

HIGOR MATHEUS DE FREITAS LIMA

**Análise comparativa de ferramentas tipo macho para o processo de rosqueamento
interno de cilindros laminadores fundidos**

Higor Matheus de Freitas Lima

**Análise comparativa de ferramentas tipo macho para o processo de rosqueamento
interno de cilindros laminadores fundidos**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

L732a	Lima, Higor Matheus de Freitas Análise comparativa de ferramentas tipo macho para o processo de rosqueamento interno de cilindros laminadores fundidos. / Higor Matheus de Freitas Lima– Guaratinguetá, 2018. 71 f : il. Bibliografia: f. 62-63 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018. Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro 1. Roscas (Mecânica) 2. Aço 3. Ferro fundido I. Título
-------	--


CDU 621.88.082

Ana Cristina Figueiredo Loureiro
Bibliotecária CRB 8/7094

HIGOR MATHEUS DE FREITAS LIMA

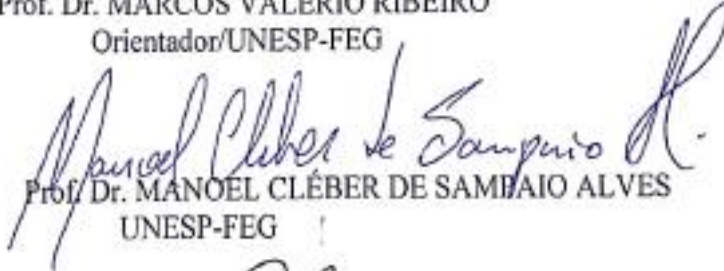
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES
UNESP-FEG


MSc. MARCELO ANTUNES DE PAULA
UNESP-FEG

DADOS CURRICULARES

HIGOR MATHEUS DE FREITAS LIMA

NASCIMENTO	26.01.1988 – São Paulo / SP
FILIAÇÃO	Wilson Matheus de Lima Filho Eleide de Freitas Lima
2004/2005	Aprendizagem Industrial em Mecânica de Usinagem Escola SENAI Roberto Simonsen - São Paulo/SP
2006/2007	Curso de Formação de Sargentos – Aviação Manutenção Centro de Instrução de Aviação do Exército – Taubaté/SP
2010/2018	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

dedico este trabalho

aos meus amigos, toda minha família e
de modo especial ao meu pai, que
assiste a todas minhas vitórias lá do céu.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, que me propiciou tudo que tenho. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro*, que tornou possível este incrível projeto no qual trabalhamos juntos. Agradeço também a amizade que cultivamos nesse tempo em que nos relacionamos,

aos meus pais *Wilson e Eleide*, que me trouxeram ao mundo e me deram muito amor. Especialmente a minha mãe que desde muito cedo desempenhou o papel de pai e mãe e nunca deixou a desejar. Sempre trabalhando muito para que eu pudesse ter uma vida e estudo melhores. Esse trabalho é pra você minha mãe! A senhora é uma guerreira e eu te amo muito,

à minha esposa *Maja Freitas Fuz* que apareceu em minha vida no momento certo e me deu todo suporte para que eu conseguisse concluir este curso. Eu te amo,

aos meus irmãos da República APAE que compartilharam comigo muitos dos melhores momentos da minha vida nesses últimos nove anos. Por favor, não deixem essa família morrer,

aos demais amigos da FEG que me ensinaram o que significa ser fegueano. Só quem passou por aqui sabe realmente o que isso significa,

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, desde os professores até os funcionários da limpeza. Todos vocês foram muito importantes para minha graduação. Obrigado pela dedicação.

“Não importa o quão forte você bate, mas sim quão forte você aguenta apanhar e continuar. O quanto pode suportar e seguir em frente. É assim que a vitória é construída”

Rocky Balboa

RESUMO

O presente trabalho tem como foco a melhoria do processo de rosqueamento executado nos cilindros laminadores, fabricados em aço e ferro fundido, através da análise do processo atual desenvolvido na planta de uma companhia siderúrgica e dos estudos e ensaios de novas ferramentas do tipo macho. Devido à grande variedade de composições químicas e propriedades mecânicas dos cilindros metálicos produzidos pela fábrica, decidiu-se definir três grupos de ligas para os cilindros a fim de facilitar o estudo e simplificar as soluções propostas para a linha de produção. Diversas empresas fornecedoras foram acionadas e algumas ferramentas foram disponibilizadas para testes. Sendo a produção vinte e quatro horas por dia, os testes ocorreram nos próprios cilindros da produção. Análises e comparações dos resultados foram feitas resultando na escolha de uma ferramenta de roscar para cada grupo de ligas. Todos os novos machos superaram os parâmetros, vida, e tempo de preparação das ferramentas utilizadas anteriormente.

PALAVRAS-CHAVE: Rosca. Macho. Aço. Ferro fundido. Otimização.

ABSTRACT

This thesis focuses on the improvement of the tapping process performed on the rolling cylinders, made of steel and cast iron, through the analysis of the current process, developed in a steelworks company plant, studies and tests of new tap type tools. Due to the wide variety of chemical compositions and mechanical properties of the metal cylinders produced by the factory, it was decided to define three groups of alloys for the cylinders in order to facilitate the study and simplification of the proposed solutions for the production line. Several supplier companies were contacted and some tools were made available for testing. Being the production twenty-four hours a day, the tests took place in the production cylinders. Analyzes and comparisons of the results were made resulting in the selection of a threading tool for each group of alloys. All of the new taps had better parameters, lifetime and preparation than the previous ones.

KEYWORDS: Thread. Tapping. Steel. Cast iron. Optimization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipos de laminadores	18
Figura 2 – Deformação plástica de metais.....	19
Figura 3 – Partes de um cilindro de laminação	21
Figura 4 – Representação gráfica de uma cadeira laminadora	22
Figura 5 – Desenho esquemático da laminação de tiras em um laminador contínuo de quatro cadeiras	22
Figura 6 – Rosqueamento interno.....	30
Figura 7 – Rosqueamento externo	31
Figura 8 – Visão geral da aplicação de rosqueamento com macho.....	32
Figura 9 – Operação do macho manual	33
Figura 10 – Ordenação de machos manuais	33
Figura 11 – Exemplos de diferentes geometrias de macho máquina	34
Figura 12 – Terminologia dos machos	35
Figura 13 – Relação entre Resistência a quente X Resistência a fratura, para os materiais de corte usuais	38
Figura 14 – Relação dureza x tenacidade para os materiais de corte usuais	39
Quadro 1 – A classificação normativa, conforme ISO 513, do metal duro utilizado em ferramentas de corte.....	40
Figura 15 – Revestimentos de metal duro	41
Figura 16 – Fotografia de um revestimento múltiplo de metal duro obtida por MEV ..	41
Figura 17 – Mandriladora horizontal TPX6111b/3	44
Figura 18 – Variação de dureza em função da distância da superfície para cilindros Villares Rolls fabricados por fundição estática ou fundição centrifugada.....	46
Quadro 2 – Composição química nominal (% em peso; balanço em Fe) dos cilindros Villares Rolls para aplicação em laminadores de produtos longos.....	47
Figura 19 – Representação esquemática da característica de comportamento ao desgaste para os diversos grupos de materiais	48
Quadro 3 – Composição química nominal (% em peso; balanço em Fe) dos cilindros de trabalho Villares Rolls para a laminação de tiras a quente.....	48
Figura 20 – Representação esquemática da característica de comportamento ao desgaste para os diversos grupos de materiais	49

Figura 21 – Vista lateral de um cilindro laminador com duas roscas M24 em sua face	49
Fotografia 1 – Cabeçote de rosquear com macho de canal helicoidal.....	50
Fotografia 2 – Macho modificado com os canais esmerilhados.....	51
Fotografia 3 – Mandriladora horizontal SHW realizando operação de furação.....	52
Fotografia 4 – Ficha de acompanhamento de teste de macho	54
Fotografia 5 – Macho padrão OSG HSS SFT	55
Figura 22 – Testes dos machos.....	56
Fotografia 6 – Macho Sandvik HSS E – AlCrN.....	57
Figura 23 – Desempenho dos machos para o Grupo 1 - Clxx.....	57
Fotografia 7 – Macho Sandvik HSS E - M.....	58
Figura 24 – Desempenho dos machos para o Grupo 2 - VHSSxx	58
Fotografia 8 – Macho OSG HSS PM MT - OH3	59
Figura 25 – Desempenho dos machos para o Grupo 3 - NODx	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção siderúrgica brasileira.....	20
Tabela 2 – Funções dos elementos de liga no aço	25
Tabela 3 – Faixa de composição de ferros fundidos típicos comuns	29
Tabela 4 – Definição dos grupos de ligas metálicas.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FoFo	Ferro Fundido
HSS	High Speed Steel – Aço Rápido
CBN	Nitreto Cúbico de Boro
PCD	Polycrystalline Diamond – Diamante Policristalino
CVD	Chemical Vapor Deposition – Deposição Química a Vapor
PVD	Physical Vapor Deposition – Deposição Física a Vapor
ISO	International Organization of Standardization
vc	Velocidade de Corte
vf	Velocidade de Avanço
HCI	High Chromium Iron- Ferro fundido branco
IC	Indefinite Chill - Ferro fundido de coquilhamento indefinido
SI	Sistema Internacional de Unidades
RPM	Rotações Por Minuto
p	Passo da Rosca
SFT	Spiral Flute Tap – Macho de Canal Espiral

LISTA DE SÍMBOLOS

Fe	ferro
C	carbono
Fe ₃ C	cementita
V	vanádio
Nb	nióbio
W	tungstênio
Ti	titânio
Si	silício
Mn	manganês
P	fósforo
S	enxofre
Cr	cromo
Ni	níquel
Co	cobalto
Cu	cobre
Mo	molibdênio
TiN	nitreto de titânio
TiCN	carbonitreto de titânio
TiAlN	nitreto de alumínio e titânio
TiC	carboneto de titânio
WC	carboneto de tungstênio
NbC	carboneto de nióbio
Ta	tântalo
AlCrN	nitreto de cromo alumínio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVO DO TRABALHO.....	16
1.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	PROCESSO DE LAMINAÇÃO	18
2.1.1	Cilindros de laminação	20
2.1.1.1	Materiais de construção dos cilindros de laminação	23
2.1.1.1.1	Aço	24
2.1.1.1.2	Ferro fundido	28
2.2	PROCESSOS DE ROSQUEAMENTO	29
2.2.1	Tipos de rosqueamento	29
2.2.2	Rosqueamento interno com macho	31
2.2.2.1	Machos manuais	32
2.2.2.2	Machos máquina	34
2.2.2.3	Características de um macho	35
2.2.2.4	Rosqueamento interno com macho de conformação.....	36
2.2.2.5	Rosqueamento interno com macho de corte.....	36
2.3	MATERIAIS DAS FERRAMENTAS DE CORTE.....	38
2.3.1	Definição dos materiais de ferramentas de corte	39
2.4	MANDRILAMENTO.....	42
2.4.1	Mandriladoras	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1	OS MATERIAIS DOS CILINDROS ESTUDADOS.....	45
3.1.1	Materiais dos cilindros para laminação de produtos longos	46
3.1.2	Materiais dos cilindros para laminação de tiras a quente	48
3.2	PROCESSO DE ROSQUEAMENTO DOS CILINDROS LAMINADORES.....	49
3.3	AS FERRAMENTAS UTILIZADAS NO PROCESSO.....	50
3.4	A MÁQUINA UTILIZADA NO PROCESSO.....	52
3.5	OS PARÂMETROS DE CORTE.....	52
3.6	O MÉTODO DEFINIDO PARA OS ENSAIOS.....	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5	CONCLUSÕES	61

REFERÊNCIAS	62
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	64
ANEXO A – Informativo Villares Rolls – Cilindros para Laminação de Longos.....	65
ANEXO B – Informativo Villares Rolls – Cilindros para Laminação de Tiras a Quente.....	69

1 INTRODUÇÃO

O ferro é um dos metais mais abundantes na crosta terrestre e historicamente muito importante para a humanidade, chegando a dar nome a um dos períodos da história, a Idade do Ferro. Desde que foi descoberto e passou a ser manufaturado, passou por diversos desenvolvimentos dando vida ao aço. Esta nova liga teve sua aplicação aumentada com o passar dos anos e hoje praticamente não podemos pensar em vida sem o aço.

A ciência da metalurgia nasceu para estudar e gerenciar os metais desde sua extração do subsolo até sua transformação em produtos adequados ao uso. O avanço tecnológico das ligas metálicas requer um melhoramento contínuo dos equipamentos e ferramental da indústria metalúrgica. A medida que novos materiais são desenvolvidos, novas ferramentas capazes de usiná-los necessitam ser criadas.

A indústria da laminação de metais busca incansavelmente por métodos de otimizar sua produção, seja reduzindo custos ou aumentando a qualidade de seus produtos. Este segundo cenário implica em cilindros laminadores com melhores propriedades mecânicas. Para se obtê-los, manipulam-se as variáveis do processo produtivo, como: adição de elementos de liga, processo de fusão, forjamento e tratamento térmico.

Inversamente proporcional à melhora das propriedades mecânicas de um material está a usinabilidade do mesmo. Tendo em vista que um cilindro laminador precisa ter sua superfície usinada para atingir os padrões exigentes de tolerância dimensional, cria-se a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias e ferramentas de corte que consigam usinar essas ligas de forma economicamente viável.

O setor de pesquisa e desenvolvimento das siderúrgicas e das fornecedoras de ferramenta caminham juntos e se fomentam. Uma vez que uma nova liga é criada novos métodos e novas ferramentas deverão ser desenvolvidos também. Esse trabalho se dá através de testes realizados no chão de fábrica junto com os operadores das máquinas, os quais detêm um grande conhecimento prático e auxiliam muito nesse desenvolvimento mútuo.

1.1 OBJETIVO DO TRABALHO

O presente trabalho teve como objetivo o aprimoramento da operação de rosqueamento dos cilindros laminadores fundidos, produzidos por uma grande empresa multinacional, através da análise do desempenho de ferramentas do tipo macho mais eficientes e econômicas.

Sendo uma das maiores fabricantes de cilindros laminadores do mundo e tendo várias concorrentes neste ramo, a empresa, na qual o trabalho se desenvolveu, restringe a divulgação de qualquer informação que diga respeito ao *know-how* de fabricação de seus produtos. Logo, este estudo apresentará dados como parâmetros de máquinas e resultados obtidos de forma genérica.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

A furação e o rosqueamento são processos críticos executados no final do ciclo de produção, quando já existe um alto valor agregado a peça. Portanto, eles podem impulsionar ou prejudicar sua produtividade e sua lucratividade. Investir nessas operações é uma maneira inteligente de melhorar o resultado de seus produtos.

As roscas funcionam como elementos de união das peças em um conjunto. No caso de um cilindro laminador, elas o fixam aos elementos que transmitirão rotação, logo, sofrerão elevados esforços de torque. Caso o processo de rosqueamento tenha sido falho, isso comprometerá toda a cadeia laminadora, podendo comprometer todo lote de um produto laminado, ou ainda mais grave, ocasionar um acidente de grandes proporções.

