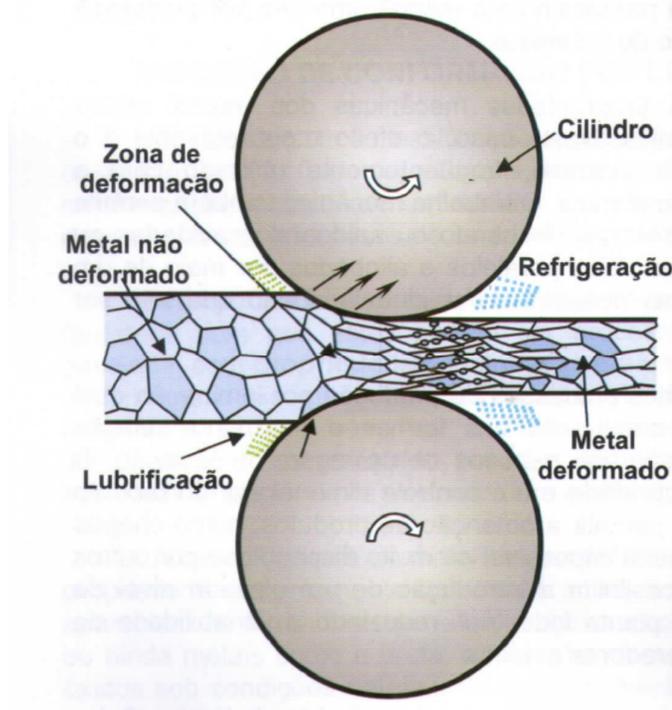


Fonte: (Rizzo, 2007)

Por definição a laminação é um processo de conformação no qual o material é forçado a passar entre dois cilindros, girando em sentidos opostos, com praticamente a mesma velocidade superficial e espaçados entre si a uma distância menor que o valor da dimensão inicial do material a ser deformado (Figura 2). Ao passar (laminar) entre os cilindros a tensão gerada entre o passe (produto em

processamento) promove uma deformação plástica, na qual a espessura é reduzida o comprimento aumentado e a largura pode ser aumentada ou reduzida, em alguns casos esta largura não é alterada.

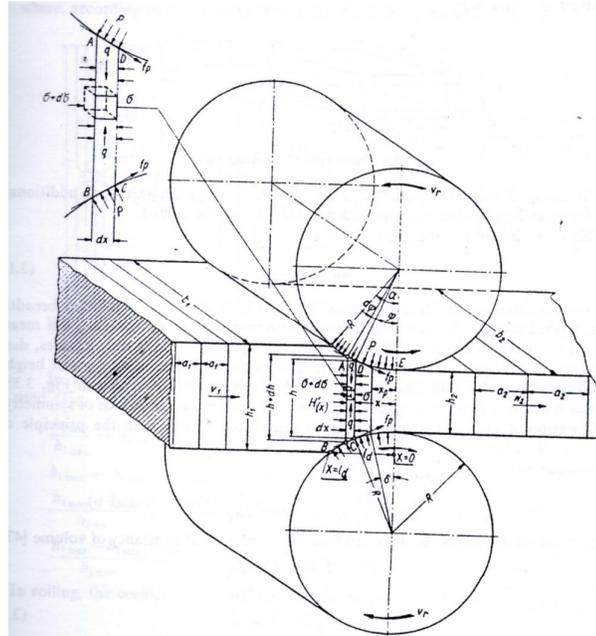
Figura 2 - Representação da etapa de execução do Processo de Laminação.



Fonte: (Rizzo, 2007).

A passagem da peça entre os cilindros ocorre através da ação da força de atrito que atua na superfície de contato entre as peças e os cilindros. Essa força é proporcional ao coeficiente de atrito entre a peça e cilindro e à força normal na superfície de contato. A força normal dividida pela área da superfície de contato é a pressão exercida pelos cilindros que, por sua vez resulta da resistência à deformação plástica do material da peça (Mourão, 2007).

Figura 3 - Representação esquemática de Laminação de Aço Plano.



Fonte: (Wusatowski, 1969)

O processo de Laminação pode ser conduzido a frio ou a quente:

Laminação a quente: A temperatura de trabalho do material a ser laminado situa-se acima da temperatura de recristalização, de forma a reduzir a resistência mecânica à deformação plástica em cada passagem e permitir a recuperação da estrutura do metal, evitando o encruamento para os passes subsequentes.

Laminação a Frio: A peça é um produto semi-acabado, previamente laminado a quente. O material apresenta maior resistência à deformação por situar-se abaixo da temperatura de recristalização, proporcionando um aumento de resistência com a deformação (encruamento), devido a estes grandes esforços há uma limitação na redução da secção transversal (Mourão, 2007).

3.2. Classificação do Laminador

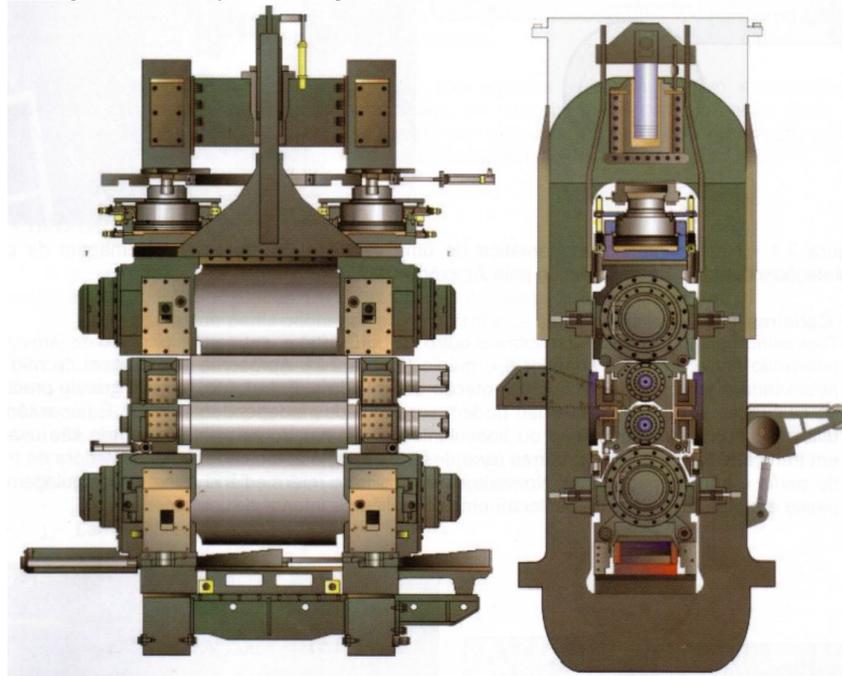
Para classificação de um laminador são utilizados alguns critérios como: tipos de produtos laminados, tipos de cadeiras, layout do laminador e temperatura de trabalho.

A classificação de um laminador geralmente é feita de acordo com o tipo de cadeira.

3.2.1. Cadeiras de Laminação

O conjunto formado pelos cilindros de laminação, com seus mancais, guias, suportes é chamado de cadeira de laminação.

Figura 4 - Representação de uma cadeira Quádruo.



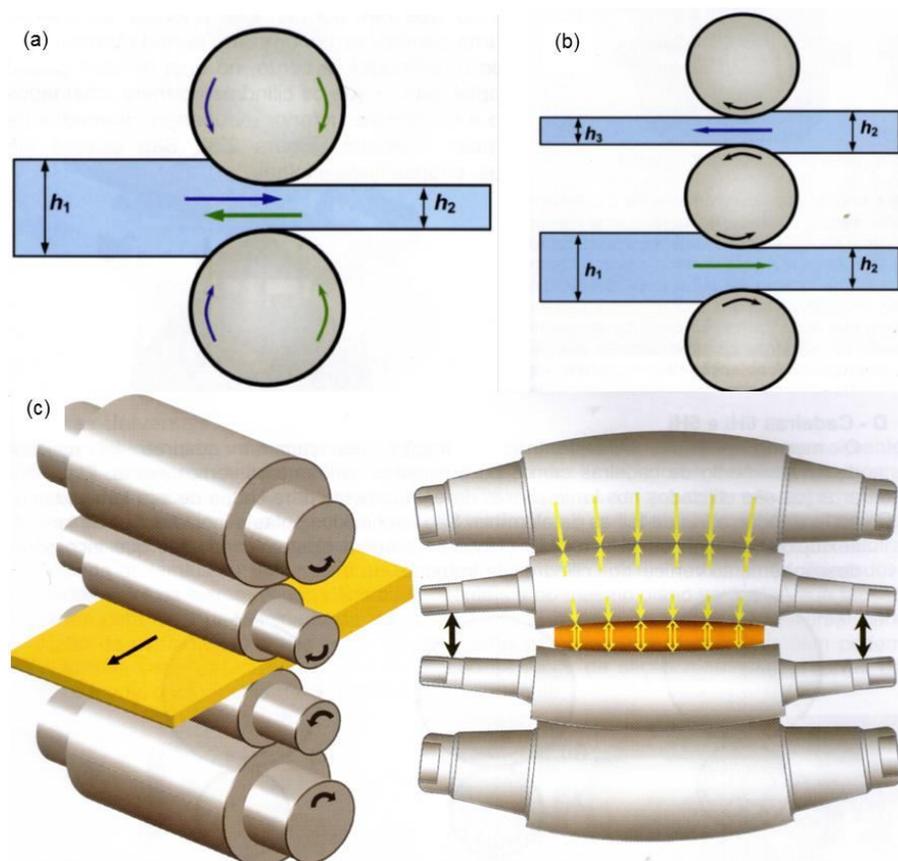
Fonte: (Rizzo, 2007)

Cadeiras Duo: Consistem em dois cilindros montados um sobre o outro na posição horizontal (figura 5a), ou dispostos paralelamente na posição vertical, cadeiras na posição vertical são utilizadas de acordo com o tipo de calibração do laminador, no caso dos cilindros dispostos horizontalmente, o sentido de rotação pode ser ou não reversível. Estas cadeiras apresentam bastante versatilidade na conformação do produto laminado.

Cadeiras Trio: Três cilindros são dispostos um sobre o outro na horizontal e a barra é introduzida no laminador passando entre o cilindro superior e o médio(Figura 5b). Apresenta uma vantagem de não ser necessária a reversão do sentido de rotação dos cilindros, entretanto exigem grandes precisões de calibração já que os canais não podem ser regulados independentemente. São utilizadas mesas elevatórias ou basculantes para o posicionamento da barra dentro do canal.

Cadeiras Quádruo: Utilizadas para laminar chapas largas, onde se utiliza cilindros com grandes dimensões de mesa. Estes cilindros são submetidos às tensões originadas pela resistência do metal à deformação, que geram a deflexão dos cilindros, levando a obtenção de produtos mais espessos no centro que nas bordas, para minimizar este problema foi criado o laminador quadro, no qual existem quatro cilindros, montados um sobre o outro na horizontal, sendo que os cilindros do meio chamado de cilindros de trabalho e os cilindros superior e inferior (Figura 5c) são chamados de cilindros de encosto ou apoio (Rizzo, 2007).

Figura 5 - Representação esquemática de cadeiras (a) Duo Reversível, (b) Trio, (c) Quádruo.



Fonte: (Rizzo, 2007).