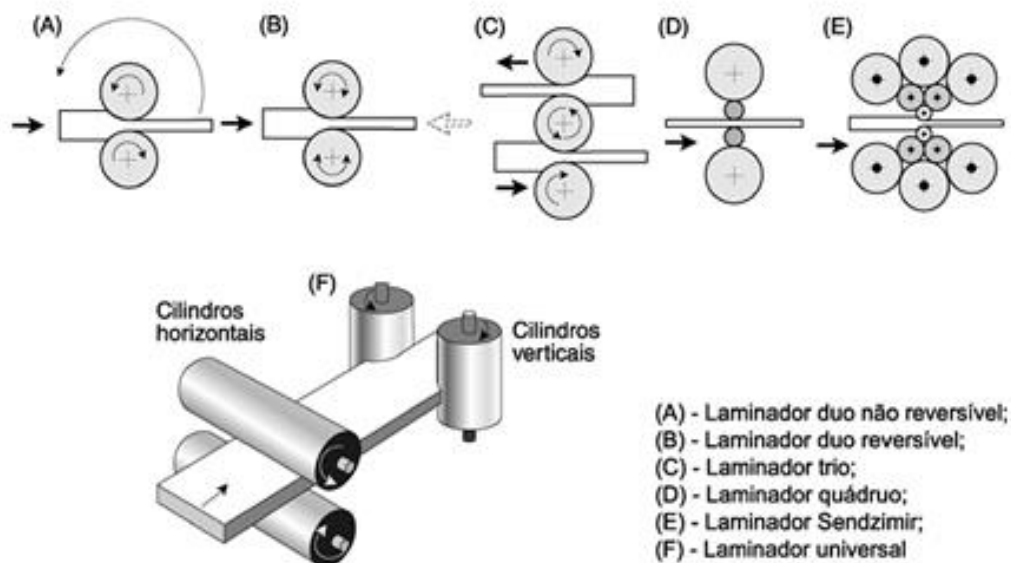
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSO DE LAMINAÇÃO

O processo de deformação plástica do metal passando-o entre rolos é conhecido como laminação. Este é o processo metalúrgico mais utilizado porque se presta a alta produção e preciso controle dimensional dos produtos finais. Na deformação de metais por rolos, o material é submetido a altas tensões de compressão, devido a ação de esmagamento dos rolos, e tensões de cisalhamento de superfície como resultado da fricção entre os rolos e o metal. As forças de atrito também são responsáveis por conduzir o metal entre os rolos.

A redução ou desbaste inicial dos lingotes em blocos ou tarugos é feita normalmente por laminação a quente. Depois dessa fase segue-se uma nova etapa de laminação a quente para transformar o produto em chapas grossas, chapas finas, vergalhões, barras, tubos, trilhos ou perfis estruturais. A laminação a frio de metais tem a posição de maior destaque na indústria. A laminação a frio produz chapas finas, fitas e folhas finas de bom acabamento superficial, com propriedades mecânicas melhoradas e ao mesmo tempo mantendo um controle dimensional do produto final bastante rigoroso. (DIETER, 1961, v. 1, p. 488, tradução nossa).

Figura 1 – Tipos de laminadores



Fonte: Associação Brasileira do Alumínio (2018).

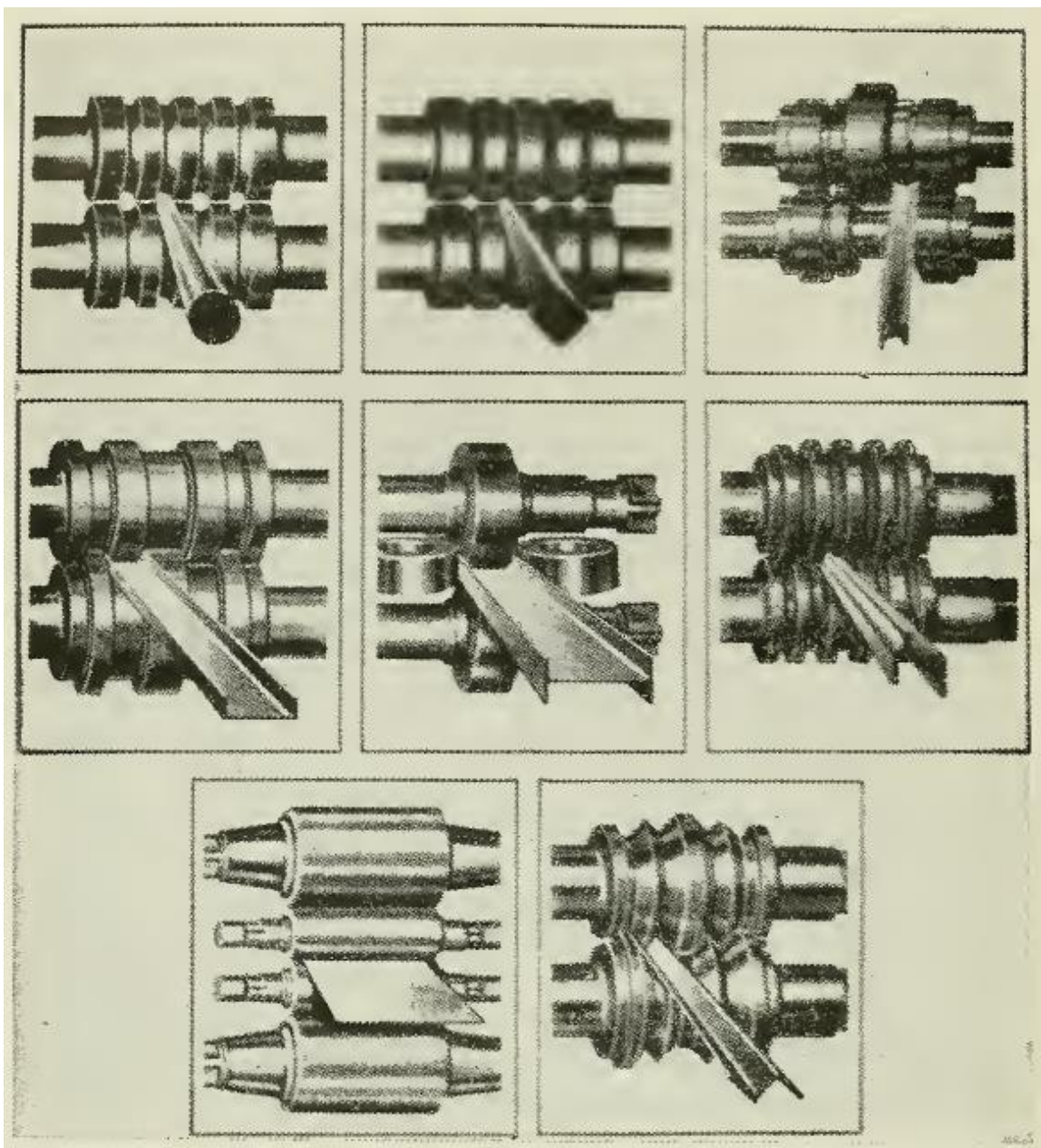
Em função da temperatura de trabalho nos laminadores, o processo de laminação pode ser classificado em dois tipos: laminação a frio e laminação a quente.

Basicamente esta divisão se baseia na temperatura de recristalização do material laminado. Quando a operação possui uma temperatura maior que a temperatura de recristalização do metal laminado, tem-se uma laminação a quente. Logo, quando a

temperatura de trabalho permanece inferior a temperatura de recristalização da peça, uma laminação a frio é caracterizada.

O nível de deformação - relação entre a espessura inicial e final do produto laminado - destes dois grupos é muito diferente. Uma vez que o material ultrapassa a temperatura de recristalização na laminação a quente, ele permite uma redução muito maior de sua espessura, além de modificar sua estrutura e refinar seus grãos, o que confere uma melhora expressiva em suas propriedades mecânicas e metalúrgicas.

Figura 2 – Deformação plástica de metais



Fonte: Dieter (1961).

Atualmente o Brasil é o décimo primeiro maior exportador mundial de aço com uma capacidade instalada de 50,4 milhões de toneladas de aço por ano, segundo o Instituto Aço Brasil (2018). Dentro de toda essa produção, o processo de conformação mecânica que mais se destaca é a laminação, conforme mostram os valores da Tabela 1.

Tabela 1 – Produção siderúrgica brasileira

PRODUTOS	JAN/JUL		18/17	MAI	JUN	JULHO		18/17	ÚLTIMOS
	2018(*)	2017	(%)	2018	2018	2018(*)	2017	(%)	12 MESES
AÇO BRUTO	20.215	19.542	3,4	2.679	2.920	3.022	2.831	6,7	35.023
LAMINADOS	13.551	12.763	6,2	1.950	1.880	1.903	1.853	2,7	23.205
PLANOS	8.255	7.754	6,5	1.244	1.134	1.143	1.135	0,7	14.188
LONGOS	5.296	5.009	5,7	706	746	760	718	5,8	9.017
SEMI-ACABADOS P/VENDAS	5.617	5.346	5,1	794	802	913	728	25,4	10.108
PLACAS	5.039	4.685	7,6	724	743	852	647	31,7	8.973
LINGOTES, BLOCOS E TARUGOS	578	661	(12,6)	70	59	61	81	(24,7)	1.135
FERRO-GUSA (Usinas Integradas)	16.229	16.141	0,5	2.213	2.340	2.428	2.315	4,9	28.419

(*) Dados Preliminares.

Fonte: Aço Brasil

Fonte: Instituto Aço Brasil (2018).

2.1.1 Cilindros de laminação

Dentro do processo de laminação, os cilindros ocupam o papel mais importante, pois, estando em contato direto com o produto laminado, são os responsáveis por dar forma e acabamento à peça final.

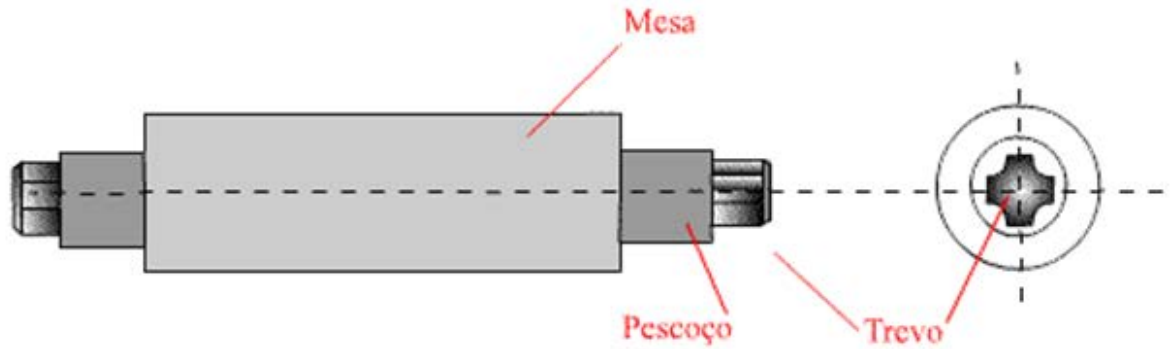
Caracterizam-se principalmente por três partes: mesa, pescoços e trevos (ou garfos de acionamento). Conforme Figura 3.

Mesa: é a área do cilindro que permanece sempre em contato com o metal laminado e, por essa razão, deve possuir as corretas propriedades mecânicas, evitando assim desgastes excessivos por conta da temperatura e abrasão. Podem ser lisas ou perfiladas, dependendo do produto a que se destinam laminar.

Pescoços: regiões intermediárias entre a mesa e os trevos e que se acoplam aos mancais do laminador.

Trevos: responsáveis pela transmissão de potência. São acoplados às árvores dos motores.

Figura 3 – Partes de um cilindro de laminação



Fonte: Centro de Informação Metal Mecânica (2018).

Os cilindros de laminação recebem ainda uma classificação de acordo com sua posição dentro da cadeira laminadora. Eles podem ser considerados cilindros de trabalho ou de encosto.

Os cilindros de trabalho recebem esse nome porque estão diretamente em contato com o metal, assim desenvolvendo o trabalho de conformador na operação. São eles que estão sujeitos às maiores solicitações de temperatura e desgaste.

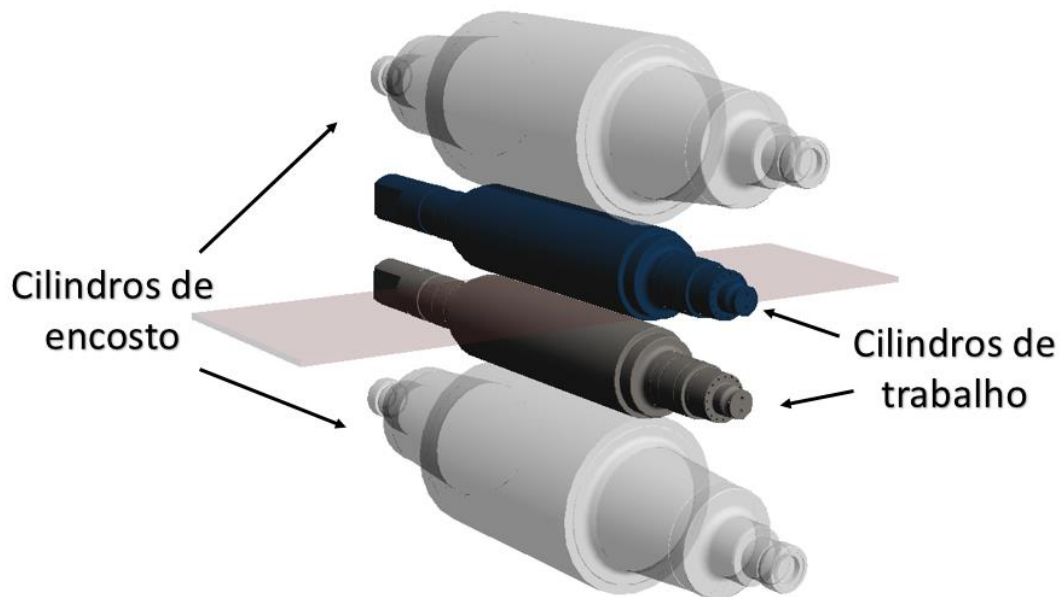
Os cilindros de encosto, também conhecidos como cilindros de apoio ou somente *backup*, não entram em contato com o produto laminado e desempenham a função de suporte aos cilindros de trabalho, impedindo que estes flexionem. Por esta razão, são rolos de maior diâmetro e massa.

A Figura 4 exemplifica o posicionamento de ambos os tipos, cilindros de trabalho e de encosto, e como interagem entre si.

Outro fator muito importante a ser observado em processos de laminação em série e de produtos longos em larga escala é a utilização de trens de laminação. Estes trens nada mais são que um grupo de laminadores alinhados em sequência. Cada laminador recebe o nome de cadeira de laminação e um conjunto de cadeiras forma um trem de laminação, conforme ilustra a Figura 5.

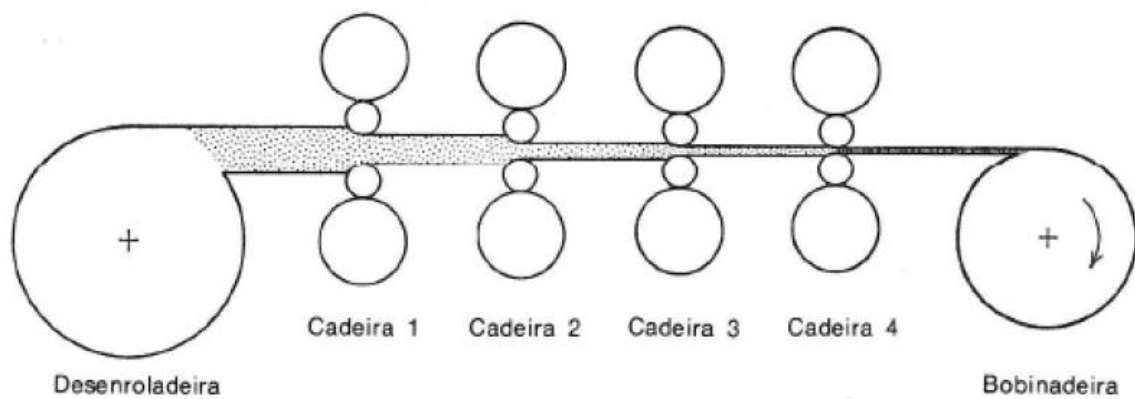
Nota-se que a redução da espessura ocorre gradativamente entre as cadeiras de laminação.

Figura 4 – Representação gráfica de uma cadeira laminadora



Fonte: adaptado de Cornélio (2010).

Figura 5 – Desenho esquemático da laminação de tiras em um laminador contínuo de quatro cadeiras



Fonte: Dieter (1961).

Procurando melhorar a produtividade dos laminadores e a qualidade da tira laminada, desenvolvem-se cilindros para laminação que apresentem maior resistência ao desgaste, maior estabilidade dimensional, combinados com propriedades adequadas de resistência mecânica e tenacidade à fratura, explica Roberts¹ (2002 apud PERNAMBUCO, 2014, p.29).

Essa evolução nas propriedades dos materiais é de fundamental importância para todos os cilindros em um trem de laminação. Porém, para as últimas cadeiras, essas qualidades são essenciais, já que os últimos cilindros a entrarem em contato com o produto serão os responsáveis por dar-lhes acabamento final. A condição destes cilindros influencia diretamente na qualidade das peças, por isso os materiais de que são compostos são específicos para cada tipo de laminação e as condicionantes de tal processo, tentando assim manter ao máximo suas características superficiais inalteradas.

Por isso, um dos principais motivos responsáveis pela parada do laminador é a troca dos cilindros de ferro fundido indefinido, normalmente utilizados nestas últimas cadeiras (PERNAMBUCO, 2014, p.29).¹

Para que esta troca não ocorra com grande frequência, e conseqüentemente não aumente o custo da produção, investe-se em cilindros de melhores propriedades mecânicas que ofereçam maior resistência aos mecanismos de desgaste superficial.

2.1.1.1 Materiais dos cilindros de laminação

Os cilindros laminadores podem ser produzidos a partir dos processos de fundição e forjamento. Dentro destes dois processos existem diferentes técnicas de produção dos metais. Cada empresa utiliza-se de seu *know-how* e setor de P&D (pesquisa e desenvolvimento) para produzir rolos com melhores propriedades. Um exemplo disso é a fundição centrífuga, onde a camada externa do cilindro (camada de trabalho) proporciona resistência ao desgaste, enquanto as camadas subsequentes (núcleo) proporcionam uma combinação entre tenacidade e resistência mecânica.

1 ROBERTS, W. L.; ROBERTS, C. D. **Mechanical principles of rolling processes**. In: Rolls for the metalworking industries. p. 215-265. Warrendale: 2002. Apud PERNAMBUCO, L. R. A. **Avaliação da usinabilidade de cilindros para laminação de tiras a quente**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá 2014.

Os metais de que são produzidos os cilindros laminadores pertencem aos grupos do aço e ferros fundidos. Dentro destas famílias, encontram-se uma infinidade de ligas com incontáveis combinações de elementos de adição em diferentes teores. A seguir, serão apresentadas as características gerais de cada material e alguns exemplos das principais ligas utilizadas hoje na indústria da laminação.

2.1.1.1.1 Aço

“Aço é a liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação” (CHIAVERINI, 1988, p. 21).

Os limites inferior e superior de teor de carbono no aço, citados por Chiaverini, estão relacionados com a solubilidade mínima e máxima de carbono no ferro, estando exposto à temperatura ambiente e 1148° C, respectivamente.

Os outros elementos de liga, constantes no aço, podem ser residuais devido ao processo de fabricação ou inseridos propositalmente afim de otimizar as propriedades do metal. Este processo de manipulação dos teores de elementos de liga é conduzido minuciosamente pelas siderúrgicas e é o que difere a qualidade dos produtos entre elas. Quão melhor elas souberem aplicar os elementos em seus produtos, mais se destacaram no mercado consumidor de aço.

A seguir, na Tabela 2, estão demonstrados os principais elementos inseridos na liga aço carbono, suas tendências na formação de carbonetos e as principais funções que desempenham dentro da liga.

Tabela 2 – Funções dos elementos de liga no aço

(continua)

Elemento de Liga	Tendência na Formação de Carboneto	Principais Funções
Alumínio	Menos do que o Ferro. Promove a grafitação.	<ul style="list-style-type: none"> • Com nitrogênio ou oxigênio, o alumínio forma uma dispersão fina que limita o crescimento do grão. • Um desoxidante que resulta em resistência excelente por causa do tamanho de grão fino resultante. • Forma uma camada de superfície endurecida por difusão do nitrogênio em baixa temperatura (nitretação).
Níquel	Menos do que o Ferro. Promove a grafitação.	<ul style="list-style-type: none"> • Fornece uma contribuição moderada a Temperabilidade. • Tende a promover austenita retida com médio e alto carbono. • Endurece aços não temperados por solução sólida. • Torna aços de alto cromo austeníticos. • Fornece tenacidade em aços ferríticos - perlíticos.
Carbono	Nenhum.	<ul style="list-style-type: none"> • O elemento de liga mais importante no aço formando perlita, bainita, grafite e martensita. • O aumento de carbono aumenta a dureza, resistência e a temperatura de transição dútil - frágil. • Aumento de carbono diminui a tenacidade e ductilidade.
Silício	Promove a grafitação.	<ul style="list-style-type: none"> • Fornece um aumento moderado da temperabilidade. • Endurece a ferrita, mais do que o manganês, mas menos do que o fósforo, até cerca de 1%. • Aumenta a resistência de aços temperados e revenidos. • Fornece alguma resistência à oxidação em temperaturas elevadas. • É um desoxidante geral.
Titânio	Mais do que qualquer outro metal exceto Nióbio.	<ul style="list-style-type: none"> • Produz partículas de carboneto que restringem o crescimento de grãos. • Reduz a dureza da martensita através da remoção do carbono em solução • Remove carbono em solução em aços inoxidáveis prevenindo a degradação do contorno de grão por carboneto de cromo. • Inibe a formação de austenita em aços de alta cromo. • Atua como um desoxidante pela combinação com oxigênio e nitrogênio.
Cobalto	Similar ao Ferro.	<ul style="list-style-type: none"> • Resiste ao amolecimento em altas temperaturas.

Tabela 2 – Funções dos elementos de liga no aço

(continuação)

Cobre	Nenhum.	<ul style="list-style-type: none"> • Melhora a resistência à corrosão atmosférica em adições de 0,20 - 0,50%. • Diminui a capacidade do trabalho à quente de aços, devido à migração do cobre para os contornos de grãos.
Cromo	Mais do que Manganês e menos do que Tungstênio.	<ul style="list-style-type: none"> • Fornece uma contribuição moderada à capacidade de endurecimento até cerca de 1%. • Ligeiramente resiste amolecimento durante a têmpera. • Fornece resistência à temperatura elevada e resistência à oxidação . • Com alto teor de carbono, proporciona resistência à abrasão.
Enxofre	Nenhum.	<ul style="list-style-type: none"> • Normalmente presente como inclusões de sulfeto de manganês • Diminui resistência e ductilidade transversal, mas tem pouco aumento sobre propriedades longitudinais. • Diminui soldabilidade. • Melhora a usinabilidade.
Manganês	Mais do que o Ferro e menos do que o Cromo.	<ul style="list-style-type: none"> • Fornece uma contribuição moderada à capacidade de endurecimento (temperabilidade) até cerca de 2%. • Promove a austenita retida na têmpera. • Forma sulfetos de manganês que melhoram a usinabilidade. • Produz um aço austenítico de alto carbono. • Produz um aço austenítico Cr- Ni- Mn (200 série inoxidável) que compete com os aços inoxidáveis da série 300. • Aumenta a resistência e reduz a ductilidade em aços ferríticos. • É um desoxidante e promove a trabalhabilidade à quente.
Molibidênio	Forte formador de carbonetos. Mais do que Cromo e Tungstênio.	<ul style="list-style-type: none"> • Contribui muito para o endurecimento até cerca de 1%. • Contribui para a temperabilidade. • Aumenta a resistência em elevada temperatura e a resistência à fluência. • Melhora a resistência à corrosão em aços inoxidáveis, particularmente em ambientes com cloretos. • Minimiza a tendência da fragilidade no revenido em aços ligados na faixa de 0,15-0,30%.

Tabela 2 – Funções dos elementos de liga no aço

(conclusão)

Nióbio	Forte.	<ul style="list-style-type: none"> • Produz tamanho de grão fino. • Aumenta a resistência em temperatura elevada. • Por ser um forte formador de carboneto pode diminuir o endurecimento do aço por remoção do carbono da matriz.
Tungstênio	Mais forte do que o Molibidênio.	<ul style="list-style-type: none"> • Diminui amolecimento durante a têmpera. • Forma carbonetos resistentes à abrasão. • Promove a dureza em elevada temperatura. • Fornece alguma resistência à fluência.
Vanádio	Forte, porém inferior ao Titânio e Nióbio.	<ul style="list-style-type: none"> • Fornece um aumento significativo na capacidade de endurecimento até cerca de 0,05%. • Promove tamanho de grão fino austenítico. • Resiste ao amolecimento durante a têmpera.
Boro	Moderado.	<ul style="list-style-type: none"> • Um aumento significativo de capacidade endurecer com adições na faixa de 0,0005-0,003 %, sem sacrificar a ductilidade ou usinabilidade.
Cálcio	Nenhum.	<ul style="list-style-type: none"> • Quando usado como um desoxidante, proporciona melhor usinabilidade quando comparado como o alumínio ou silício. • Controla o formato da inclusão em aços HSLA, melhorando a resistência.
Chumbo	Nenhum.	<ul style="list-style-type: none"> • Não se dissolve no aço e melhora a usinabilidade. • Pode causar fragilização do aço em temperaturas próximas ao ponto de fusão do Chumbo.
Fósforo	Nenhum.	<ul style="list-style-type: none"> • Fornece uma elevada contribuição para a temperabilidade. • Promove a austenita retida. • Reduz severamente tenacidade e ductilidade. • Melhora a resistência à corrosão. • Melhora a usinabilidade de aços de alto teor de enxofre • Diminui ductilidade em aços de médio e alto teor de carbono. • Contribui para a fragilização ao revenido.

Fonte: Adaptado de TESTMAT (2018).

2.1.1.1.2 *Ferro fundido*

Para a indústria, o FoFo (ferro fundido) tem importância tão grande quanto a do aço, uma vez que, com o desenvolvimento da aplicação dos elementos de liga e tratamentos térmicos, esta liga passou a ser empregada em componentes que até então eram somente constituídos de aço.

A definição mais comum e abrangente encontrada na literatura para ferro fundido é a de liga ferro carbono com teor de carbono superior a 2% aproximadamente. Porém outras fontes consideram este metal como sendo uma liga ternária Fe-C-Si já que o silício encontra-se com frequência em maior quantidade que o próprio carbono. Outra identidade dos ferros fundidos é a presença de Fe_3C (cementita) e carbono livre (grafita).

A classificação dos ferros fundidos se dá através da disposição do carbono na matriz da microestrutura metálica. Eles podem ser:

- ferro fundido branco – possui microestrutura de coloração clara (origem do nome), tem como elementos de liga preponderantes o carbono e o silício, apresentando carbono quase inteiramente na forma de Fe_3C ;

- ferro fundido cinzento – possui microestrutura de coloração escura (origem do nome), tem como elementos de liga preponderantes o carbono e o silício, apresentando uma parcela relativamente grande do carbono no estado livre – grafita lamelar – e o restante na forma de Fe_3C ;

- ferro fundido mesclado – possui microestrutura de coloração intermediária entre o branco e o cinzento (origem do nome) e apresenta características de ambos – cementita próximo a superfície e grafita no núcleo;

- ferro fundido nodular – também conhecido por ferro fundido dúctil, apresenta a maior parte do carbono livre, grafita, em formato esferoidal, o que lhe confere boa ductibilidade.

- ferro fundido vermicular – apresenta microestrutura com a maior parte do carbono livre em formato vermicular, uma forma intermediária entre nódulos e veios, e por isso é também classificado como um produto intermediário entre o FoFo nodular e cinzento, apresentando a semelhante característica de fundibilidade do cinzento e ductibilidade do nodular.

Tabela 3 – Faixa de composição de ferros fundidos típicos comuns

Tipo	Composição química, %				
	C	Si	Mn	S	P
Branco	1,8/3,6	0,5/1,9	0,25/0,80	0,06/0,20	0,06/0,20
Maleável	2,2/2,9	0,9/1,9	0,15/1,20	0,02/0,20	0,02/0,20
Cinzento	2,5/4,0	1,0/3,0	0,20/1,00	0,02/0,25	0,02/1,00
Nodular	3,0/4,0	1,8/2,8	0,10/1,00	0,01/0,03	0,01/0,10
Vermicular	2,5/4,0	1,0/3,0	0,20/1,00	0,01/0,03	0,01/0,10

Fonte: Adaptado de Chiaverini (1988).

2.2 PROCESSOS DE ROSQUEAMENTO

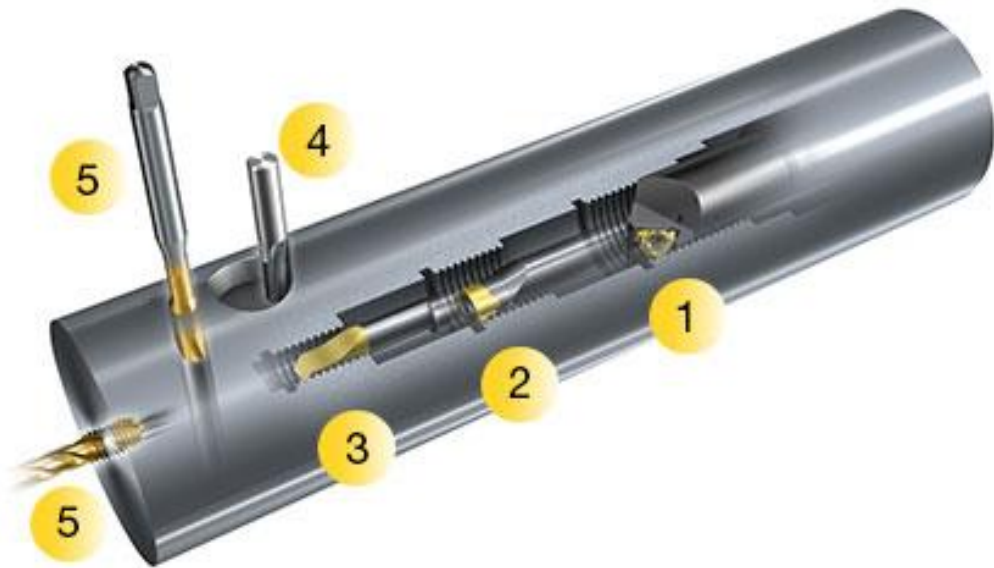
A operação denominada rosqueamento pode ser definida como um processo mecânico, de usinagem ou conformação, destinado à obtenção de filetes de rosca, por meio da abertura de um ou vários sulcos helicoidais de passo uniforme, em superfícies cilíndricas ou cônicas de revolução (FERRARESI, 1995).