3.2.2. Disposição das Cadeiras

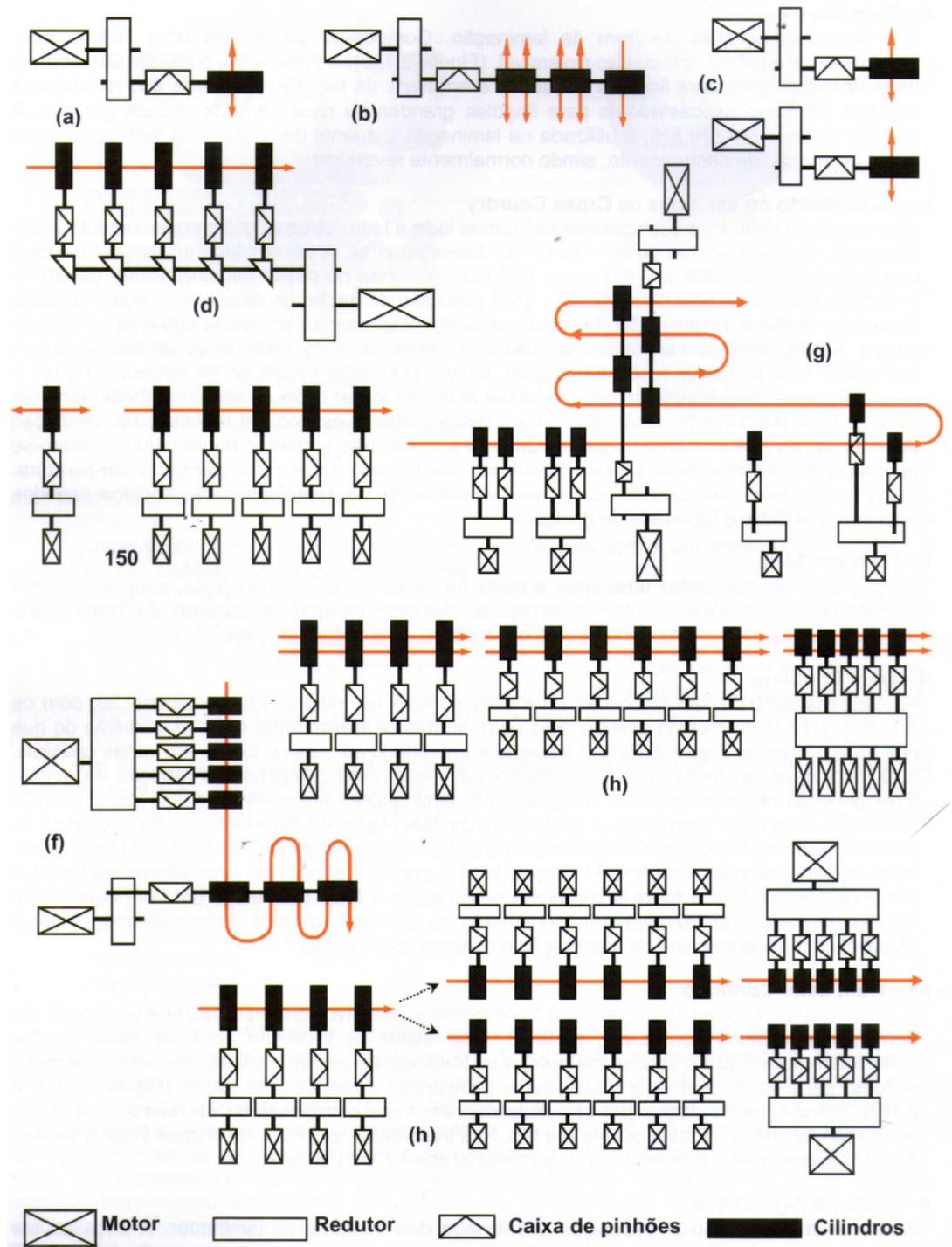
O conjunto de cadeiras forma o trem de laminação, a disposição destas depende principalmente:

- Do programa de laminação;
- Do número de passagens necessárias para a laminação de um determinado produto;
- Da capacidade de produção exigida;
- Do tipo de produto que está sendo produzido.

Em função destes fatores surgiram diversas disposições de cadeira:

- Trem Simples – Compõem-se de apenas uma cadeira que geralmente é Quádruo, trio ou duo-reversível (Figura 6a);
- Trem Aberto ou em linha – Constituídos de diversas cadeiras colocados lado a lado, dotadas de um acionamento único (Figura 6b);
- Trem em Série – As cadeiras são colocadas uma após a outra no mesmo eixo de laminação, com os cilindros girando no mesmo sentido (Figura 6c);
- Trem Contínuo – Mesma configuração do trem em série, porém com menor afastamento entre as cadeiras. O material é laminado ao mesmo tempo em várias cadeiras, ocorrendo aumento progressivo da velocidade periférica do cilindro, a fim de compensar a redução da seção obtida em cada passe (Figura 6d);
- Trem Semi-contínuo – Uma etapa de transição entre os trens abertos e os trens contínuos, pode-se obter uma melhor superfície e compensar a redução de seção (Figura 6e);
- Trem em Zigue-zague ou Alternado – Este tipo de laminador apresenta grande flexibilidade de programa de laminação (Figura 6f);
- Trem Múltiplo – Duas barras podem ser laminadas simultaneamente e serem distribuídas uma para cada trem. (Rizzo, 2007)

Figura 6 - Diversas posições de cadeiras de laminação - (a) Simples; (b) Aberto ou em Linha; (c) em Série; (d) Contínuo; (e) e (f) Semi-contínuo; (g) Zigue-zague ou alternado; (h) Múltiplo.



Fonte: (Rizzo, 2007)

3.3. Cilindros de Laminação

Os cilindros de laminação são considerados componentes estratégicos para o processo, estes promovem diretamente a conformação mecânica, sendo um dos

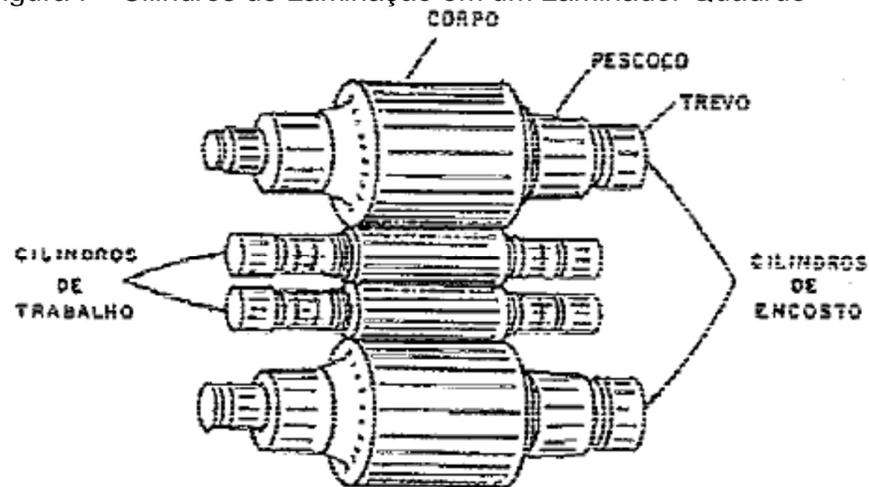
principais responsáveis pela forma, dimensão e acabamento superficial do produto laminado.

Constitui um componente de elevado custo para o processo, além de contribuírem significativamente para o desempenho operacional de um laminador, sendo necessário rigoroso controle de desgaste, vida útil e parâmetros operacionais.

Podemos dividir os cilindros em três partes: Corpo (ou mesa), pescoço e trevo (Figura 7).

- Pescoço – Local onde o peso do cilindro e a carga proveniente da conformação mecânica devem ser suportados, neste local são montados os elementos rolantes como rolamentos;
- Trevo – Ponto de acoplamento do eixo com o acionamento (motor), geralmente com formato de trevo (Mourão, 2007) e em algumas situações em formato plano ou cilíndrico;
- Corpo (ou mesa) – Local onde ocorre o processo de laminação da peça. (Mourão, 2007).

Figura 7 - Cilindros de Laminação em um Laminador Quádruplo

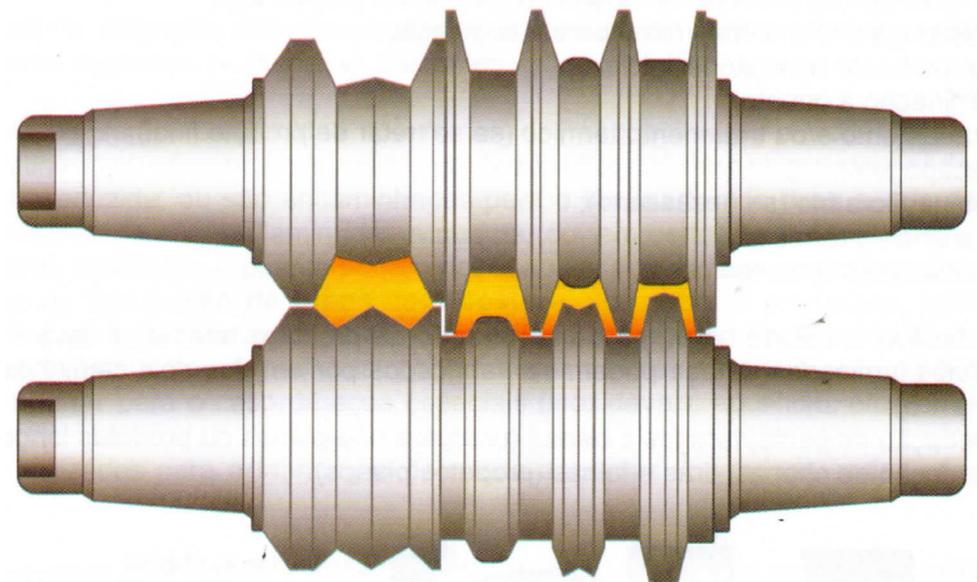


Fonte: (Mourão, 2007).

Os cilindros com superfície de mesas lisas ou cilíndricas são utilizados para laminação de placas e chapas; os cilindros com ranhuras e passagens (ou canais) são utilizados para laminação de perfis e barras. (Mourão, 2007)

Estes canais são usinados para atender a especificação de calibração do produto a ser laminado, as dimensões de projeto devem ser estritamente obedecidas para a garantia da qualidade do produto acabado (final).

Figura 8 - Esboço de uma sequência de canais em um cilindro.



Fonte: (Rizzo, 2007).

A combinação das variáveis operacionais tais como: tipo de calibração ou escala de passes, método de refrigeração dos cilindros, tipo de material a ser laminado, forma, dimensões e acabamento superficial, exigem dos cilindros uma série de propriedades como:

- Resistência à formação de trincas térmicas;
- Resistência ao desgaste;
- Resistência a impactos mecânicos;

A tabela 1 detalha os materiais aplicados e características dos cilindros de laminação. (Rizzo, 2007)

Tabela 1 - Exemplos de composição química de alguns materiais para cilindros

Classe	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	Dureza (HSc)	Resistência à Tração (kgf/mm ²)
Ferro Fundido Nodular	3,0-3,6	1,3-2,2	0,3-1,0	1,0-2,5	1,0-3,0	0,1-1,0	40-75	35-70
Ferro Fundido Coquilhamento Indefinido	2,8-3,6	0,5-1,4	0,3-1,0	0,3-4,6	0,5-2,1	0,2-0,6	55-85	30-55
Ferro Fundido Coquilhamento Definido	2,8-3,6	0,5-1,4	0,3-1,0	0,3-4,6	0,5-2,1	0,2-0,6	60-85	20-35
Ferro Fundido Alto Cromo	2,1-3,0	0,45-0,95	0,8-1,3	0,9-1,9	14,0-8,0	0,9-1,9	60-80	-
Aço Adamite	1,4-2,3	0,3-1,6	0,3-1,0	0,2-2,0	0,6-2,0	0,2-1,0	40-60	60-100
Aço Forjado	0,4-0,8	0,3-0,6	0,3-1,0	0,2-1,0	1,0-3,0	0,2-1,0	55	100-120

Fonte: (Rizzo, 2007).

3.3. Esquema de passes de Laminação

Os produtos planos são laminados em cilindros com geratriz aproximadamente reta, ou seja, ligeiramente côncava ou convexa para compensar a deformação elástica.