Este processo envolve movimentos relativos de rotação e avanço entre a peça e a ferramenta, onde uma delas gira enquanto a outra se desloca simultaneamente segundo uma trajetória retilínea paralela ou inclinada em relação ao eixo de rotação, ou apenas uma delas executa os dois movimentos, ou seja, gira e avança, enquanto a outra fica parada.

2.2.1 Tipos de rosqueamento

O rosqueamento realizado para a obtenção de roscas fêmeas, ou seja, roscas em superfícies internas cilíndricas ou cônicas de revolução, é chamado de rosqueamento interno. Existem várias formas de rosqueamento interno, entre elas: O rosqueamento interno com ferramenta de perfil único; o rosqueamento interno com ferramenta de perfil múltiplo; o rosqueamento interno com machos (do inglês *tapping*) de corte ou de conformação; e o rosqueamento interno com fresa.

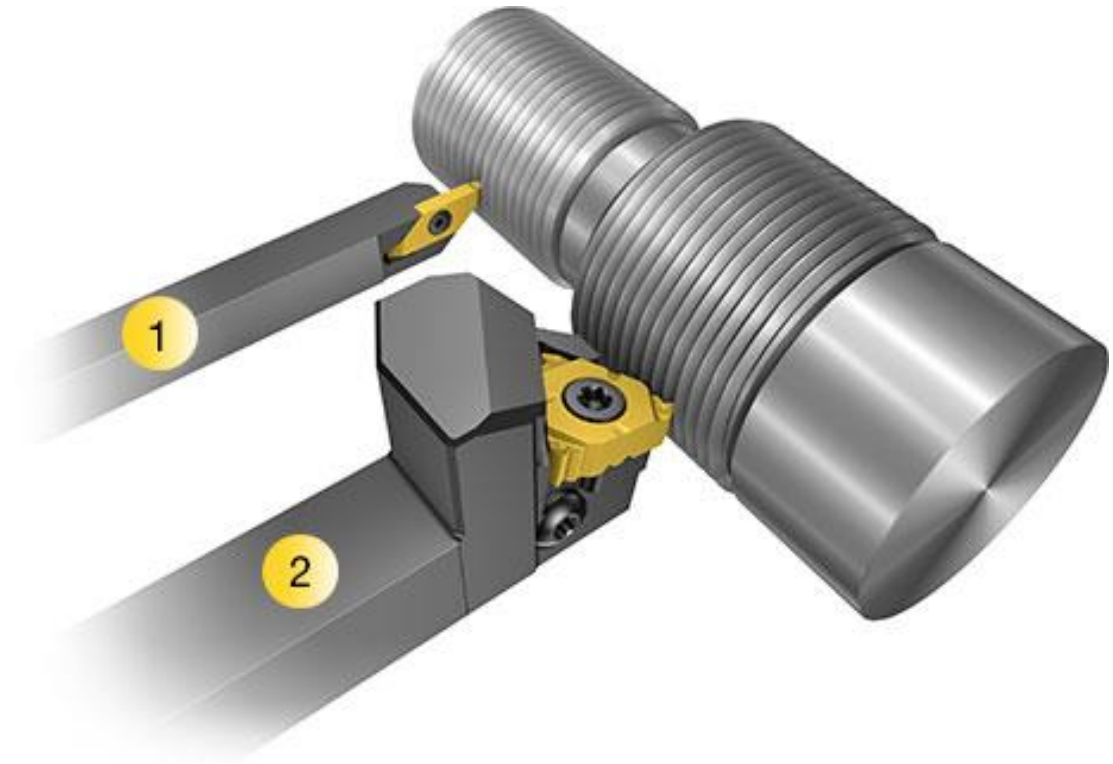
Figura 6 – Rosqueamento interno



Fonte Sandvik (2018).

O rosqueamento externo (do inglês *threading*) é aquele executado em superfícies externas cilíndricas ou cônicas de revolução. Entre as formas de rosqueamento externo, estão: o rosqueamento externo com ferramenta de perfil único; o rosqueamento externo com ferramenta de perfil múltiplo; o rosqueamento externo com cossinete; o rosqueamento externo com jogo de pentes; e o rosqueamento *whirling*, que é uma variação do rosqueamento externo com jogo de pentes, no qual um cabeçote rotativo na forma de anel suporta quatro ferramentas dispostas de forma equidistante circunferencialmente e defasadas axialmente. Esta última forma já era usada a bastante tempo para a usinagem de materiais moles (pré-usinagem), no entanto, atualmente já se desenvolveu o uso deste processo para usinar rosca em material endurecido.

Figura 7 – Rosqueamento externo

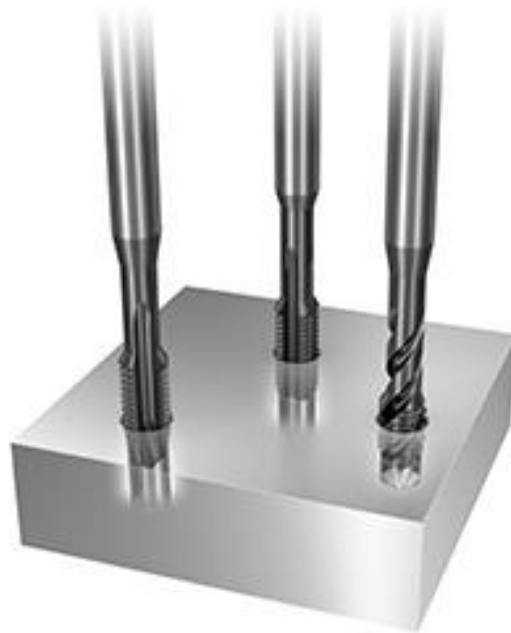


Fonte Sandvik (2018).

2.2.2 Rosqueamento interno com macho

Dentre os tipos de rosqueamento interno, aquele que utiliza o macho como ferramenta (*tapping* em inglês), é, atualmente, o mais utilizado na indústria, devido a sua alta produtividade, e ao fato de apresentar maior precisão nas roscas produzidas, tanto para os pequenos quanto para grandes diâmetros. Os machos utilizados no rosqueamento interno podem ser classificados como manuais ou máquinas e ainda como machos de conformação (não geram cavacos durante o processo de fabricação da rosca) ou de corte (geram cavacos durante a operação de rosqueamento).

Figura 8 – Visão geral da aplicação de rosqueamento com macho



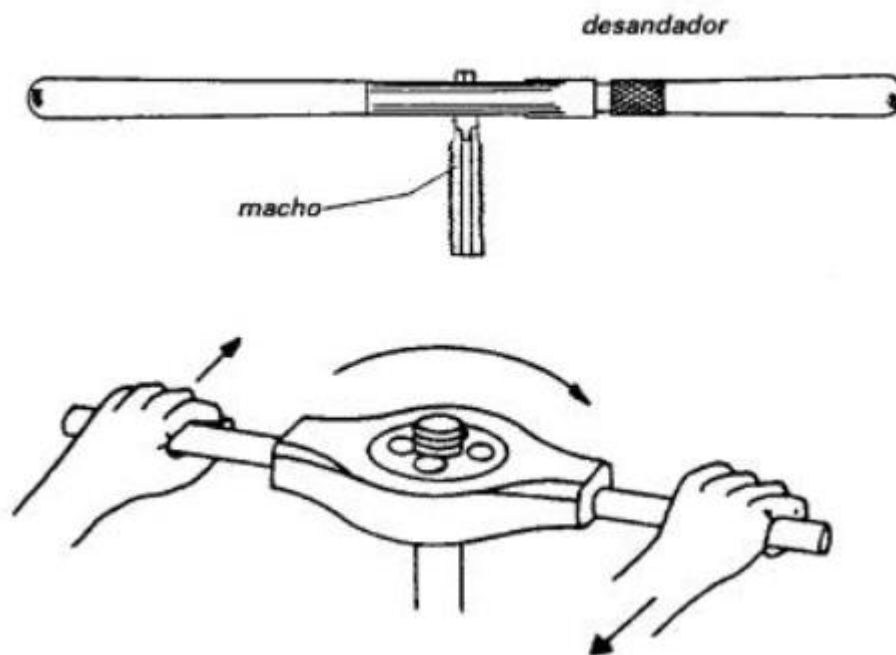
Fonte Sandvik (2018).

2.2.2.1 Machos manuais

Como o próprio nome sugere, a operação de rosqueamento com machos manuais se dá através do manuseio da ferramenta. O operador, auxiliado por uma ferramenta denominada desandador, exerce um torque sobre o macho, e este, por reação, produz a rosca interna no furo pré usinado. As ferramentas e a operação estão ilustrados na Figura 9.

Machos manuais normalmente são produzidos dentro de um kit com três ferramentas escalonadas, para que a rosca seja usinada ou conformada gradativamente, reduzindo assim os esforços nos dentes da ferramenta. Elas devem ser usadas numa ordem pré determinada. Esta ordem é indicada por listras marcadas na haste do macho. O primeiro macho a ser utilizado é a ferramenta com uma única listra em sua haste, sendo seguida pela ferramenta com duas listras e finalmente a sem nenhuma listra, conforme a Figura 10.

Figura 9 – Operação do macho manual



Fonte Ebah (2018).

Figura 10 – Ordenação de machos manuais



Fonte Aguado (2018).

2.2.2.2 Machos máquina

No processo de rosqueamento com machos máquina, o esforço rotacional sofrido pela ferramenta é produzido por uma máquina. O macho é acoplado à máquina por um suporte, também conhecido no chão de fábrica por pinça.

Enquanto os machos manuais são utilizados em kits com ferramentas escalonadas que produzem a rosca gradativamente, os machos máquina são ferramentas únicas e produzem a rosca final apenas com uma única passagem da ferramenta pelo furo. Por essa razão possuem uma geometria em forma de chanfro nos dentes iniciais, o que lhes proporciona um esforço de corte crescente nos primeiros dentes.

Diferentemente do processo com machos manuais, o rosqueamento com machos máquina é complexo. Essa complexidade se deve, principalmente, ao fato dos ajustes da máquina de sincronismo entre avanço e rotação e ao desalinhamento entre ferramenta e furo que pode ocasionar no desgaste prematuro e/ou avarias bem como às dificuldades de remoção de cavaco e lubrificação, que são ainda piores em furos cegos (TSURUDA , 2010).

A Figura 11, a seguir, exemplifica alguns modelos de machos com diferentes geometrias.

Figura 11 – Exemplos de diferentes geometrias de macho máquina



Fonte Amatools (2018).

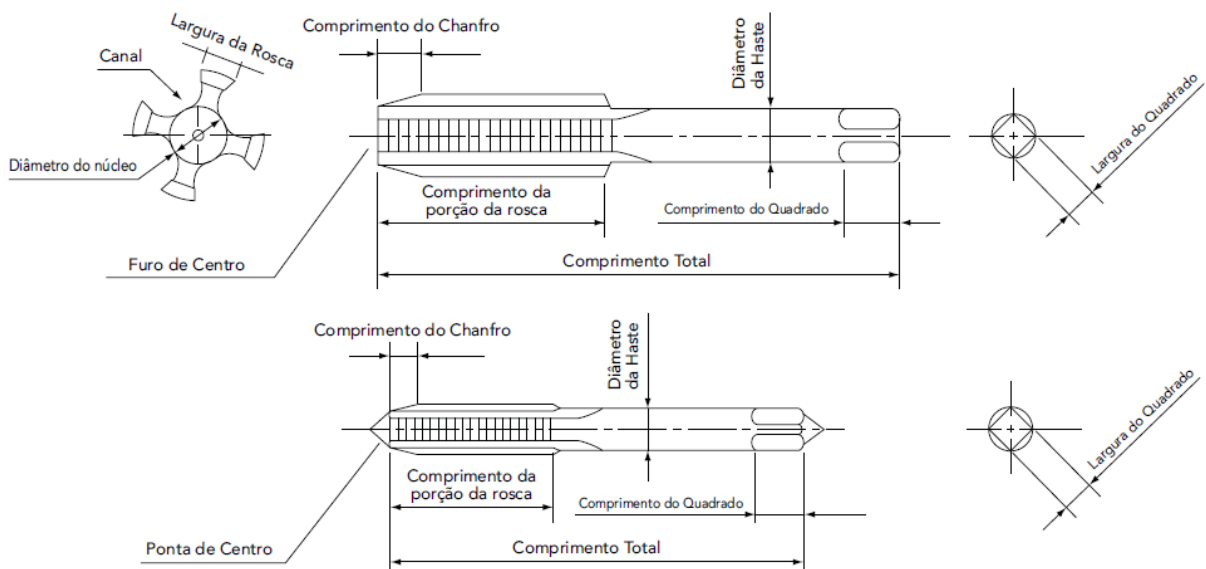
2.2.2.3 Características de um macho

O macho é uma ferramenta de geometria complexa e possui número variável de arestas de corte, desse modo, o macho é a ferramenta que possui filetes externos e rasgos longitudinais, originando o aparecimento de arestas cortantes e sulcos necessários para a remoção dos cavacos (quando esta operação se fizer necessária).

Os machos de corte, tanto os manuais quanto os máquinas, possuem canais, os quais podem ser retos, em hélice, ou uma combinação dos dois. Os machos de corte possuem canais por três razões principais: proporcionar arestas de corte, proporcionar folga para saída dos cavacos, e conduzir fluido para a região de corte não só com o objetivo de lubrificar esta região, mas também cumprir as principais exigências do processo de rosqueamento, ou seja transportar melhor o cavaco e quebrá-lo adequadamente.

A quantidade de canais que o macho deve possuir é diretamente influenciada pelo tipo de cavaco formado pelo material a ser rosqueado. Assim, no rosqueamento de materiais que produzem cavacos curtos, tais como o ferro fundido cinzento, o latão e o bronze, é recomendado o uso de 4 canais. Por outro lado no rosqueamento de materiais metálicos que produzem cavacos moles e longos, tais como alumínio, magnésio e aço inoxidável, três ou até dois canais podem ser usados, pois com a diminuição do número de canais e o conseqüente aumento da largura dos mesmos, o espaço para remoção do cavaco aumenta.

Figura 12 – Terminologia dos machos



Fonte OSG (2012).

2.2.2.4 Rosqueamento interno com macho de conformação

A conformação de roscas internas com machos é o processo no qual um macho sem canais, ou seja com superfície ativa em forma de rosca, lamina uma rosca sobre a superfície lateral do furo inicial. Portanto o processo se dá sem a remoção de cavaco. Este tipo de rosqueamento é especialmente indicado para materiais com alongamento de ruptura acima de 8% e para materiais que podem ser facilmente trabalhados a frio, tais como aço com até 0,5% de carbono e ligas de cobre e alumínio.

Como características principais do processo de rosqueamento por conformação, podemos citar as seguintes:

- é um processo muito versátil, pois, com uma única geometria de macho laminador, é possível executar roscas em furos cegos e passantes e em diversos tipos de materiais, ao contrário dos machos de corte, que devem ser específicos para cada operação;
- os machos de conformação não têm aresta de corte e geralmente não possuem canais;
- apresenta um custo de reciclagem reduzido devido à fabricação sem cavacos, e uma longa vida da ferramenta, não sendo necessária afiação;
- os machos de conformação requerem uma grande precisão no pré-furo e um torque de rosqueamento mais elevado;
- os machos de conformação têm maior eficiência, maior resistência, e maior vida que os machos de corte, permitindo maiores velocidades na fabricação da rosca;
- as roscas obtidas por este processo apresentam maior resistência mecânica dos filetes que aquelas obtidas por outros sistemas de rosqueamento;
- o calor gerado com os machos de conformação, devido ao atrito, é maior que aquele produzido pelos machos de corte, de tal forma que o uso de fluido de corte para refrigeração no rosqueamento por conformação torna-se importante.

2.2.2.5 Rosqueamento interno com macho de corte

A operação com machos de corte se caracteriza por três etapas: avanço, parada e retorno. Durante o avanço ocorre a rotação da ferramenta e assim a rosca é usinada. Em seguida há a parada da ferramenta e tão logo acontece a inversão de sentido de movimento para a retirada da ferramenta.

Devido a sua geometria, os dentes do macho recebem a classificação de ativos ou alisadores. Os dentes ativos compõem a parte cônica da ferramenta e são responsáveis pela usinagem da rosca. Logo, é a área da ferramenta que sofre maior esforço e, conseqüentemente, maior desgaste. O restante dos dentes, presentes na parte cilíndrica, são responsáveis por garantir o acabamento e cumprir com as tolerâncias da rosca.

O rosqueamento interno com macho de corte é uma operação muito complexa tendo em vista os problemas ocasionados pela remoção do cavaco e lubrificação adequada das arestas de corte da ferramenta. Além disso existe uma relação fixa entre velocidade de corte e avanço que é definida pelo passo da rosca, a qual pode ser alterada. A situação é ainda pior quando as roscas são produzidas em furos cegos (furos não passantes), onde os machos são submetidos a condições de trabalho bastante severas.

Enquanto na usinagem de uma rosca em um furo passante, os filetes de entrada trabalham livremente e o macho não fica sob carga quando do seu retorno, na abertura de roscas em furos cegos, os filetes de entrada do macho, ao retornar, precisam cortar alguns cavacos, ocasionando uma sobrecarga elevada e variável sobre o macho. Além disso, os cavacos devem encontrar espaço suficiente nos canais do macho, no fundo do furo cego, ou devem ser direcionados para trás.

Algumas medidas de precaução podem ser tomadas afim de reduzir os os problemas citados:

- selecionar materiais que ofereçam menor resistência a usinagem da rosca (melhor usinabilidade);
- evitar profundidades de roscas acima de 1,5 vezes o diâmetro do macho;
- deixar uma folga adequada no fundo de furos cegos. Recomenda-se essa folga para se evitar que durante a operação de rosqueamento, principalmente com machos de canal reto, ocorra atrito na face do macho com o fundo do furo, devido ao acúmulo de cavacos, resultando na quebra do macho.

O material, a cobertura e a geometria do macho são atributos de extrema importância a serem considerados antes de se escolher a melhor ferramenta para determinado processo de rosqueamento. Uma configuração de macho que trabalha bem em um material em determinada aplicação pode não ser tão eficiente para outro material ou aplicação.

2.3 MATERIAIS DAS FERRAMENTAS DE CORTE

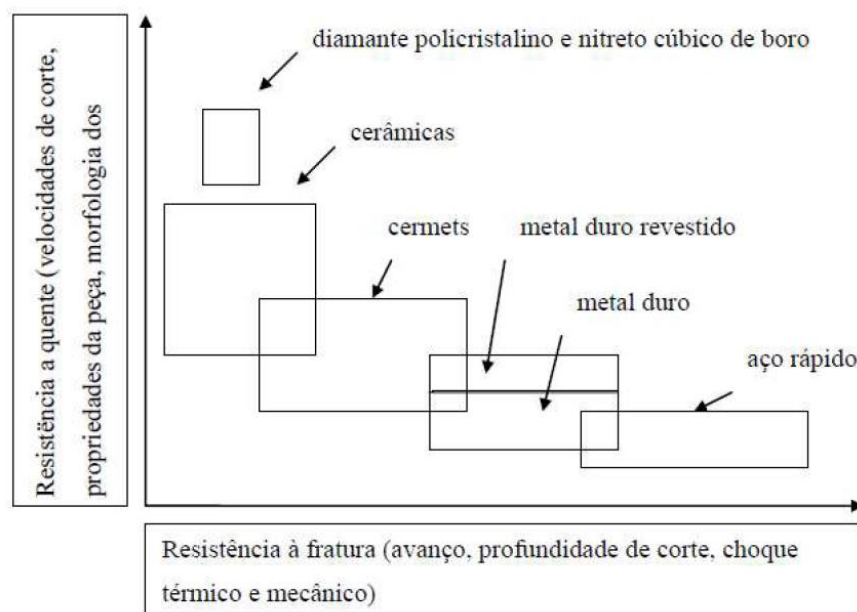
Antes de se realizar qualquer operação de usinagem, é de suma importância analisar o processo e o material que será usinado antes de fazer a escolha da ferramenta, máquina e acessórios. Esta análise, quando feita corretamente, garantirá que se extraia o máximo de benefícios das ferramentas, evite a degradação prematura das máquinas e acessórios, e ainda diminua custos com otimização de tempos de operação, eficiência energética e manutenção.

A resistência a quente é uma das principais propriedades a se avaliar em uma ferramenta, uma vez que a temperatura na região de corte aumenta proporcionalmente com a velocidade de corte. Como a indústria moderna sempre busca trabalhar com altas velocidades de corte, pensando na alta produção, fica evidente que ferramentas que consigam manter sua dureza, mesmo em altas temperaturas, serão desejáveis.

Outra propriedade importantíssima para os materiais de fabricação de ferramentas de corte é a resistência mecânica à fratura. Essa propriedade é requerida quando a ferramenta estará sujeita a altas solicitações mecânicas como choques mecânicos e térmicos advindos de cortes interrompidos por irregularidades das peças.

A Figura 13, apresentada a seguir, demonstra a relação entre as duas propriedades citadas acima em alguns dos materiais de construção de ferramentas de corte mais comuns.

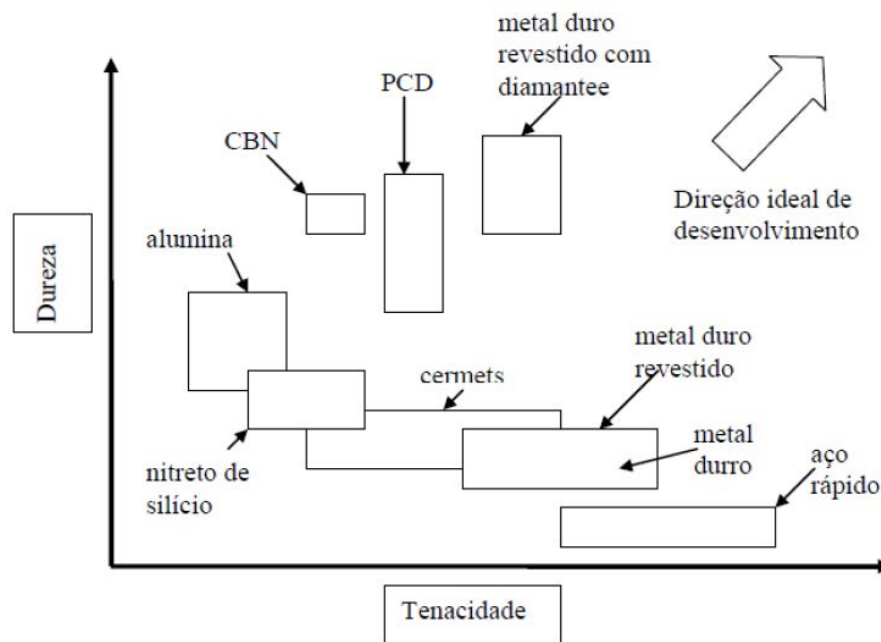
Figura13 – Relação entre Resistência a quente X Resistência a fratura, para os materiais de corte usuais



Fonte: Adaptado de Mehrotra (1998).

Outra relação, interessante de ser observada nos materiais utilizados para fabricação de ferramentas de corte, é a de dureza versus tenacidade.

Figura 14 – Relação dureza x tenacidade para os materiais de corte usuais



Fonte: Shen (1998).

2.3.1 Definição dos materiais de ferramentas de corte

Nesta seção serão definidos brevemente os principais materiais utilizados para construção de ferramentas de cortes. São eles: aço rápido, metal duro, cerâmica, cermet, nitreto cúbico de boro e diamante policristalino.

- Aço rápido: também conhecido pela sigla HSS (do inglês *High Speed Steel*), são aços com maiores teores de C que os aços comuns e ainda apresentam em sua composição Cr, Mo, W, V, Co e outros. Material tenaz com elevada resistência ao desgaste e que conserva suas propriedades até temperaturas próximas de 550° C. Atualmente pode ser obtido através da metalurgia do pó (sinterização), o que lhe confere maior homogeneidade em sua estrutura e melhores propriedades mecânicas. Pode ainda ser recoberto, sendo os recobrimentos mais comuns TiN, TiCN e TiAlN.
- Metal duro: liga de carboneto de tungstênio (WC) obtida através de sinterização. Pode apresentar também carbonetos de Ta, Ti e Nb. Tudo isso é prensado sob altas

temperaturas juntamente aos metais de menor ponto de fusão (ligantes). Os ligantes mais comuns são Co, Ni, Ti, e Cr, podendo haver uma combinação destes. Conforme a norma ISO 513, estão separados por classes que visam a usinagem de determinados materiais.

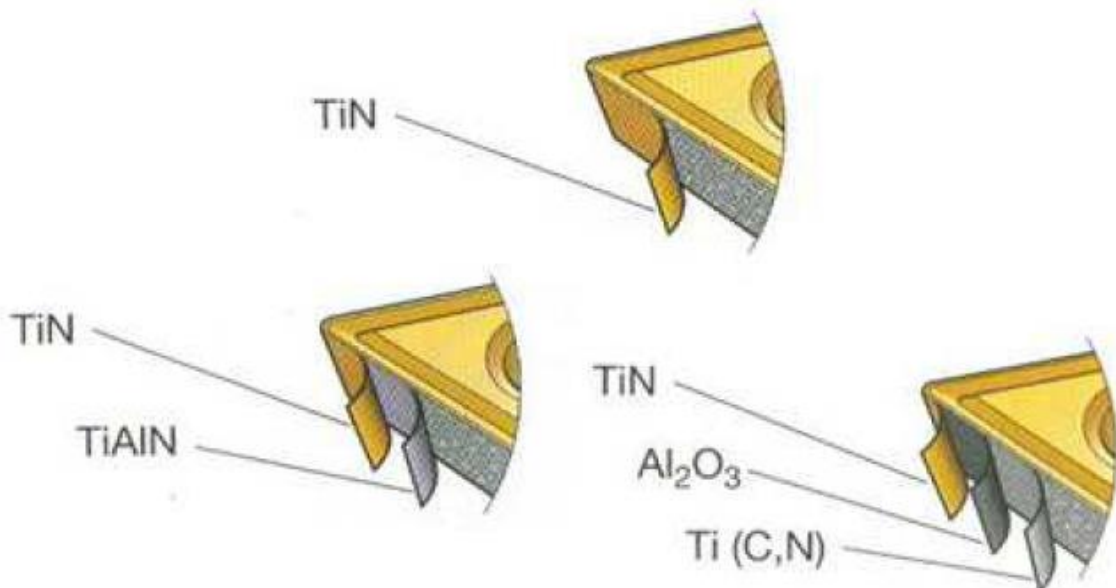
Quadro 1 – A classificação normativa, conforme ISO 513, do metal duro utilizado em ferramentas de corte

P	ISO P = Aços
M	ISO M = Aços inoxidáveis
K	ISO K = Ferros fundidos
N	ISO N = Alumínio e materiais não-ferrosos
S	ISO S = Super ligas resistentes ao calor
H	ISO H = Materiais endurecidos

Fonte: Pernambuco (2014).

- Metal duro revestido: os dois principais processos de recobrimento do metal duro são o PVD (*Physical Vapor Deposition* – Deposição Física a Vapor) e CVD (*Chemical Vapor Deposition* – Deposição Química a Vapor). Eles têm a finalidade de fornecer melhores propriedades às superfícies das ferramentas. Os principais compostos aplicados são Al₂O₃, TiN, TiC, porém existem outros mais específicos menos usados. Os revestimentos podem ser aplicados em camadas únicas ou múltiplas, conforme ilustram as Figuras 15 e 16 a seguir.

Figura 15 – Revestimentos de metal duro



Fonte: Adaptado de Manual técnico de Usinagem Sandvik (2005).

Figura 16 – Fotografia de um revestimento múltiplo de metal duro obtida por MEV



Fonte: Adaptado de Apresentação Técnica Sandvik (2011).

- Cerâmica: produto obtido através da sinterização de pós cerâmicos de diversos elementos químicos. As cerâmicas mais usadas possuem como base Al₂O₃ (alumina) e Si₃N₄ (nitreto de silício). Todas as ferramenta de corte de cerâmica possuem excelente resistência ao desgaste com altas velocidades de corte, o que as tornaria muito atrativas para produção em larga escala, exceto pela baixa resistência a choques mecânicos e de temperatura.

- Cermet: é um metal duro com partículas duras à base de titânio. O nome cermet vem da combinação das palavras cerâmica e metal. Originalmente, os cermets eram compostos de TiC e níquel. Cermets modernos não contêm níquel e possuem uma estrutura projetada de partículas com núcleo de carbonitreto de titânio $Ti(C,N)$, uma segunda fase dura de $(Ti,Nb,W)(C,N)$ e um ligante de cobalto rico em tungstênio. Comparado ao metal duro, o cermet possui melhor resistência ao desgaste e reduzida tendência a abrasão. Por outro lado, ele também possui menos força de compressão e resistência inferior a choques térmicos. Cermets também podem ter cobertura PVD para melhora da resistência ao desgaste
- Nitreto cúbico de boro: conhecido como CBN, é um material com excelente dureza a quente que pode ser usado em velocidades de corte muito altas em ligas ferrosas de elevada dureza. Apresenta também boa tenacidade, resistência a choques térmicos e estabilidade química, o que evita o desgaste por difusão até temperaturas de $1000^{\circ}C$.
- Diamante policristalino: conhecido pela sigla PCD, é um composto de partículas de diamante sinterizado com um ligante metálico. O diamante é o mais duro e, portanto, o mais resistente à abrasão de todos os materiais. Como uma ferramenta de corte, ele tem boa resistência ao desgaste, porém falta estabilidade química em altas temperaturas e se dissolve facilmente em ferros.