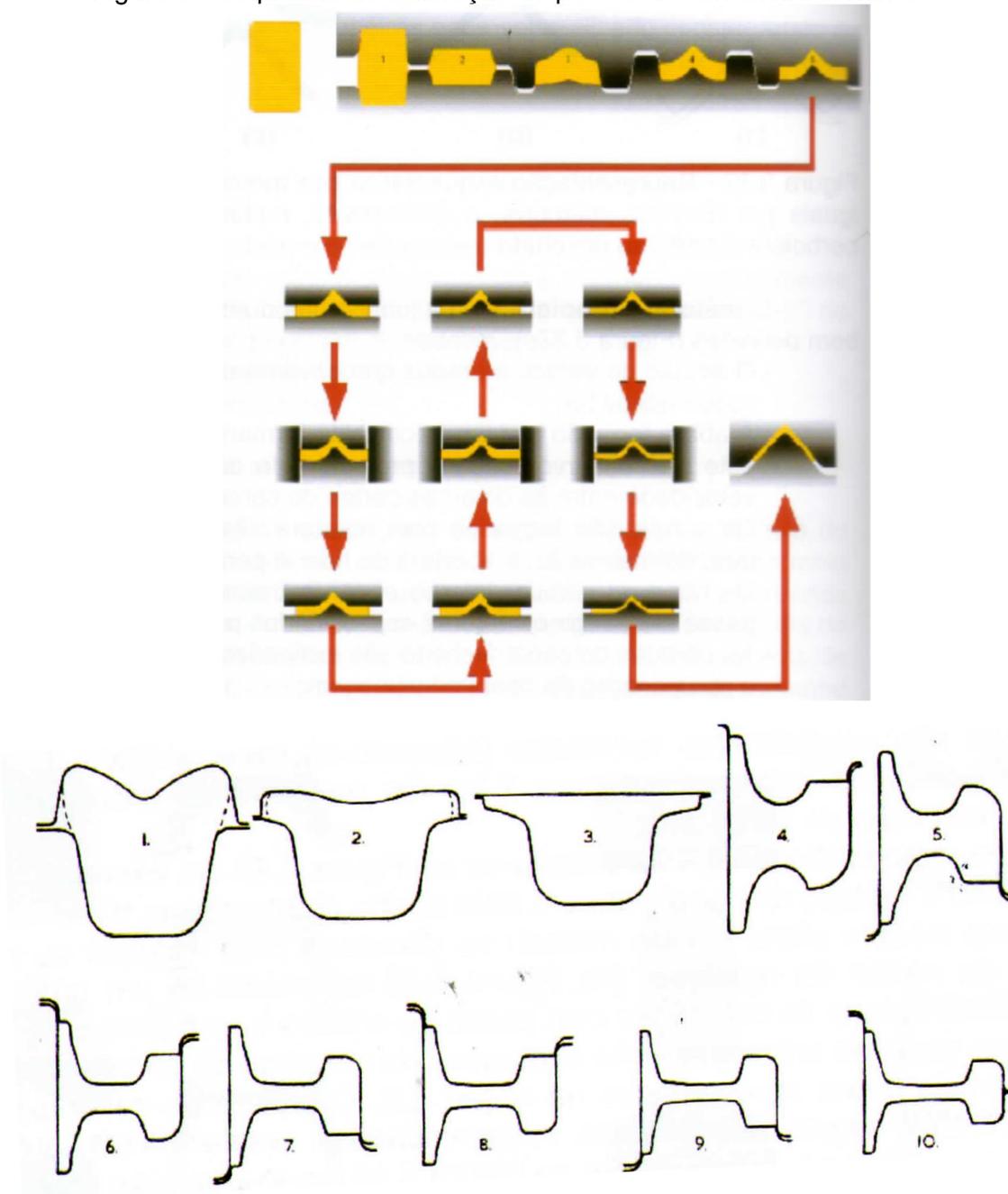
A sequência de passes é projetada para redução da espessura de acordo com as características de confiabilidade do material, a capacidade do laminador, e as especificações do produto final.

Para os produtos não-planos o projeto da sequência de passes é também chamado de calibração, que promove modificações graduais micro e macroscópicas no material laminado. Neste caso, os cilindros de laminação apresentam ranhura ou canais com perfis projetados para a calibração de cada produto.

Os passes iniciais e intermediários, realizados unicamente com o objetivo de redução de secção, são denominados passes de desbaste. Os passes finais são chamados de passes acabadores ou acabamento. (Mourão, 2007)

A figura 9 detalha uma típica sequência de calibração para produção de produtos longos de aço, observando-se as alterações dimensionais ocorridas em cada passe para a formação dos produtos especificados.

Figura 9 - Sequência de calibração de passes de cantoneira e Trilhos



Fonte: (Rizzo, Processos de Laminação de Produtos Longos de Aço, 2010)

3.4. Guias de Laminação de Produtos Longos

Como o material laminado a quente está a uma temperatura elevada, a sua resistência mecânica à deformação é reduzida, sofrendo, portanto, deformações e ondulações ao sair de um passe ou ao ser deslocado de um passe para outro. Para que a laminação se processe corretamente, é necessário que ao entrar ou sair de um passe, a seção do esboço esteja perpendicular aos cilindros, garantindo que não ocorram grandes distorções de fluxo de material nas direções lateral e vertical. Para garantir esta condição, em muitas situações é necessária a utilização de sistemas de guiagem na entrada e na saída dos passes.

As guias tem a ponta da barra para dentro do canal, proporcionando segurança operacional e qualidade do material laminado. São montadas na entrada e saídas das gaiolas no mesmo alinhamento do canal que está sendo utilizado. (Rizzo, Processos de Laminação de Produtos Longos de Aço, 2010)

A tabela 2 detalha a classificação das guias de laminação:

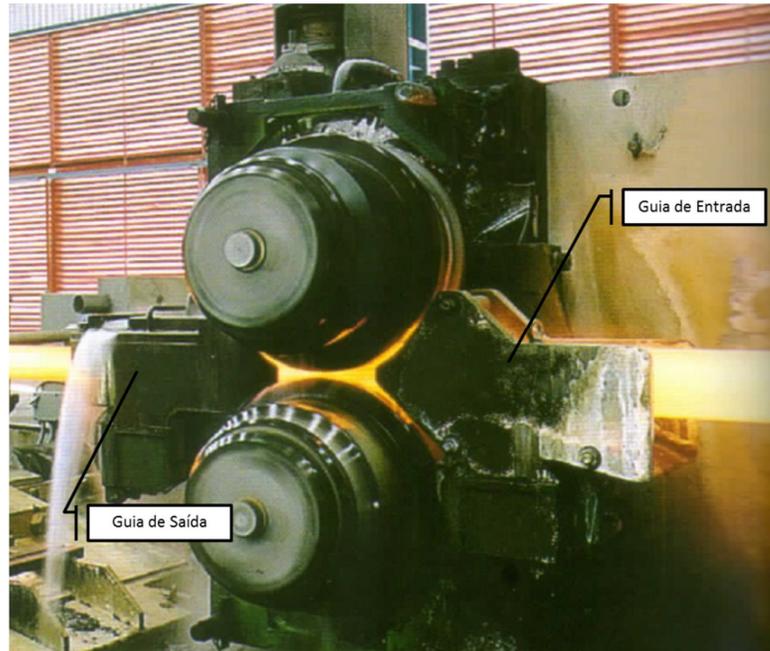
Tabela 2 - Classificação Simplificada de guias para laminação de barra e perfis de aço

Posição e função da guia	Tipo de Guia
Entrada	Seca
	Bipartida com rolete
	Monobloco
	Roletada
Saída sem torção	Seca
	Tubo
	Slitadora
Saída com torção	Calibradora
	Seca
	Roletada

Fonte: Adaptado de (Rizzo, Processos de Laminação de Produtos Longos de Aço, 2010).

Na figura 10 podemos verificar guias de entrada e saída do tipo seca executando a guiagem da ponta da barra para o canal.

Figura 10 - Exemplo de guias de entrada e saída secas



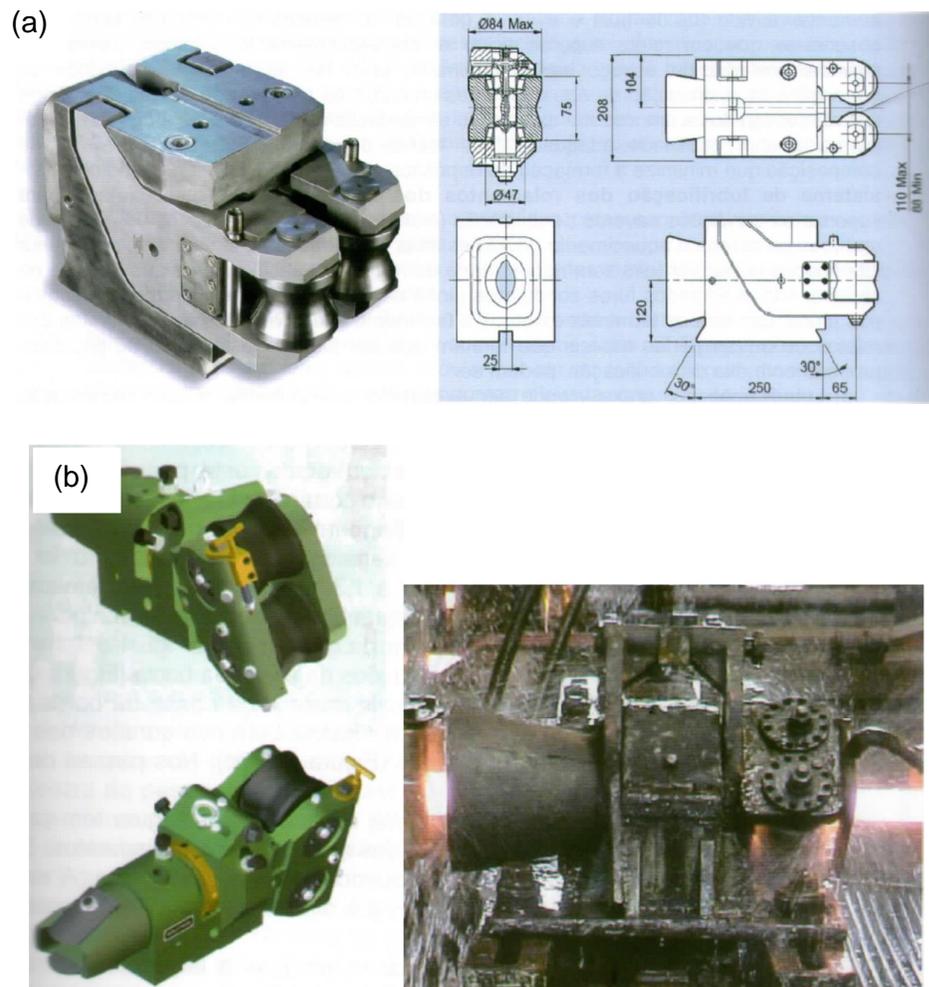
Fonte: Adaptado de (Rizzo, Processos de Laminação de Produtos Longos de Aço, 2010).

3.4.1. Guias Roletadas

As guias que utilizam roletes apresentam maior facilidade para obtenção de produtos de melhor qualidade, uma vez que permitem um maior controle sobre o seu desgaste e o posicionamento da guia, além de reduzir o atrito entre a guia e a superfície do material sendo laminado, pois o atrito passa a ser do tipo rolamento ao invés de atrito de deslizamento e os roletes apresentarem menor superfície de contato com o material do que as guias secas. A utilização de roletes reduz a possibilidade de ocorrerem riscos na superfície do esboço, além de reduzir o risco de ocorrência de sucata na linha, também permite operar com uma maior velocidade de laminação. (Rizzo, Processos de Laminação de Produtos Longos de Aço, 2010).

A figura 11 exemplifica algumas das principais guias roletadas de um laminador de aços longos, a figura (a) consiste em uma guia de entrada e a figura (b) consiste em uma guia de torção.

Figura 11 - Exemplos de guias roletadas



Fonte: (Rizzo, Processos de Laminação de Produtos Longos de Aço, 2010)

3.4.2. Roletes de Guias

Podem ser utilizados 2 a 6 roletes montados em uma guia, estes podem ser cilíndricos ou perfilados, com formato do perfil semelhante ao formato do passe. Os roletes são considerados as partes mais críticas da guia de entrada, pois recebem o impacto da entrada da cabeça da barra e mantêm por longo tempo o contato com o material a altas temperaturas. Os roletes devem ao mesmo tempo ter resistência a impactos, para não apresentar quebras ou trincas, bem como alta resistência ao desgaste, para ter a forma e tolerâncias dimensionais preservadas por uma determinada vida útil. São geralmente fabricados em aço ferramenta, temperados e revenidos para dureza de 50 – 60 HRC, também são utilizados roletes fabricados em

carboneto de tungstênio ou titânio sinterizado (Metal Duro), com dureza entre 65 e 69 HRC. (Rizzo, Processos de Laminação de Produtos Longos de Aço, 2010)

3.5. Aços Ferramenta

Aços ferramenta são ligas ferrosas de médio ou alto carbono com elevada quantidade de elementos de liga e são classificados de acordo com família, destinadas a diferentes aplicações.