2.4 MANDRILAMENTO

O mandrilamento é um processo de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou várias ferramentas de barra. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se deslocam simultaneamente segundo uma trajetória determinada (FERRARESI, 1995).

Também conhecido como mandrilagem ou broqueamento, pode ser cilíndrico, cônico, radial ou esférico. Pelo mandrilamento pode-se conseguir superfícies cilíndricas ou cônicas, internas ou externas, em espaços de difícil acesso a ferramentas convencionais. Os tipos de mandrilamento são definidos a seguir:

- mandrilamento cilíndrico - processo onde a superfície usinada é cilíndrica e o seu eixo de rotação coincide com o da ferramenta;

- mandrilamento cônico - processo onde a superfície usinada é cônica e o seu eixo de rotação coincide com o da ferramenta;

- mandrilamento radial - processo onde a superfície usinada é plana e disposta perpendicularmente ao eixo em torno do qual gira a ferramenta;
- mandrilamento esférico - processo em que a superfície usinada é esférica e o seu eixo de rotação coincide com o da ferramenta.

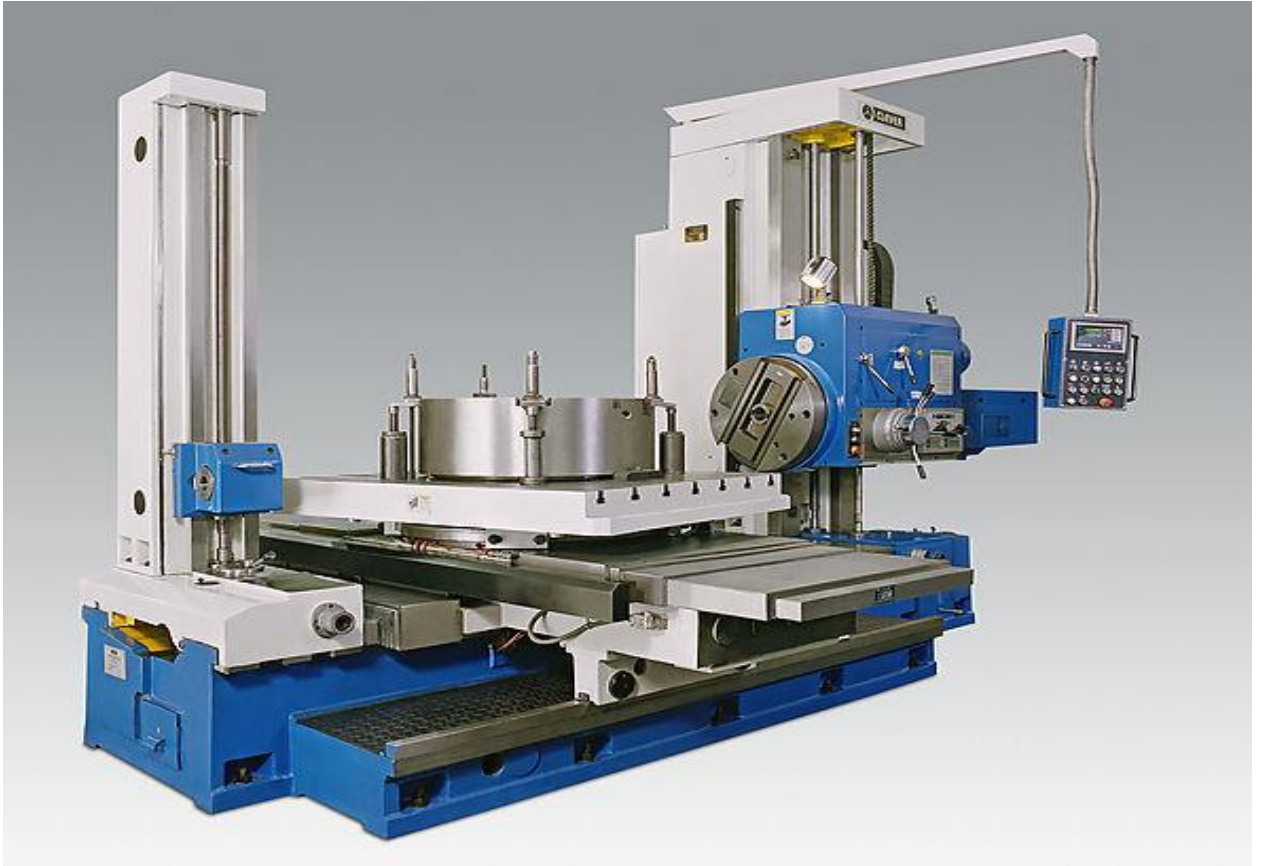
2.4.1 Mandriladoras

Mandriladoras são máquinas muito versáteis que permitem a utilização de diferentes tipos de ferramentas e a execução de diversas operações como: furação, fresamento, rosqueamento, entre outras. As mandriladoras podem ser horizontal ou verticais, de acordo com a posição de seu eixo árvore.

Um grande diferencial das mandriladoras é o fato de possuírem mesas giratórias, o que lhes confere a capacidade de usinar qualquer face vertical de uma peça, bastando apenas ajustar a posição da peça girando a mesa.

Outra grande vantagem, consequente da mesa giratória, é a economia de tempo com o *setup*. Uma mandriladora universal pode executar do começo ao fim, dependendo da peça, todas as operações de usinagem, sem que seja necessário remover a peça da máquina.

Figura 17 – Mandriladora horizontal TPX6111b/3



Fonte: CIMHSA Máquinas Operatrizes (2018).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O palco para os testes desenvolvidos neste trabalho foi a área de usinagem de uma grande indústria siderúrgica brasileira, atuante em 11 países e que detém uma capacidade instalada de 25 milhões de toneladas de aço bruto por ano.

Os estudos se deram entre os anos de 2014 e 2015 durante um projeto acordado entre a empresa e a Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

Após uma análise das operações mais críticas no processo de fabricação de cilindros laminadores, o processo de rosqueamento nas faces dos cilindros foi detectado como deficiente e carente de otimização. A operação foi estudada detalhadamente e testes foram conduzidos afim de se encontrar um ferramental com melhor desempenho que o utilizado na ocasião.

Os testes ocorreram todos no próprio chão da fábrica com os cilindros produzidos para venda, uma vez que a produção de cilindros é ininterrupta, funcionando em três turnos diários, impedindo a parada de máquinas para testes. Por consequência disto, os testes contaram com diversas condições não controladas e influência de diversos fatores como vibrações de máquinas e equipamentos externos ao processo, folgas da máquina, incorreta estocagem do ferramental, entre outros.

Outro revés da condução dos testes nas próprias peças da produção é a não padronização na sequência dos cilindros produzidos, uma vez que quem dita a ordenação da produção é a demanda passada pelos clientes. Um certo tipo de cilindro com certa composição metálica poderia ter dez peças usinadas num único dia como também passar um mês inteiro sem nenhuma peça produzida.

Considerando todos estes fatores, formulou-se uma metodologia para a execução dos testes e também um agrupamento de diferentes produtos – cilindros – com características similares, em relação ao material de fabricação, afim de simplificar a solução proposta.

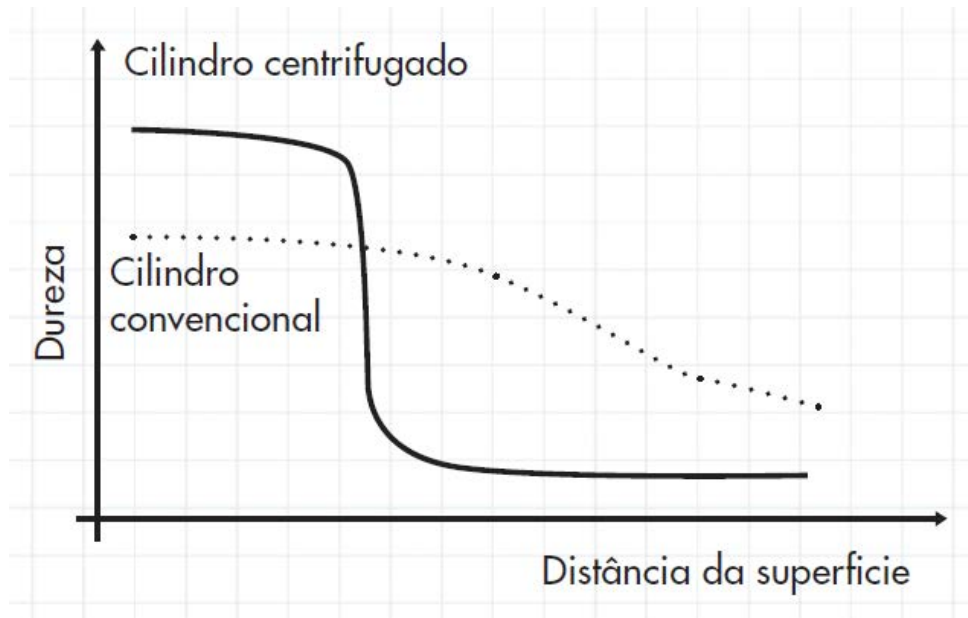
3.1 OS MATERIAIS DOS CILINDROS ESTUDADOS

Os cilindros utilizados nos testes pertencem a dois grupos de produtos: cilindros para laminação de longos e cilindros para laminação de tiras a quente. A descrições destes produtos se encontram nas próximas seções e os informativos com mais detalhes sobre estes grupos, disponibilizados pela empresa, se encontram nos Anexos A e B deste trabalho.

3.1.1 Materiais dos cilindros para laminação de produtos longos

Dentro da aplicação de laminação de produtos longos, existe uma grande variedade de cilindros produzidos pela empresa. Eles podem ser construídos pelo processo de fundição estática, constituídos por apenas um material, ou por fundição centrífuga, onde o cilindro é formado por um núcleo de metal mais tenaz e uma camada externa (camada de trabalho) com metal de maior resistência ao desgaste. A principal diferença entre os dois processos é a dureza, conforme mostra a Figura 18.

Figura 18 – Variação de dureza em função da distância da superfície para cilindros Villares Rolls fabricados por fundição estática ou fundição centrífuga



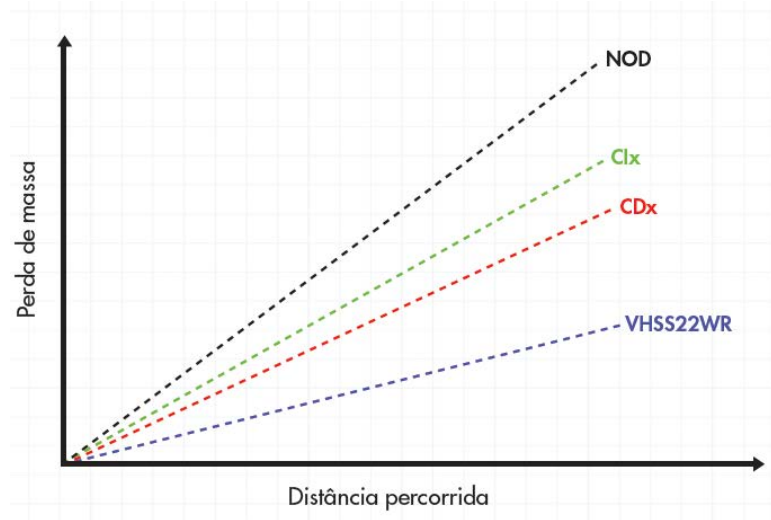
Fonte: Villares Rolls (2018).

Quadro 2 – Composição química nominal (% em peso; balanço em Fe) dos cilindros Villares Rolls para aplicação em laminadores de produtos longos

Composição Química			C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	P	S	V	W
Aço Adamite	VAF16	Mín.	1,40	0,50	0,70	0,50	0,80	0,30	-	-	-	-
		Máx.	1,80	0,70	1,10	1,00	1,20	0,70	0,40	0,015	-	-
	VAF18	Mín.	1,70	0,50	0,40	1,40	1,30	0,10	-	-	-	-
		Máx.	2,00	0,70	0,70	1,90	1,70	0,40	0,04	0,015	-	-
Ferro Fundido Nodular	NODAA	Mín.	3,10	1,60	0,40	1,90	-	0,20	-	-	-	-
		Máx.	3,50	2,20	0,90	2,50	0,20	1,00	0,09	0,025	-	-
	NODE	Mín.	3,10	1,50	0,80	2,10	-	0,70	-	-	-	-
		Máx.	3,40	2,10	1,10	2,40	0,20	1,10	0,09	0,025	-	-
	NODA	Mín.	3,10	1,70	0,30	1,30	0,20	0,10	-	-	-	-
		Máx.	3,40	2,30	0,60	2,10	0,80	0,50	0,09	0,025	-	-
	NODB	Mín.	3,10	1,30	0,30	1,90	0,30	0,10	-	-	-	-
		Máx.	3,40	2,20	0,60	3,20	1,00	0,60	0,09	0,025	-	-
	NODC	Mín.	3,20	1,20	0,30	2,20	0,40	0,20	-	-	-	-
		Máx.	3,50	1,90	0,60	3,40	1,10	0,60	0,09	0,025	-	-
	NODD	Mín.	3,20	1,40	0,40	3,30	0,40	0,40	-	-	-	-
		Máx.	3,50	1,90	0,80	3,70	0,90	0,80	0,09	0,025	-	-
	ACICx	Mín.	3,10	1,10	0,30	3,40	-	0,50	-	-	-	-
		Máx.	3,60	2,20	1,00	4,00	0,30	1,00	0,10	0,025	-	-
Ferro Fundido Indefinido	CI6x	Mín.	3,15	0,65	0,40	2,00	1,00	-	-	-	-	-
		Máx.	3,45	1,05	0,75	2,60	1,45	0,45	-	-	-	-
	CI7x	Mín.	3,20	0,65	0,40	3,10	1,40	-	-	-	-	-
		Máx.	3,50	1,05	0,75	4,20	2,00	0,45	-	-	-	-
	CI8x	Mín.	3,20	0,75	0,40	4,30	1,80	-	-	-	-	-
		Máx.	3,55	1,10	0,75	4,80	2,20	0,45	-	-	-	-
Ferro Fundido Definido	CD7X	Mín.	3,15	0,70	0,40	2,00	1,00	-	-	-	0,50	-
		Máx.	3,50	1,10	0,75	4,20	1,90	0,45	-	-	0,90	-
	CD8x	Mín.	3,25	0,80	0,40	3,80	1,60	-	-	-	0,50	-
		Máx.	3,50	1,10	0,70	4,30	2,00	0,45	-	-	0,90	-
Aço Rápido	VHSS20WR	Mín.	1,20	0,10	0,10	-	5,00	0,50	-	-	2,00	1,00
		Máx.	2,50	1,50	1,00	2,00	15,00	2,50	-	-	10,00	3,00
Aço Forjado	VC8Bx	Mín.	0,50	0,10	0,20	0,10	1,00	0,20	-	-	-	-
		Máx.	1,00	0,30	0,50	0,40	2,00	0,60	0,02	0,020	0,015	-
	SVC45	Mín.	0,35	0,15	0,70	0,45	1,30	0,20	-	-	-	-
		Máx.	0,50	0,35	1,20	0,80	2,00	0,60	0,02	0,020	0,15	-
	SVC50	Mín.	0,50	0,15	0,90	-	1,30	0,20	-	-	-	-
		Máx.	0,80	0,35	1,20	0,45	2,00	0,60	0,02	0,020	0,15	-

Fonte: Villares Rolls (2018).

Figura 19 – Representação esquemática da característica de comportamento ao desgaste para os diversos grupos de materiais



Fonte: Villares Rolls (2018).

3.1.2 Materiais dos cilindros para laminação de tiras a quente

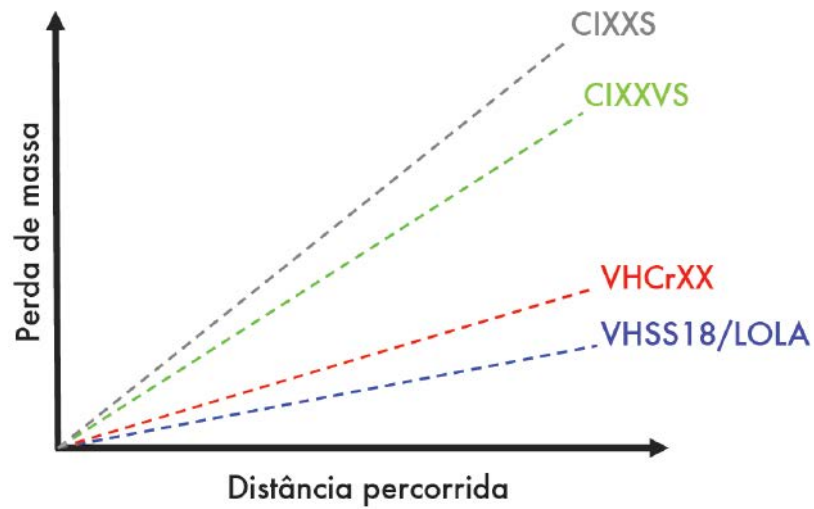
Diferentemente dos cilindros para laminação de produtos longos, o rolos para laminação de tiras a quente são fabricados apenas pelo método de fundição centrífuga.

Quadro 3 – Composição química nominal (% em peso; balanço em Fe) dos cilindros de trabalho Villares Rolls para a laminação de tiras a quente

Composição Química			C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	W	Nb+Ti
Ferro Alto Cromo	VHCRxx (HCl)	Mín.	2,10	0,45	0,80	0,90	14,00	0,90	-	-	-
		Máx.	3,00	0,95	1,30	1,90	18,00	1,90	0,40	-	-
Aço Alto Cromo	VHCR11 (HCS)	Mín.	1,00	0,45	0,50	0,50	8,00	0,90	-	-	-
		Máx.	2,50	1,00	1,50	2,00	16,00	3,00	0,50	0,50	0,50
Aço Rápido	VHSS18/LOLA (HSS)	Mín.	1,00	0,10	0,10	0,50	3,50	0,50	2,00	1,50	-
		Máx.	2,00	1,50	1,00	2,00	8,00	2,50	6,00	4,50	0,40
Ferro Fundido Indefinido	ClxxS (IC)	Mín.	3,00	0,55	0,45	4,10	1,40	0,25	-	-	-
		Máx.	3,60	1,25	1,30	4,80	2,10	0,70	1,50	1,50	3,00
Ferro Fundido Microligado	ClxxVS (IC)	Mín.	2,50	1,00	0,50	3,00	1,00	0,25	-	-	-
		Máx.	3,60	3,00	1,50	5,00	2,50	1,00	1,50	1,50	3,00

Fonte: Villares Rolls (2018).

Figura 20 – Representação esquemática da característica de comportamento ao desgaste para os diversos grupos de materiais

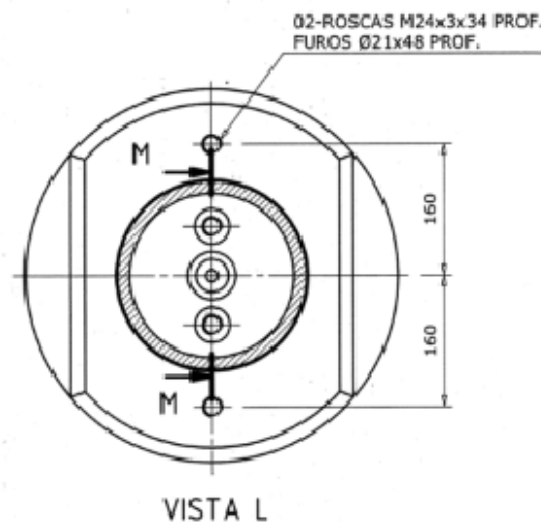


Fonte: Villares Rolls (2018).

3.2 PROCESSO DE ROSQUEAMENTO DOS CILINDROS LAMINADORES

A maior parte das roscas dos cilindros laminadores são usinadas nas faces dos rolos, conforme o exemplo da Figura 21. A operação é feita utilizando-se uma mandriladora, um cabeçote de rosquear, um macho e fluido de corte.

Figura 21 – Vista lateral de um cilindro laminador com duas roscas M24 em sua face



Fonte: Produção do próprio autor.

Fotografia 1 – Cabeçote de rosquear com macho de canal helicoidal



Fonte: Produção do próprio autor.

Essas roscas tem a função de unir os cilindros às árvores dos motores dos laminadores, por isso é de extrema importância que sejam muito bem usinadas e checadas com calibradores passa/não passa para rosca classe ISO 6H.

3.3 AS FERRAMENTAS UTILIZADAS NO PROCESSO

Durante o estudo e mapeamento do processo, foram ouvidos e colhidos diversos relatos dos operadores. Eles relataram que a operação de rosqueamento nas faces de determinados cilindros era um grande problema, pois levava-se muito tempo para executar uma operação que, teoricamente, deveria ser simples e rápida.

A principal causa apontada como raiz desse problema foi o material de alguns cilindros, chamados de “duros” no linguajar dos operadores. A grande variedade de ligas, presentes nos diferentes cilindros usinados no setor, dificultava a usinagem das roscas, uma vez que não existiam ferramentas adequadas para cada tipo de metal dos cilindros.

Em uma análise mais rigorosa do ferramental utilizado pelos operadores, foram encontrados machos de geometrias não compatíveis com a operação executada por eles. Como por exemplo, machos de ponta helicoidal que são desenvolvidos para rosqueamento em furos passantes e estavam sendo utilizados em furos cegos, que são os casos das roscas nas faces dos cilindros.

Um fator em comum entre todos os machos utilizados foi o material de fabricação. Todas as ferramentas eram compostas de HSS sem recobrimento algum. Esta situação mostrou o descaso da empresa com a operação, uma vez que o mercado de ferramentas, na

época, já oferecia uma série de diferentes materiais e recobrimentos para usinagem de metais específicos.

Outro caso que chamou a atenção foi a utilização de machos manuais nas mandriladoras. Quando questionados, os operadores informaram que algumas ligas apresentavam usinabilidade tão ruim a ponto de ser necessário o uso dos machos manuais, já que estes escalonavam a usinagem da rosca em 3 etapas. Isto evitava também a possível quebra do macho dentro do furo, problema que ocorria com certa frequência e que demandava um longo tempo para ser solucionado.

Uma solução encontrada pelos operadores para viabilizar o rosqueamento das ligas mais duras foi aumentar os canais dos machos utilizando um esmeril, processo que chamavam de “rebaixamento” do macho. Este procedimento diminui a largura dos filetes de rosca dos machos e, pelo que relataram os operadores, diminui o atrito entre a ferramenta e a peça.

A Fotografia 2 mostra um exemplo de macho que sofreu o processo de rebaixamento dos canais utilizando-se um esmeril.

Fotografia 2 – Macho modificado com os canais esmerilhados



Fonte: Produção do próprio autor.

3.4 A MÁQUINA UTILIZADA NO PROCESSO

A etapa de rosqueamento dos cilindros laminadores é executada em uma mandriladora horizontal da marca SHW modelo UFZ 6L com 32 kW de potência e capacidade para até 5000 RPM e 3000 mm/min de avanço.

A aplicação de fluido de corte é feita manualmente pelo operador.

Fotografia 3 – Mandriladora horizontal SHW realizando operação de furação



Fonte: Produção do próprio autor.

3.5 OS PARÂMETROS DE CORTE

Em uma operação de rosqueamento, o avanço da ferramenta v_f é uma relação direta entre o número de rotações da mesma e o passo da rosca p , podendo ser expresso da seguinte forma: $v_f = RPM \times p$.

Sendo o passo da rosca métrica padronizado pelo SI, resta ao operador selecionar a correta rotação para cada tipo de material a ser usinado. O número de RPM padronizado pela

área técnica da empresa se encontra entre 40, para materiais duros, até 60, para materiais macios.

3.6 O MÉTODO DEFINIDO PARA OS ENSAIOS

Devido ao grande número de variáveis do processo como: diferentes dimensões de roscas, diferentes ligas de cilindros e o fato dos testes terem de ser conduzidos nas próprias peças da produção, foi decidido que os parâmetros e procedimentos da operação seriam mantidos, restando apenas a vida das ferramentas como parâmetro a ser avaliado e comparado.

Como medida de comparação da vida das ferramentas, utilizamos o comprimento total de rosca usinada por cada macho.

Em um estudo da produção realizada em anos anteriores, chegou-se à conclusão que as roscas M24 e M30 eram as mais usinadas nos cilindros. Por isso, o projeto se focou no acompanhamento de machos para roscas métricas M24 e M30 padronizadas pelo SI. Isso significa: roscas de 24mm de diâmetro nominal com 3mm de passo entre os filetes e 30mm de diâmetro nominal com 3,5mm de passo entre os filetes, respectivamente.

Inicialmente foram testadas as ferramentas atuais do processo, ou seja, as ferramentas que habitualmente eram disponibilizadas para a produção. Os dados de comprimento máximo usinado destes machos foram tomados.

Posteriormente era hora de testar novas ferramentas do mercado. Para isso, entrou-se em contato com empresas fornecedoras de ferramentas de renome no mercado e foram solicitadas visitas técnicas, afim de apresentar a operação *in loco*. Os técnicos das empresas apresentaram as ferramentas mais indicadas para o processo e disponibilizaram-nas para os testes.

Para o controle dos dados coletados durante os testes, foi desenvolvida uma ficha de acompanhamento de teste, conforme Fotografia 4. Nela foram anotadas informações referentes as ferramentas testadas, roscas produzidas e material usinado para serem usadas em comparações e estudos de desempenho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente foram testadas as ferramentas comumente disponibilizadas aos operadores – dois machos da marca OSG, construídos em aço rápido, com canal helicoidal e sem recobrimento nenhum – OSG HSS SFT (Fotografia 5). Os machos usinaram diversas roscas que posteriormente foram verificadas com calibrador passa/não passa. A partir do momento que o calibrador não passou, aquela ferramenta foi sinalizada como tendo sua vida finalizada e o comprimento das roscas verificadas como aprovadas foram somados.

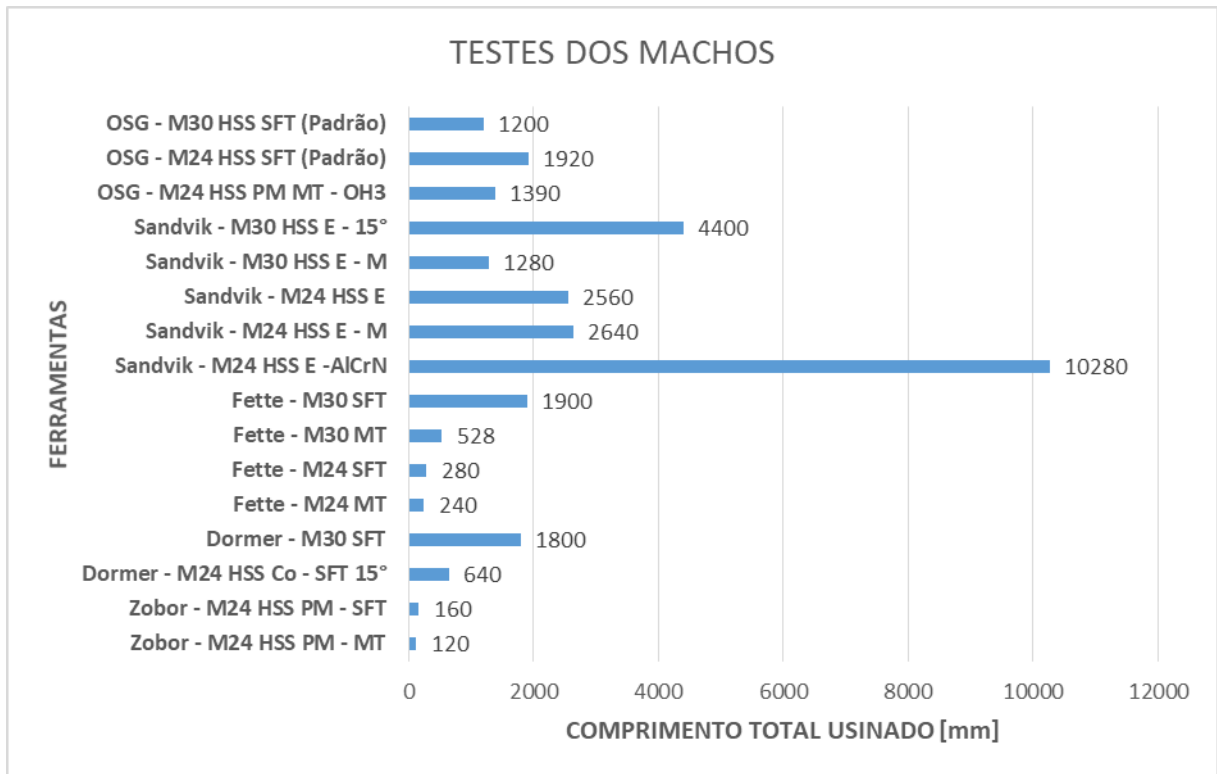
Fotografia 5 – Macho padrão OSG HSS SFT



Fonte: Produção do próprio autor.

Em seguida, foram testadas as ferramentas cedidas pelos fabricantes, seguindo o mesmo método que as ferramentas anteriores. A medida que eram testadas em diferentes materiais e obtiam bons resultados, estas ferramentas eram sinalizadas e testadas somente naquele mesmo tipo de material, para que pudessem obter o maior desempenho possível.

Figura 22 – Testes dos machos



Fonte: Produção do próprio autor.

De acordo com o desempenho das ferramentas durante os testes, criou-se a necessidade da definição de 3 grupos de materiais com características de usinabilidade similares. A decisão foi tomada afim de aproveitar as qualidades de cada ferramenta que apresentaram bom desempenho em determinadas ligas e desempenho insatisfatório nas demais.