As principais famílias dos aços ferramenta são:

- Aços ferramenta para trabalho a frio: utilizados em ferramentas de corte e conformação a frio, moldes cerâmicos, punções, etc.
- Aço Ferramenta Para Trabalho a Quente: utilizados em matrizes de forjamento, extrusão de metais não ferrosos, moldes de injeção de polímeros, etc.
- Aços Ferramenta para Moldes: utilizados em cavidades de moldes para injeção de polímeros, com propriedades de polimento e texturização.
- Aços Rápidos: utilizados em ferramentas de corte por remoção de cavaco. (Pinedo, 2010)

No estado recozido, a microestrutura consiste em uma matriz “mole” com carbonetos inseridos. Esses carbonetos podem ser de cromo, tungstênio, molibdênio ou vanádio, são caracterizados pela alta dureza e uma maior quantidade significa maior resistência ao desgaste. (Sartori, 2012)

3.5.1. Características dos Aços Ferramenta

- Dureza à temperatura ambiente – A dureza depende essencialmente do teor de carbono, a não ser nos aços com elevados teores de elementos de liga.
- Resistência ao Desgaste – A composição do aço, a susceptibilidade ao endurecimento por encruamento da superfície, a resistência mecânica do aço, são fatores que podem afetar esta propriedade. O carbono é o elemento de maior influência, bem como, uma relevante influência dos elementos de liga, devido a dureza e à distribuição dos carbonetos que se formam.

- Temperabilidade – Requisito indispensável, pois uma maior penetração de dureza garante perfeita uniformidade de características mecânicas em secções apreciáveis. A adição de elementos de ligas permite a utilização de meios mais brandos de têmpera.
- Tenacidade – Uma das maiores dificuldades ocorre em aliar elevada tenacidade e alta dureza. Os fatores que afetam a tenacidade do aço são: tensões internas produzidas por têmpera drástica, reaquecimento rápido nos aços temperados, retificação inadequada, provocando concentração de tensões, atuando como falhas internas.
- Resistência Mecânica – Os aços ferramenta devem apresentar a capacidade de suportar esforços estáticos sem o aparecimento de falhas ou de deformação permanente.
- Dureza a Quente – Característica altamente desejável para certos aços, utilizados em alta temperatura, estes aços mantêm alta dureza nestas condições. Os aços em que esta característica é fundamental são os aços rápidos e os aços de matrizes para trabalho a quente.
- Tamanho de Grão – Tamanho de grão pequeno ou granulação fina, geralmente é desejável. Para os aços ferramenta o tamanho de grão é determinado pela fratura, quando o material é quebra numa condição de dureza de aproximadamente 55 RC. O material deve ser suficientemente duro para romper intergranularmente. Se o aço apresentar-se em estado de baixa dureza, ele romperá transgranularmente.

A determinação do tamanho de grão pelo ensaio de fratura tem limitações, sobretudo nos aços de alto teor de liga, como nos aços rápidos, alto carbono e alto cromo, neles os carbonetos podem ser tão grosseiros que, quando o aço é quebrado para exame da fratura, esta seque os pontos de contato dos carbonetos com matriz, indicando um grão maior que o real.

- Usinabilidade – A usinabilidade é tanto menor quanto maior o teor em ligas, visto que se forma um apreciável número de carbonetos duros. (Chiaverini, Aços e Ferros Fundidos, 1988)

3.5.2. Composição Química

- Carbono – Elemento essencial, pois ele por intermédio dos carbonetos que se formam confere dureza e resistência ao desgaste;

- Silício – Adicionado como desoxidante, geralmente em teores baixos, é um elemento que dissolve na ferrita e tende a decompor os carbonetos;
- Manganês – Elemento desoxidante e dessulfurante (até 0,5%). Em teores mais elevados, melhora apreciavelmente a temperabilidade;
- Cromo – Adicionado principalmente para aumentar a temperabilidade. Aumenta a resistência ao desgaste;
- Vanádio – Desoxidante e controlador do tamanho de grão. Forma carbonetos estáveis e melhora a temperabilidade dos aços. Outro benefício do vanádio é a melhora da dureza a quente do aço.
- Tungstênio – Essencialmente formador de carbonetos, melhorando a dureza do aço à temperatura ambiente. A obtenção do característico de dureza a quente é mais efetiva com a adição de Mo, Co, V ou Cr, combinando-se dois, três ou mais destes.
- Cobalto – Aumenta a dureza a quente, diminui a temperabilidade.
- Molibdênio – Dissolve-se na ferrita e tende também a formar carbonetos, melhora a dureza a quente, resistência, ductilidade e melhora a temperabilidade. (Chiaverini, Aços e Ferros Fundidos, 1988)

Figura 12 - Efeito dos elementos de ligas nas propriedades dos aço

ELEMENTOS DE LIGA	PROPRIEDADES MECÂNICAS													PROP. MAGNÉTICAS						
	DUREZA	RESIST. A TRAÇÃO	LIMITE DE ESCOAMENTO	ALONGAMENTO	ESTRIÇÃO	RESIST. AO IMPACTO	ELASTICIDADE	RES. MEC. A QUENTE	TEMPERABILIDADE	FORMAÇÃO DE CARBONETOS	RESIST. AO DESGASTE	FORJABILIDADE	USINABILIDADE	OXIDAÇÃO SUPERFICIAL	NITREABILIDADE	RESIST. À CORROSÃO	HÍSTERESE	PERMEABILIDADE	COERCITIVIDADE	MAGNETISMO REMANESCENTE
Silício	↑	↑	↑	↓	-	↓	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓	-	↓	↑	↑	↓	↓
Mn em Aços Perlíticos	↑	↑	↑	-	-	-	↑	-	↑	↓	↓	↓	-	-	-	↓	↑	↑	↓	↓
Mn em Aços Austeníticos	↓	↑	↓	↑	↑	-	-	-	-	-	↓	↓	↓	↓	-	-	NÃO MAGNÉTICO			
Cromo	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↓	-	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Ni em Aços Perlíticos	↑	↑	↑	-	-	-	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	-	-	-	↑	↑	↑	↑
Ni em Aços Austeníticos	↓	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	-	-	↓	↓	↓	↓	↑	↑	NÃO MAGNÉTICO			
Alumínio	-	-	-	-	↓	↓	-	-	-	-	↓	-	↓	↓	↑	-	↑	↑	↑	↑
Tungstênio	↑	↑	↑	↓	↓	-	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↑	-	↑	↑	↑	↑
Vanádio	↑	↑	↑	-	-	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↑	-	↑	↑	↑	↑
Cobalto	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↓	-	-	-	-	↑	↑	↑	↑	↑
Molibdênio	↑	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↑	-	↑	↑	↑	↑
Cobre	↑	↑	↑	-	-	-	↑	-	-	-	↓	↓	-	-	↑	-	-	-	-	-
Enxofre	-	-	-	↓	↓	↓	-	-	-	-	↓	↓	↓	↓	-	↓	-	-	-	-
Fósforo	↑	↑	↑	↓	↓	↓	-	-	-	-	↓	↓	↓	-	-	-	-	-	-	-

↑ Aumenta ↓ Diminui ~ Constante Não característico ou desconhecido Diversas flechas = Efeito + Pronunciado

Fonte: (Aços Villares, 2008)

3.5.3. Tratamento Térmico

Trata-se da mais importante fase de fabricação, pois esta determinará a estrutura e propriedades finais para aplicações em condições extremas de serviço.

As faixas de temperaturas aplicadas nos tratamentos térmicos para aços ferramenta são bastante abrangentes, variando desde subzero até 1320°C. Estas temperaturas são necessárias para garantir a completa solução dos carbonetos complexos presentes.

O crescimento de grãos é uma problemática quando o tratamento térmico é praticado a valores elevados de temperaturas, para minimizar este problema aplica-se o aquecimento em duas etapas, a primeira consiste em um preaquecimento entre 700° e 870°C e após a aplicação da temperatura final. (Chiaverini, Aços e Ferros Fundidos, 1988)

Os tratamentos térmicos mais aplicados são a têmpera e revenimento, que propiciam dureza e propriedades mecânicas adequadas para a maioria das aplicações.

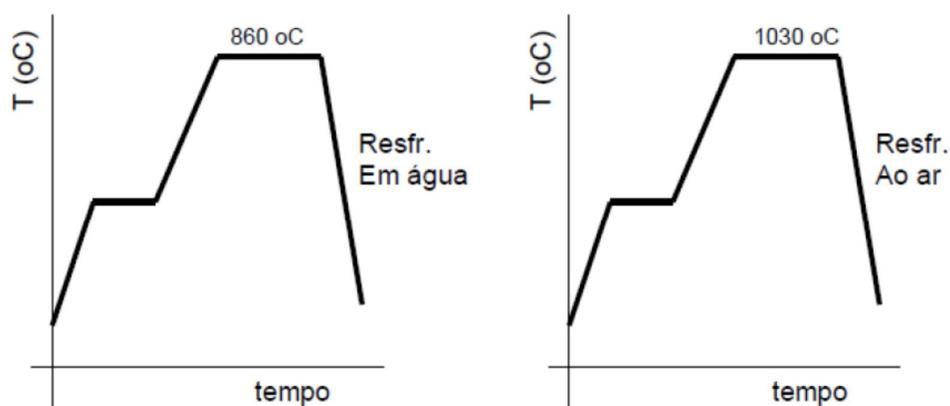
Uma série de fatores diferencia o tratamento térmico dos aços carbono ou baixa liga dos aços ferramenta:

1. Alta dependência das propriedades finais do material com o tratamento térmico aplicado;
2. Alto valor agregado das peças a serem tratadas;
3. Uma das etapas finais do processo;
4. Peças não são padronizadas nem serializadas, cada item fabricado possui características diferentes;
5. Estreita faixa de temperatura, tanto de austenitização quanto revenimento.

(Mesquita, Leiva, & Barbosa, 2005)

A figura 13 mostra as temperaturas utilizadas para alcançar a dureza (60HRC) necessária em um aço carbono e aço ferramenta em meios diferentes de resfriamento.

Figura 13 - Ciclos de Têmpera para aços carbono SAE 1060 e para Aço Ferramenta AISI D2



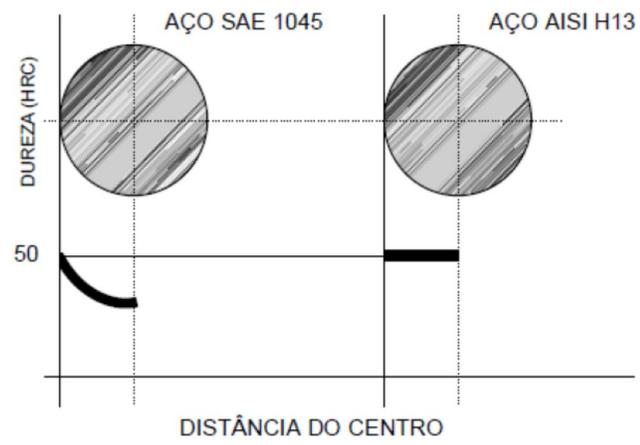
Fonte: (Sartori, 2012)

3.5.3.1. Temperabilidade

Temperabilidade é a capacidade do aço adquirir dureza por têmpera a uma determinada profundidade. (Sartori, 2012)

A Figura 14 representa esquematicamente o corte transversal em corpos de prova temperados. O aço ferramenta AISI H13, apesar do teor de carbono ser o mesmo em relação ao SAE 1045, possui diferença na temperabilidade.

Figura 14 - Variação de dureza da superfície ao núcleo de corpos de prova de diâmetro 100mm. Comparação entre o aço SAE 1045 temperado em óleo e o aço H13 temperado ao ar, ambos com 0,4% C.



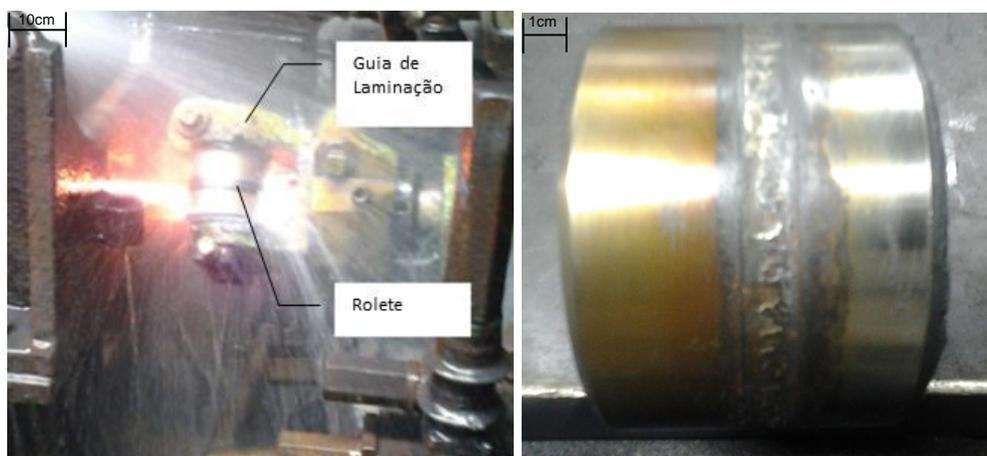
Fonte: (Sartori, 2012)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Considerações

O material utilizado neste estudo trata-se de roletes do processo de laminação a quente fabricados em aço ferramenta norma DIN X 155 CrVMo 12-1 e DIN X 190 WCrV 2-1, referida peça é aplicada em guias de torções aplicadas na fabricação de aços longos como vergalhões, barras e perfis mecânicos, fornecido por uma empresa siderúrgica de grande porte.

Figura 15 – À esquerda guia de laminação em operação e rolete após o uso à direita.



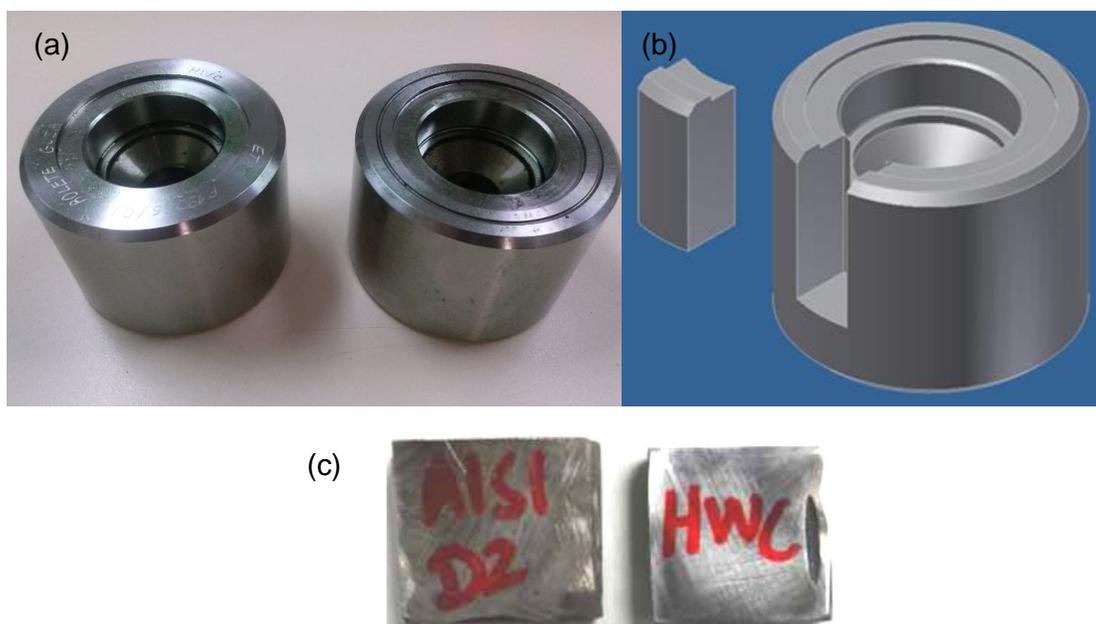
Fonte: Elaborado pelo autor

4.2. Materiais

4.2.1. Amostras

Foram utilizadas para este estudo, 2 roletes em aço ferramenta DIN X 155 CrVMo 12-1 e 2 roletes em aço ferramenta DIN X 190 WCrV 2-1, fornecidos com dimensões em altura 80 mm e diâmetro externo 90mm. Realizado seccionamento para obtenção de amostras com dimensões aproximadas de 20 mm de largura por 10 mm de espessura.

Figura 16 - (a) Roletes utilizados no estudo; (b) Ilustração do ponto seccionado; (c) Amostras cortadas prontas para a preparação



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.2. Especificação do Material

Na Tabela 3, as respectivas composições químicas em peso.

Tabela 3 - Principais Elementos Químicos

Especificação	C %	Si %	Cr %	Mo %	V %	W %	Dureza (HRC)
DIN X 155 CrVMo 12-1	1,50	0,30	12,0	0,95	0,9	-	55-58

Fonte: (Villares Metals, 2006)

Tabela 4 - Principais elementos químicos especificados no HWC

Especificação	C %	Si %	Cr %	Mo %	V %	W %	Dureza (HRC)
DIN X 190 WCrV 2-1	1,90	-	20,0	-	1,0	1,50	58-64

Fonte: (ETAGE, 2012)

4.2.3. Preparação das Amostras

Estas amostras foram processadas para preparação da superfície, a fim de viabilizar a utilização dos procedimentos. Etapas de preparação da superfície das amostras:

1. Lixamento – Foram utilizados em sequência lixas com granulação de 120, 220, 400, 600, 1200;
2. Polimento – Para o polimento foram utilizados panos de 3 e 1 μm ;
3. Ataque – Para este trabalho foi utilizado o reagente Nital a 2%.

Figura 17 - Politriz e lixadeira Arotec



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.5. Análise Química

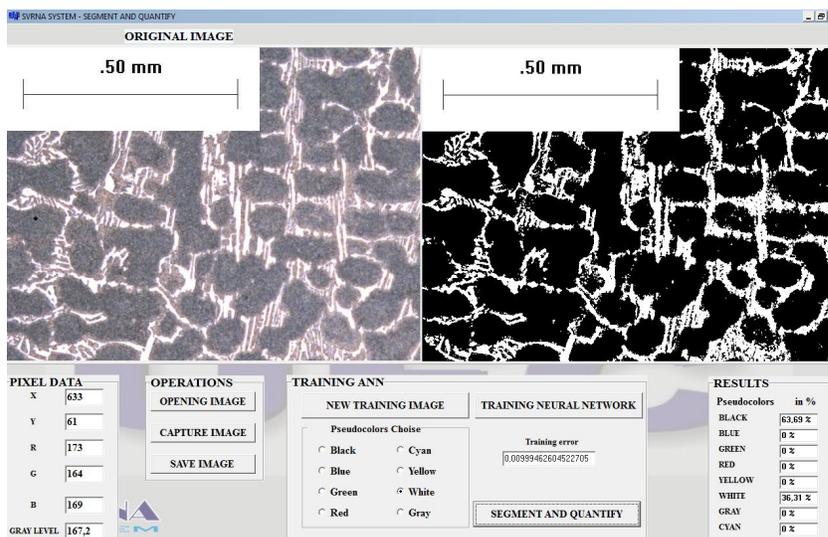
Análises químicas dos aços foram realizadas com o objetivo de estudar a presença de outros elementos que possam influenciar nos resultados.

4.6. Análise Metalográfica

Foi realizada microscopia ótica para a caracterização microestrutural dos materiais em análise. A quantificação foi realizada com o auxílio do software SVRNA.

O equipamento utilizado foi o Microscópio Ótico Olympus BX60MF5 com aumento de 50 a 500 x.

Figura 18 - Tela do Software SVRNA



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 19 - Microscópio Ótico Olympus BX60MF5



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.3. Análise de Dureza

Para obtenção dos resultados de dureza, foram realizados os ensaios nas duas amostras, com espaçamento entre penetrações de 0,25mm, carga de 19,61 N (HV2) e tempo de penetração 10 segundos. Foram retiradas em média 30

impressões por amostra (da extremidade ao centro). Devido à homogeneidade do material, não foram evidenciadas variações significativas desta medição. O equipamento utilizado foi o microdurômetro SHIMADZU HMV-2. O ensaio foi realizado segundo a norma ASTM E384-72.

Figura 20 - Microdurômetro SHIMADZU HMV-2 utilizado no ensaio de microdureza Vickers



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.4. Análise de Tenacidade

Para análise da Tenacidade dos materiais, foram utilizadas 2 amostras de cada material. O ensaio realizado foi o de impacto tipo Charpy, no laboratório de Ensaio Mecânicos da Universidade Federal do Ceará. Os procedimentos estão em conformidade com a norma ASTM E23.

Figura 21 - Equipamento utilizado para o ensaio de impacto



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 22 - Amostras padronizada para realização do ensaio



Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.7. Análise de Desgaste

Nesta análise os roletes foram submetidos às condições reais de trabalho, sendo utilizados em guias de torção, onde foram acompanhadas a produção em cada par de roletes em campanhas alternadas, totalizando 20 medições, dos quais 10 para o produção de 280 toneladas laminadas e 10 para 560 toneladas. A tabela 5 mostra a sequência por campanha, incluindo a relação de diâmetros dos roletes.

Para medição do desgaste após a produção foi utilizado o relógio comparador Mitutoyo Absolute com resolução de 0,001, Medidos na região de desgaste de cada rolete.

Figura 23 - Relógio comparador utilizado na medição de desgaste dos roletes



Fonte: Elaborado pelo autor

Para observação no processo de laminação, foram utilizadas 20 campanhas de produção, no qual 10 amostras para cada material e para o rolete DIN X 190 WCrV 2-1, 4 campanhas com 280 toneladas de produção e 6 campanhas com 560 toneladas. Para o rolete DIN X 155 CrVMo 12-1 foram 6 campanhas com 280 toneladas e 4 com 560 toneladas, ver Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros para acompanhamento do desgaste dos roletes

CAMPANHA	PRODUÇÃO(t)
1	280
2	280
3	280
4	280
5	280
6	280
7	280
8	280
9	280
10	280
11	560
12	560
13	560
14	560
15	560
16	560
17	560
18	560
19	560
20	560

 DIN X 190 WCrV 2-1
 DIN X 155 CrVMo 12-1

Fonte: Elaborado pelo Autor

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análise Química

Na tabela 6, a composição química em peso, das amostras analisadas. Foram encontrados valores compatíveis com a especificação e para os alguns dos elementos encontrados, diferenças consideráveis entre os materiais, detalhadas na Tabela 7 e Figura 24.

S, Cr, Mo e Nb apresentam grandes variações e o W está presente apenas no aço DIN X 190 WCrV 2-1.

Tabela 6 - Comparativo da composição química entre os materiais

Análise	% wt													
	C	Mn	Si	S	P	Cu	Cr	Ni	Mo	Sn	Nb	V	W	N
DIN X 155 CrVMo 12-1	1,63	0,31	0,28	0,001	0,022	0,047	10,507	0,263	0,689	0,005	0,01	0,6	-	0,0256
DIN X 190 WCrV 2-1	2,01	0,42	0,40	0,009	0,019	0,034	20,054	0,175	0,029	0,007	0,02	0,8	1,6	0,0389
Especificação														
DIN X 155 CrVMo 12-1	1,50	-	0,30	-	-	-	12,0	-	0,95	-	-	0,9	-	-
DIN X 190 WCrV 2-1	1,90	-	-	-	-	-	20,0	-	-	-	-	1,0	1,5	-

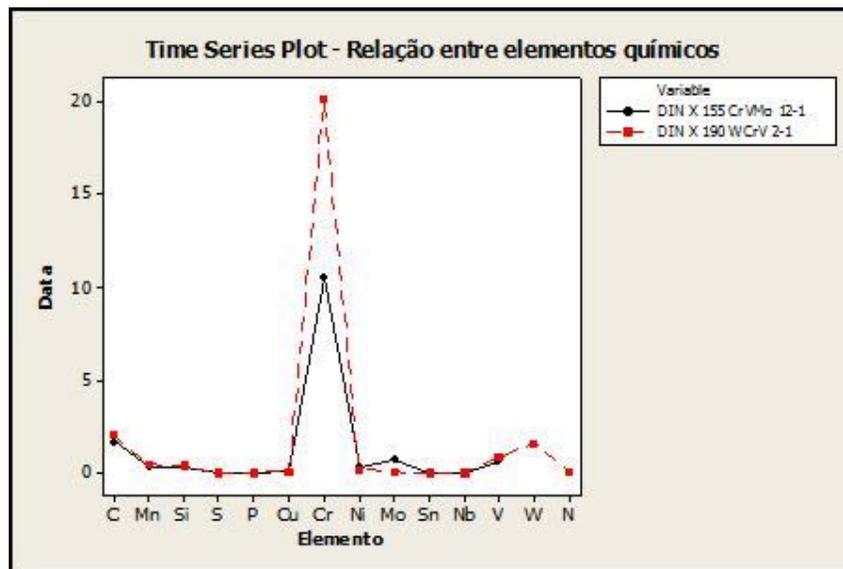
Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 7 - Diferenças percentuais entre as composições encontradas

Elemento %wt	Material		Diferença %
	DIN X 155 CrVMo 12-1	DIN X 190 WCrV 2-1	
C	1,63	2,01	19%
Mn	0,31	0,42	28%
Si	0,28	0,40	29%
S	0,001	0,009	1125%
P	0,022	0,019	16%
Cu	0,047	0,034	27%
Cr	10,507	20,054	91%
Ni	0,263	0,175	33%
Mo	0,689	0,029	2395%
Sn	0,005	0,007	26%
Nb	0,007	0,015	116%
V	0,6	0,8	28%
W	-	1,6	-
N	0,0256	0,0389	34%

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 24 - Diferenças encontradas entre os elementos químicos



Fonte: Elaborado pelo Autor

A influência da composição química no comportamento mecânico e resistência ao desgaste do aço DIN X 190 WCrV 2-1 em relação ao DIN X 155 Cr VMo 12-1:

Cromo – O Cr com 191% aumentará a resistência ao desgaste e temperabilidade do aço.

Enxofre – Com 1125%, o enxofre é adicionado para melhorar a usinabilidade.

Molibdênio – Com apenas 4% se comparado ao DIN X 190 WCrV 2-1, o Molibdênio combina-se com outros elementos para melhoria das propriedades mecânicas.

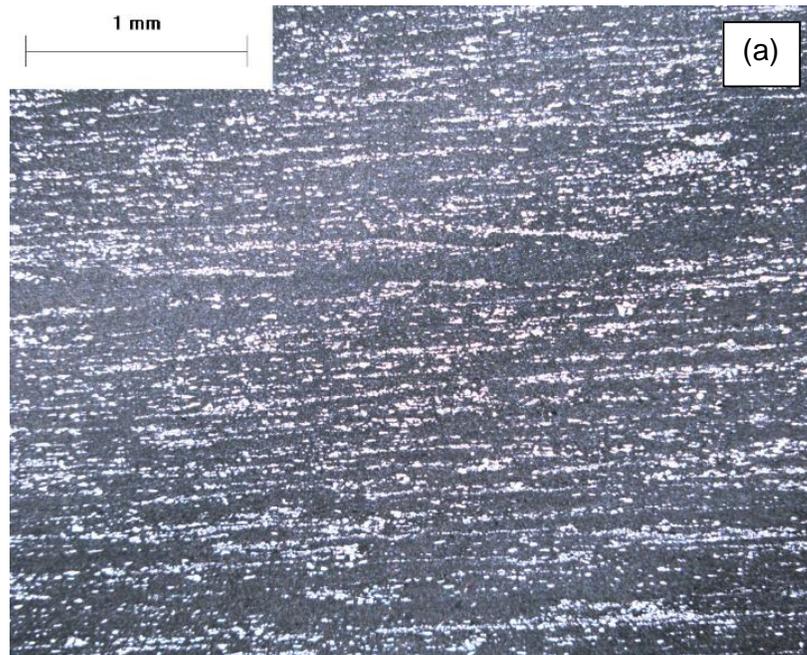
Nióbio – O dobro adicionado, o Nb promove o aumento da resistência mecânica. Confere resistência ao aumento de grão a altas temperaturas.

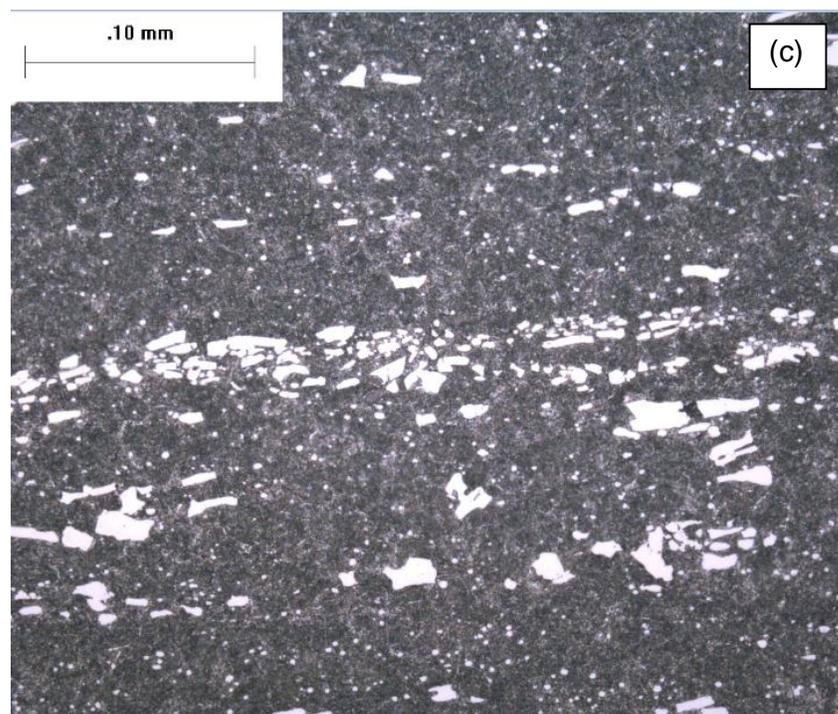
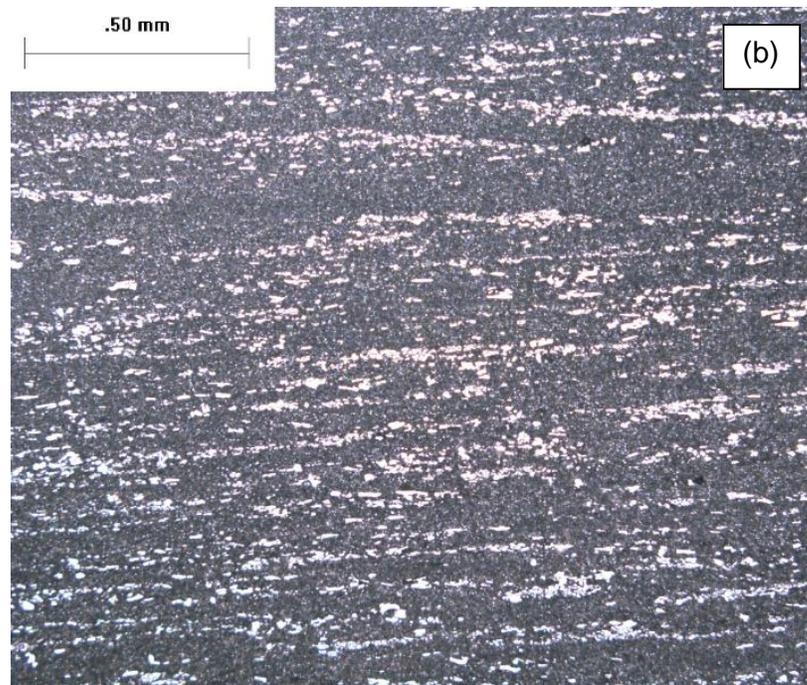
Tungstênio – Está presente apenas no DIN X 155 Cr VMo 12-1. Promove a formação de partículas duras e resistentes ao desgaste. Combinando-se com Mo, V e Cr, produz uma efetiva dureza e resistência a altas temperaturas.

5.2. Análise Metalográfica

Nas Figuras 25a, 25b e 25c as microestruturas do aço DIN X 155 Cr VMo 12-1 obtidas pelo microscópio ótico com aumentos de 50, 100 e 500x. Observamos uma matriz de coloração escura formada por perlita e grãos de coloração clara composto por carbonetos precipitados.

Figura 25 - Micrografias do aço DIN X 155 CrVMo 12-1 com aumentos de 50, 100 e 500x. Ataque nital 2%

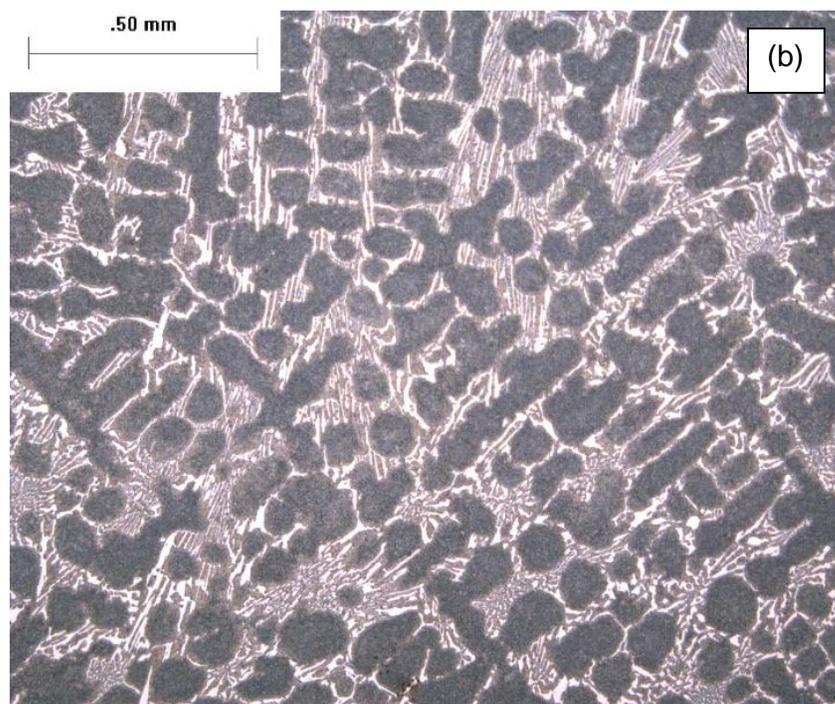
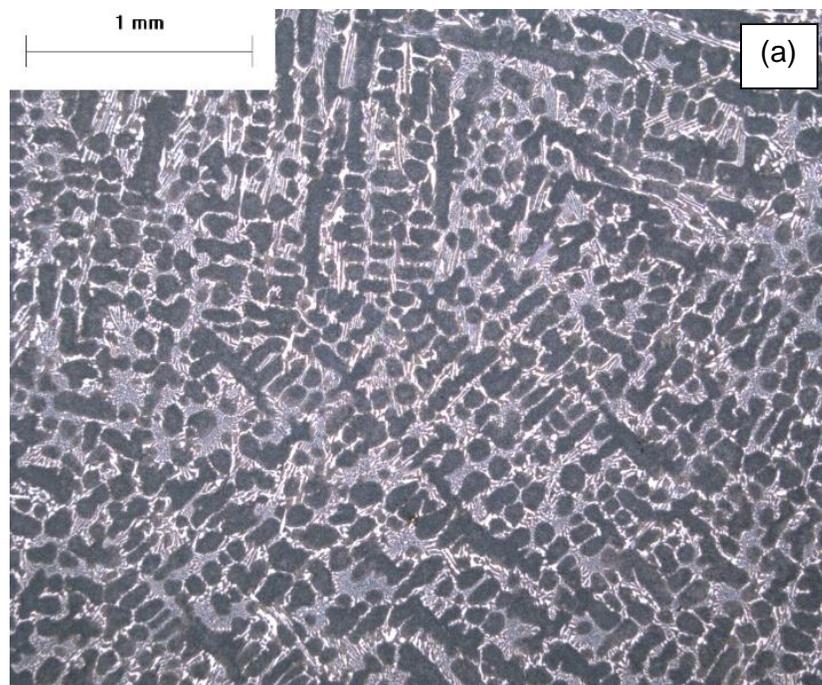


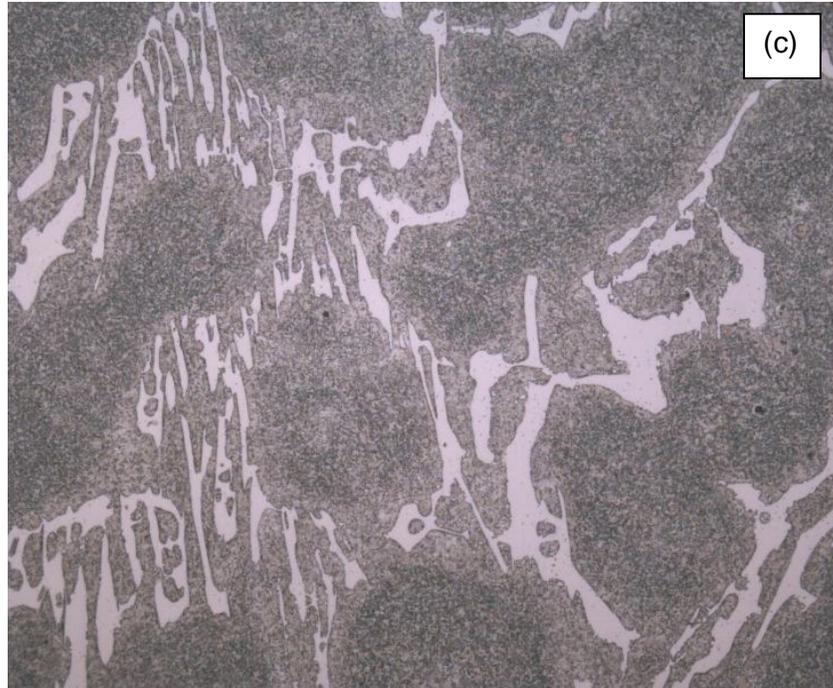


Fonte: Elaborado pelo Autor

Nas Figuras 26a, 26b e 26c as microestruturas do aço DIN X 190 WCrV 2-1 obtidas pelo microscópio óptico com aumentos de 50, 100 e 500x. Observamos uma matriz de coloração escura circular formada por perlita e grãos de coloração clara composto por carbonetos precipitados.

Figura 26 - Micrografias do aço DIN X 190 WCrV 2-1 com aumentos de 50, 100 e 500x. Ataque nital 2%



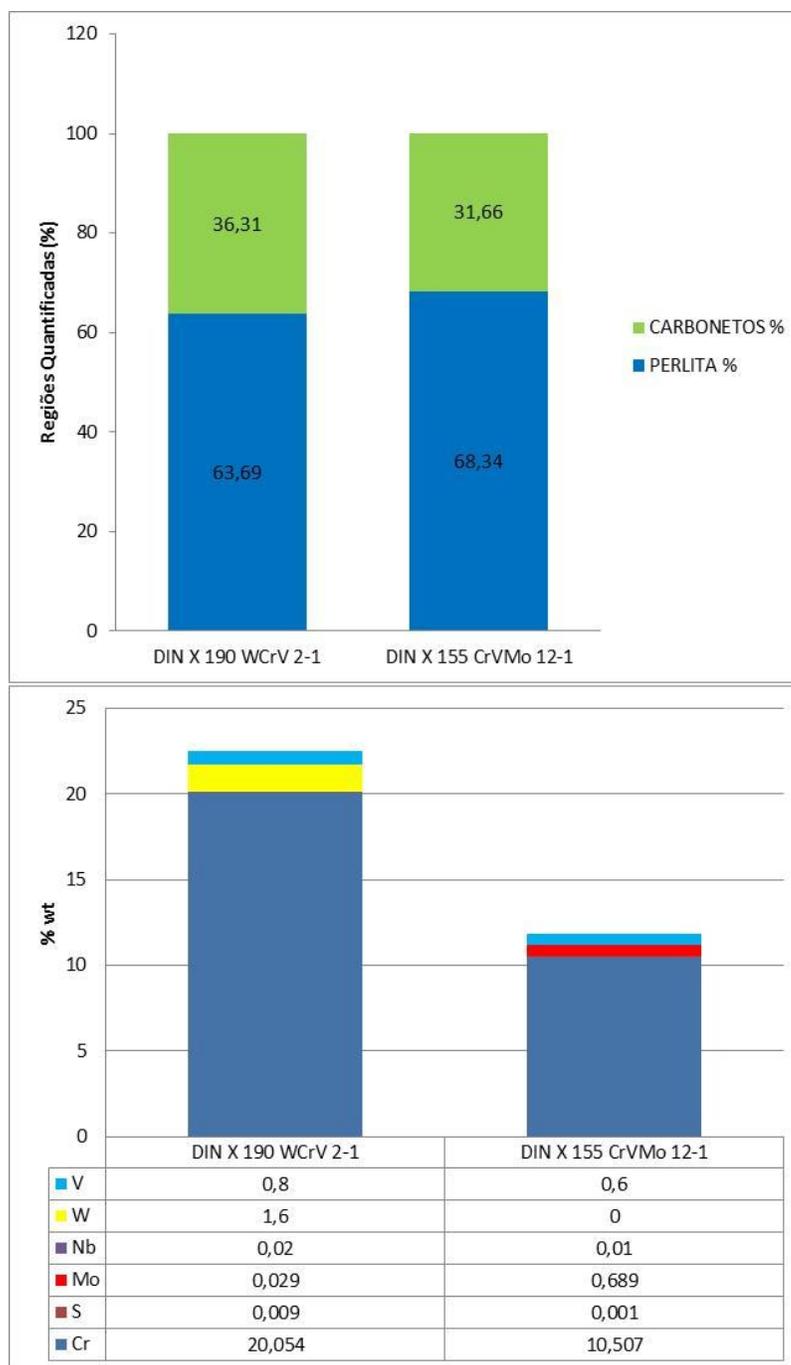


Fonte: Elaborado pelo autor

5.2.1. Quantificação das Fases

Na Figura 27 os valores da quantificação de constituinte e fases gerados pelo software SVRNA. Como esperado, o % carbonetos formados no aço DIN X 190 WCrV 2-1 é 13% maior devido às quantidades presentes de Cr e W.

Figura 27 - Quantificação das fases e constituintes dos materiais DIN X 190 WCrV 2-1 e DIN X 155 CrVMo 12-1



Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.3. Análise de Dureza

A Figura 28 apresenta os resultados dos ensaios de microdureza Vickers realizados nas duas amostras, tanto na estrutura matriz quanto nos precipitados identificados na microscopia. O precipitado apresentou dureza 24% superior à matriz perlítica do material DIN X 190 WCrV 2-1 e 19% no DIN X 155 CrVMo 12-1. Uma maior concentração de Cromo e a presença do Tungstênio no aço DIN X 190 WCrV 2-1, contribuem para a formação de carbonetos com maior dureza.

Figura 28 - Perfis de microdureza Vickers

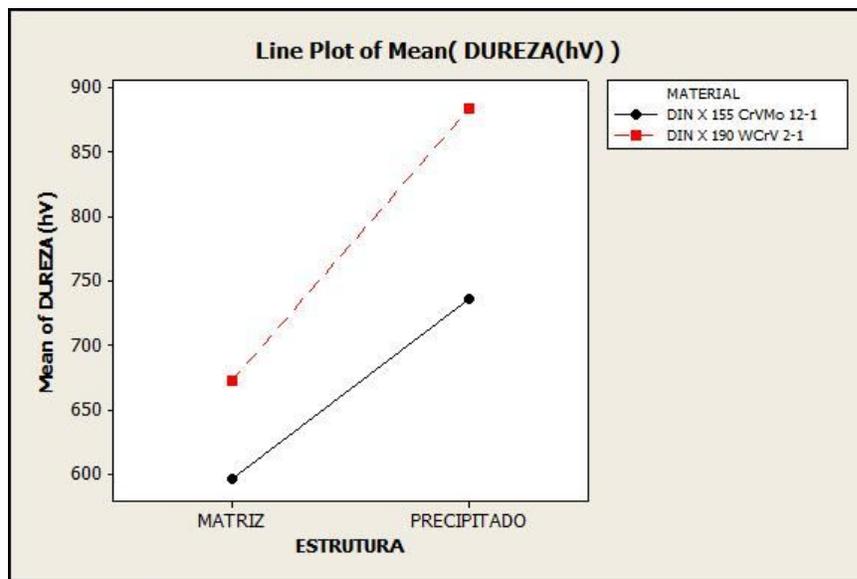
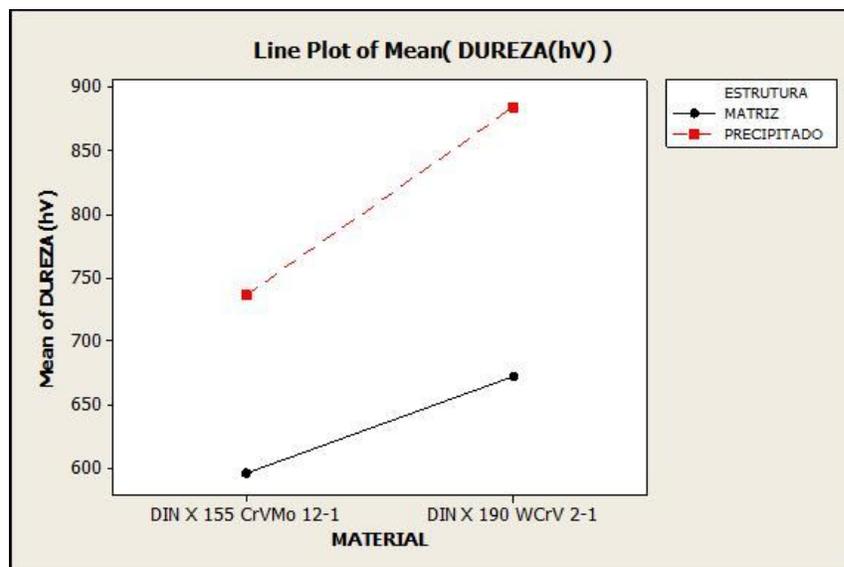


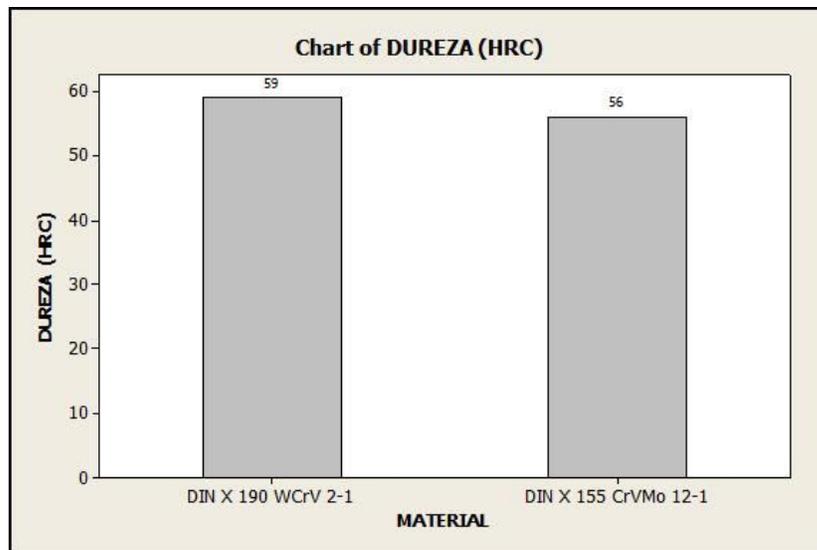
Figura 29 - Perfis de microdureza Vickers na Matriz e Precipitado



Fonte: Elaborado pelo Autor

Na figura 30 temos os resultados de dureza convencional na escala Rockwell C (HRC) , o material DIN X 190 WCrV 2-1 apresentou dureza 5% maior em relação ao DIN X 155 CrVMo 12-1.

Figura 30 - Análise de dureza HRC



Fonte: Elaborado pelo Autor

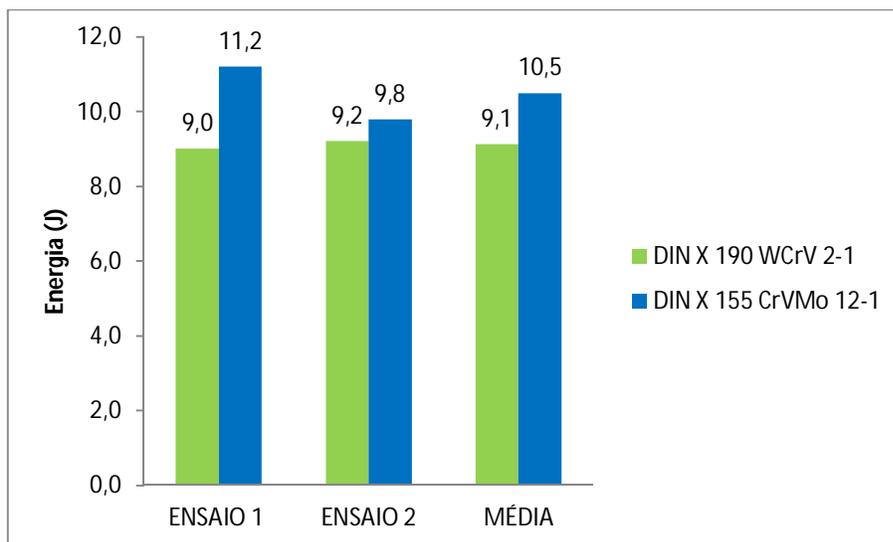
5.4. Análise de Tenacidade

A figura 31 mostra os resultados, evidenciando pequenas diferenças de tenacidade de um material para outro. Esta informação é importante para avaliarmos o comportamento do rolete em diferentes condições de trabalho, pois os esforços aplicados variam conforme o tipo de guia, posição no laminador e calibração.

O material DIN X 190 WCrV 2-1 apresentou uma resistência média 13% menor se comparado ao DIN X 155 CrVMo 12-1.

Na prática, esta diferença é irrelevante, pois observamos que no processo o desempenho de ambos os materiais apresentaram-se semelhantes e sem a ocorrência de trincas ou fraturas, mesmo em situações com maiores exigências, como no caso de laminar alguma barra com temperatura abaixo da média, dimensional do passe no limite do especificado para a guia ou até mesmo falhas no sistema de refrigeração dos roletes.

Figura 31 - Resultado de Resistência ao Impacto das amostras.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

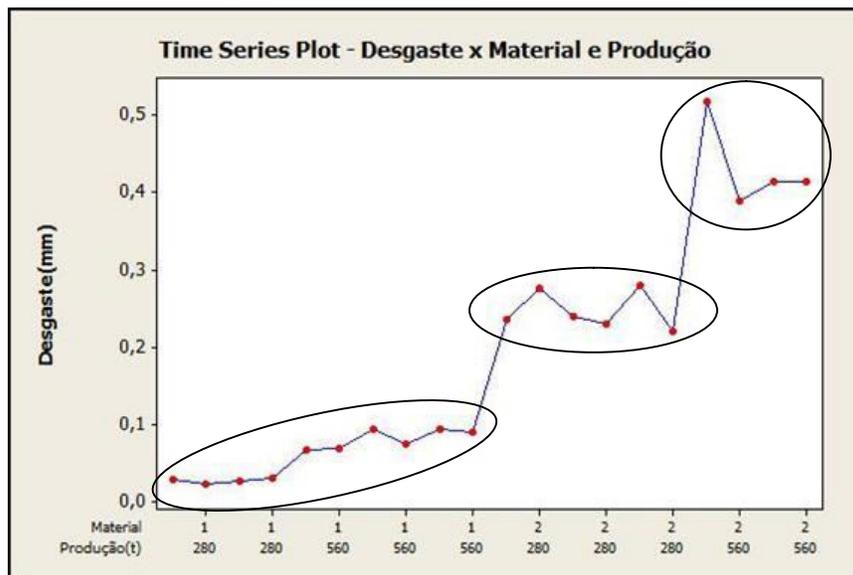
5.5. Análise de Desgaste

Na figura 32 e na tabela 8, observamos o nível de desgaste obtido com o rolete DIN X 190 WCrV 2-1, denominado por material 1 e o rolete DIN X 155 CrVMo 12-1 como material 2.

As medidas de desgaste obtidas nos roletes DIN X 155 CrVMo 12-1 são em média 43% maior na produção de 560 toneladas em comparação à produção de 280 toneladas. Já nos roletes DIN X 190 WCrV 2-1 a diferença é de 33%, indicando uma maior estabilidade do desgaste em relação às variações de produção.

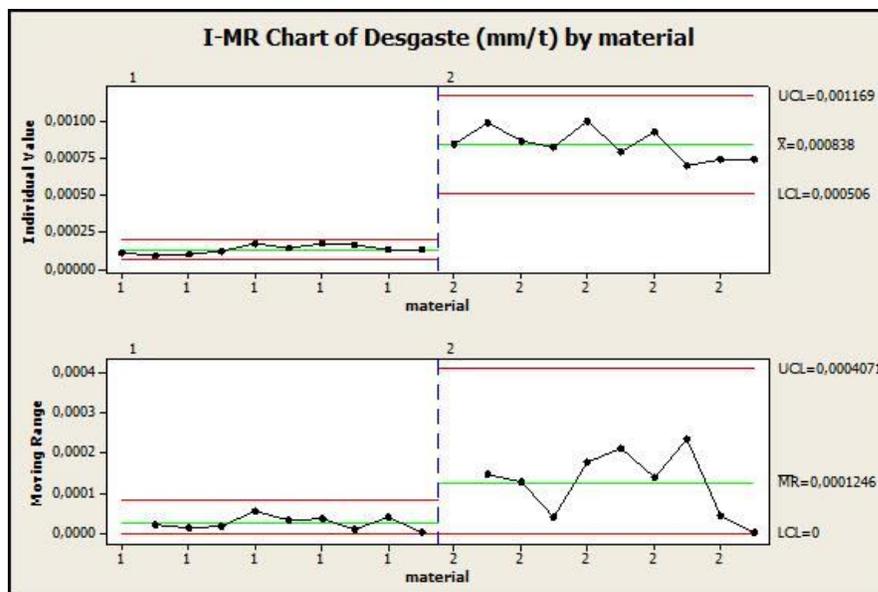
O desempenho mais detalhado está apresentado na figura 33, no qual o material 1 apresenta uma maior estabilidade no desgaste medido (mm/t) em cada campanha. A média móvel(moving range) apresenta maiores variações no material 2, isto significa que há uma maior oscilação de uma campanha para outra. Uma provável causa é devido ao fato da maior homogeneidade na distribuição de carbonetos do aço DIN X 190 WCrV 2-1, demonstrado nas micrografias.

Figura 32- Comparativo de resistência ao desgaste



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 33 - Desempenho entre materiais - Material 1 - DIN X 190 WCrV 2-1; Material 2 - DIN X 155 CrVMo 12-1



Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 8 - Desgaste observado por campanha e produção

CAMPANHA	PRODUÇÃO (toneladas)	DESGASTE (mm)	
1	280	0,028	 DIN X 190 WCrV 2-1  DIN X 155 CrVMo 12-1
2	280	0,022	
3	280	0,026	
4	280	0,031	
5	280	0,235	
6	280	0,276	
7	280	0,240	
8	280	0,229	
9	280	0,279	
10	280	0,220	
11	560	0,518	
12	560	0,388	
13	560	0,067	
14	560	0,069	
15	560	0,413	
16	560	0,414	
17	560	0,093	
18	560	0,074	
19	560	0,094	
20	560	0,089	

Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.6 Custo-benefício

Os resultados da tabela 9 demonstram cálculos simples para obtenção dos valores de custo-benefício na aplicação do rolete DIN X 190 WCrV 2-1, este material teve uma resistência ao desgaste 4,7 vezes maior que o rolete DIN X 155 CrVMo 12-1, isto impacta muito na redução dos custos operacionais desta aplicação.

Neste caso, houve uma redução no consumo de 90 para 19 peças/ano o que gera uma economia de R\$ 80.110,38.

Outros cálculos de ganhos não estão descritos, como custo com reusinagens, redução de tempo de paradas operacionais devido a maiores quantidades de trocas e redução de risco de acidentes com menores intervenções no equipamento.

Tabela 9 - Análise de custo benefício para o rolete DIN X 190 WCrV 2-1

	DESGASTE MÉDIO (mm) (560t)	DESGASTE MÉDIO (mm) (280t)	CUSTO R\$/kg	Custo (R\$)
DIN X 190 WCrV 2-1	0,08100	0,02675	345,50	1001,95
DIN X 155 CrVMo 12-1	0,43325	0,24650	182,67	529,743

RESISTÊNCIA AO DESGASTE (%)	535	921
-----------------------------	-----	-----

	DIN X 155 CrVMo 12-1	DIN X 190 WCrV 2-1
CONSUMO ANUAL DE ROLETES	90	17,0
CUSTO ANUAL (R\$)	90.175,50	9.005,63
REDUÇÃO EM CUSTO	R\$	81.169,87

Fonte: Elaborado pelo Autor.

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos de forma experimental analisados com base nos materiais DIN X 155 CrVMo 12-1 e DIN X 190 WCrV 2-1 permite-nos concluir que:

Na composição química, evidenciamos que o material DIN X 190 WCrV 2-1 possui W, grandes quantidades de Cr e Nb e em menor quantidade Mo, estes elementos combinados proporcionam uma estrutura com boa resistência ao desgaste a altas temperaturas. Outro elemento presente em quantidades significativas é o S, que promoverá uma melhora na usinabilidade deste material. A presença do tungstênio aumentou significativamente a dureza, com a formação de partículas duras e resistentes ao desgaste.

Foi observado na análise metalográfica que ambos os materiais possuem carbonetos precipitados e que no material DIN X 190 WCrV 2-1 estes carbonetos estão distribuídos de forma mais homogênea, proporcionando um perfil de dureza e consequentemente, resistência ao desgaste mais uniforme em diferentes diâmetros.

Na resistência ao impacto, avaliada através do ensaio tipo CHARPY, os materiais comportaram-se de forma muito semelhante, evidenciando a possibilidade de aplicações similares ao rolete fabricado em DIN X 190 WCrV 2-1.

Em relação ao custo benefício, o rolete DIN X 190 WCrV 2-1 possui um valor por kg quase duas vezes maior, porém os resultados operacionais, aplicando-se as mesmas condições para o DIN X 155 CrVMo 12-1, superam em muito a questão preço/peça.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aços Villares. (2008). *Aços Especiais para Construção Mecânica*. São Paulo: Villares.

Chiaverini, V. (1988). *Aços e Ferros Fundidos*. São Paulo: ABM.

Chiaverini, V. (2003). *Tratamentos Térmicos das Ligas Metálicas*. São Paulo: ABM.

ETAGE. (21 de junho de 2012). Ficha Técnica do Material HWC. Santo André, São Paulo, Brasil.

Mesquita, R. A., Leiva, D. R., & Barbosa, C. A. (27 de Janeiro de 2005). *EFEITO DAS CONDIÇÕES DE TRATAMENTO TÉRMICO NA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇOS FERRAMENTA*. Acesso em 25 de Março de 2014, disponível em <http://www.villaresmetals.com.br>: http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/Falhas_Trat_Termico.pdf

Mourão, M. B. (2007). *Introdução à Siderurgia*. São Paulo: ABM.

Pinedo, C. E. (setembro de 2010). *Tratamentos Térmicos dos Aços Ferramenta – Um Ensaio*. Acesso em 19 de março de 2014, disponível em <http://www.heattech.com.br/>: <http://www.heattech.com.br/boletins/Boletim-T%C3%A9cnico-09-2010.pdf>

Rizzo, E. M. (2007). *Processos de Laminação dos Aços: Uma Introdução*. São Paulo: ABM.

Rizzo, E. M. (2010). *Processos de Laminação de Produtos Longos de Aço*. São Paulo: ABM.

Sartori, C. H. (19 de Janeiro de 2012). *TRATAMENTOS TÉRMICOS DE AÇOS FERRAMENTA*. Acesso em 26 de Março de 2014, disponível em <http://www.itarai.com.br/>: <http://www.itarai.com.br/catalogos.html>

Villares Metals. (6 de abril de 2006). *Aços para Trabalho a Frio VD2*. São Paulo, SP, Brasil.

Villares Metals. (6 de abril de 2006). *Aços para Trabalho a Frio VD2*. São Paulo, SP, Brasil.

Villares Metals. (s.d.). Aços para Trabalho a Frio.

Wusatowski, Z. (1969). *Fundamentals of Rolling*. Gliwice: Pergamon Press.