Tabela 4 – Definição dos grupos de ligas metálicas

	Grupo 1 - CIxx	Grupo 2 - VHSSxx	Grupo 3 - NODx
Ligas	CIxxS	VHCRxx	NODAA
	CIxxVS	VHCR11	NODE
	CI6x	VHSS18	NODA
	CI7x	VC88x	NODB
	CI8x	SVC45	NODC
	CD7x	SVC50	NODD
	CD8x	VAF16 VAF18	ACICx
Características	Ferros fundidos indefinidos, definidos e microligados	Aços rápidos, alto cromo, adamite, forjado e ferro fundido alto cromo	Ferros fundidos nodulares

Fonte: Produção do próprio autor.

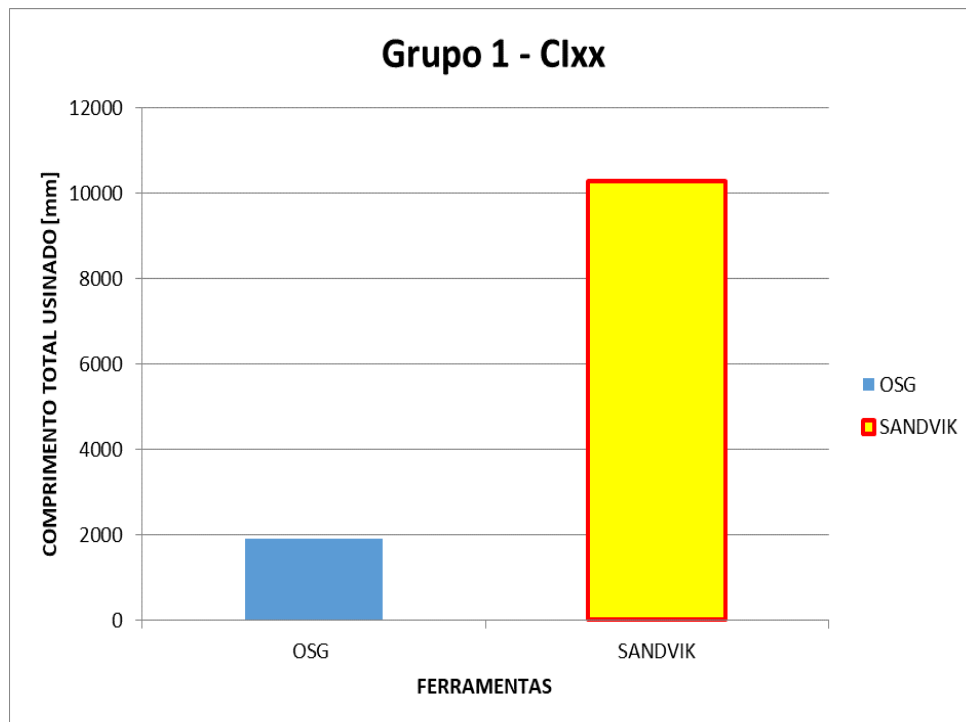
Para o Grupo 1 - Clxx, a ferramenta que apresentou melhor desempenho foi o macho HSS E – AlCrN da empresa Sandvik (Fotografia 6). A ferramenta é constituída de aço rápido com alto teor de vanádio (indicado pela letra E) e recobrimento de nitreto de cromo alumínio, também conhecido como Alcrona.

Fotografia 6 – Macho Sandvik HSS E - AlCrN



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 23 – Desempenho dos machos para o Grupo 1 - Clxx



Fonte: Produção do próprio autor.

Enquanto a o macho padrão OSG HSS SFT apresentou 1920 mm de vida, o Sandvik HSS E – AlCrN rosqueou 10280 mm, representando um rendimento de 535% em relação a primeira ferramenta.

Considerando que ambas as ferramentas apresentam a mesma geometria de canal espiral e foram utilizadas com os mesmos parâmetros de corte, atribui-se este excelente desempenho ao fato do alto teor de vanádio, que confere maior resistência a ferramenta e também ao revestimento AlCrN que confere resistência à oxidação e dureza a quente à ferramenta, tornando-a também resistente à abrasão.

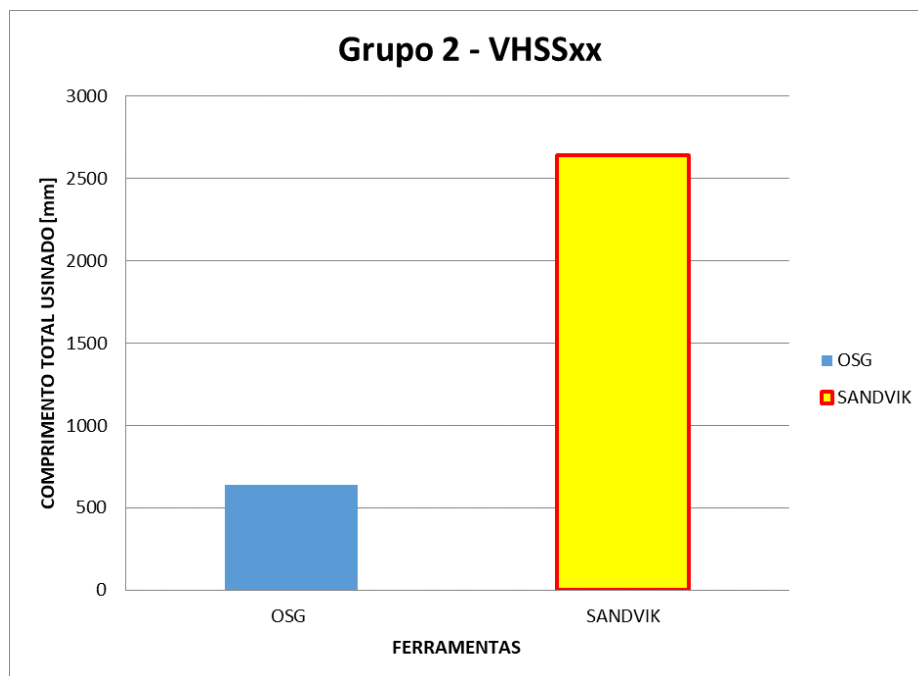
Para o Grupo 2 – VHSSxx, o macho com maior desempenho apresentado foi o HSS E – M, também da empresa Sandvik. Uma ferramenta de aço rápido com alto teor de vanádio e revestimento PVD Fe.

Fotografia 7 – Macho Sandvik HSS E - M



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 24 – Desempenho dos machos para o Grupo 2 - VHSSxx



Fonte: Produção do próprio autor.

A ferramenta Sandvik HSS E – M apresentou uma vida de 2640 mm enquanto a ferramenta padrão OSG HSS SFT apenas 640 mm, representando um rendimento de 413%.

Da mesma forma que no grupo 1, as ferramentas testadas possuem a mesma geometria e trabalharam com os mesmos parâmetros de corte. Portanto, além do alto teor de vanádio para aumento da resistência, o revestimento da ferramenta mais uma vez foi responsável pelo aumento do desempenho. A adição de uma camada de Fe por deposição física de vapor – PVD – mostrou-se muito efetiva na usinagem de aços rápidos com diferentes elementos de liga.

No último grupo, composto pelas ligas de ferro fundido nodular, a ferramenta padrão utilizada pelos operadores era um macho manual OSG canal reto, o qual necessitava do processo de “rebaixamento” mostrado no Fotografia 2. Sem essa modificação, o desempenho da ferramenta era insuficiente para a usinagem de roscas em ligas NODx.

Mesmo com essa customização, a ferramenta apresentou apenas 160 mm de comprimento de rosca usinada. Enquanto a ferramenta testada – OSG HSS PM MT OH3 – rosqueou 1390 mm e obteve um rendimento de impressionantes 869%.

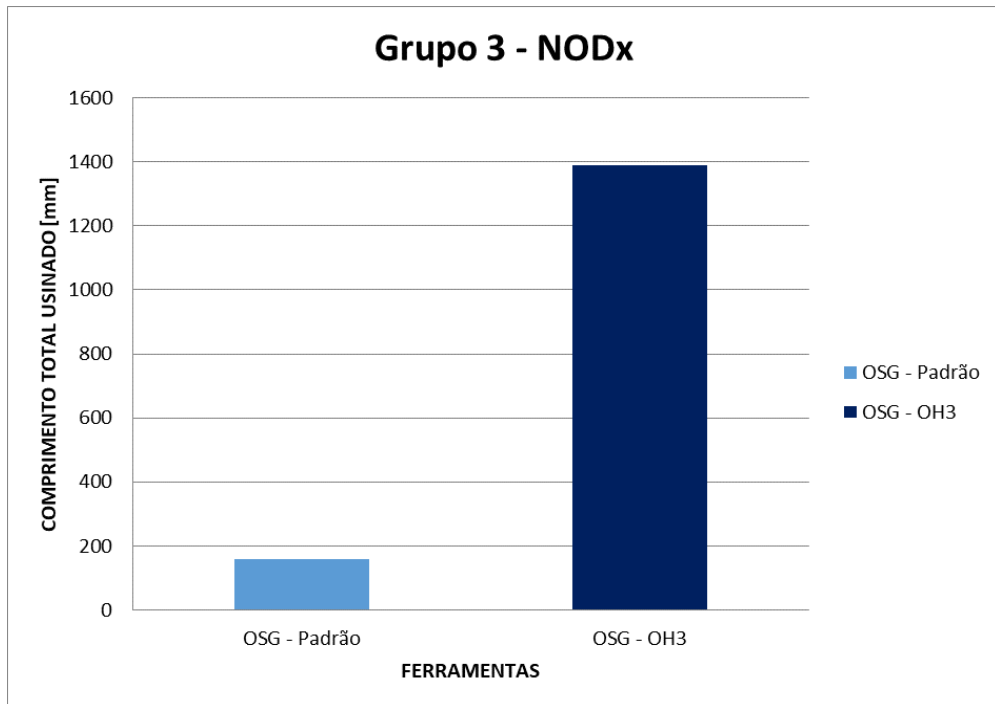
Fotografia 8 – Macho OSG HSS PM MT - OH3



Fonte: Produção do próprio autor.

O alto desempenho desta ferramenta se deve a sua construção através da metalurgia do pó. As ferramentas da linha CPM da OSG são especialmente desenvolvidas em aço sinterizado e possuem geometria especial para trabalhos realizados em condições severas e em altas durezas. São indicadas para aplicação em aços ferramenta e ferro fundido nodular com durezas de até 45 HRC.

Figura 25 – Desempenho dos machos para o Grupo 3 - NODx



Fonte: Produção do próprio autor.

Esta ferramenta foi sugerida por um dos operadores que no passado já a havia testado. A ferramenta para o teste teve de ser importada do Japão pois não era vendida no mercado nacional.

Além do benefício de uma vida muito mais longa, a ferramenta OSG HSS PM MT - OH3 permite que a empresa economize o tempo de customização que a ferramenta padrão demanda e o tempo de *setup* gasto com ela durante as frequentes trocas de macho, já que a vida da ferramenta rebaixada é muito curta.

Somada a isso ainda está a grande vantagem de se evitar que o macho quebre dentro dos furos. Uma vez que a ferramenta rebaixada apresenta todas estas desvantagens, os operadores comumente levavam o uso dela ao limite e frequentemente à fratura. Tal evento demanda um longo período de trabalho para retirada da ferramenta de dentro do furo, no qual a máquina também passa a estar indisponível para produção.

5 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi atingido, tendo sido otimizada com excelência a operação de rosqueamento com machos nos cilindros de laminação fundidos.

Com a utilização de novas ferramentas, dotadas de melhores propriedades tecnológicas, e também direcionando-as a grupos específicos de materiais, pôde-se estender o uso dos machos por um período notavelmente maior (pelo menos quatro vezes maior), antes que estes se tornassem inservíveis.

O recobrimento AlCrN, conhecido como Alcrona, mostrou-se extremamente efetivo quando aplicado a Fofó definido, indefinido e microligado, apresentando um aumento de rendimento de mais de quatro vezes em relação à ferramenta padrão.

A adição de alto teor de vanádio na constituição dos HSS das ferramentas resultou num aumento significativo da resistência delas.

O macho OSG HSS PM MT - OH3 confirmou que ferramentas de aço rápido sinterizado possuem desempenho muito maior que ferramentas produzidas por outros métodos, pois foi a única ferramenta capaz de rosquear os materiais do Grupo 3, que eram um grande obstáculo para a produção.

Fez-se necessária, após finalizados os testes, a implementação de medidas de acompanhamento, padronização e organização do novo processo, para que os ganhos obtidos com as novas ferramentas não desaparecessem com o tempo. Tais medidas incluíram treinamentos para os operadores, dispositivos no modelo Kanban para o armazenamento e completa disponibilidade do novo ferramental, além de inclusão das mesmas no sistema digital de ferramentas.

Por fim, fica evidente que uma operação que não recebe a atenção devida pela empresa, se torna obsoleta e passa a ser o gargalo da produção. Mesmo se tratando de simples análises e testes, este estudo provou ser capaz de otimizar a operação em números excelentes, apenas trazendo e implementando ferramentas que estão à disposição no mercado.

REFERÊNCIAS

ABAL. **Associação Brasileira do Alumínio.** Disponível em: <<http://abal.org.br/aluminio/processos-de-producao/laminacao/#accordion2>>. Acesso em: 05 set. 2018.

AÇO BRASIL. **Instituto Aço Brasil.** Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site2015/estatisticas.asp>>. Acesso em: 05 set. 2018.

CIMM. **Centro de Informação Metal Mecânica.** Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6476%E2%80%90laminadores#.W5CIwbnZPY>. Acesso em: 05 set. 2018.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos.** 6. ed. São Paulo: ABM, 1988.

CORNÉLIO, G. T. **Relatório Técnico nº 05/10 - Estudo de planicidade em laminadores de tiras a quente.** Gerdau: 2010.

BRUNO PETERSON CUNHA. **Desandadores** Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABayMAB/desandadores>>. Acesso em: 14 set. 2018.

AGUADO MÁQUINAS E FERRAMENTAS. **Jogo de machos manual 3 peças M5 x 0,8 HTOM 37010.** Disponível em: < <https://www.aguadoferramentas.com.br/produto/628/machos/produto/jogo-de-macho-manual-3-pecas-m5-x-080-htom-37010> >. Acesso em: 14 set. 2018.

DIETER, JR. G. E. **Mechanical metallurgy.** New York: McGraw-Hill Book Company, 1961.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais.** Editora Edgard Blucher LTDA, 1995.

SANDVIK. **Sandvik Coromant.** Disponível em: < https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/industrysolutions/small_part_machining/threading/pages/default.aspx>. Acesso em: 14 set. 2018.

AMATOOLS. **Machos máquina.** Disponível em: < https://www.amatools.com.br/html/amatools_spa/produtos/Rocast/rocast_machos_maquina.html >. Acesso em: 16 set. 2018.

GERDAU. **Cilindros para Laminação de longos.** Disponível em:

<<https://www.gerdau.com/gerdausummit/pt/produtos/cilindros-de-laminacao#>>. Acesso em: 16 set. 2018.

MEHROTRA, P. K. **Applications of ceramic cutting tools.** Key engineering materials. Switzerland: TransTech Publications, v. 138, 1998.

ROLLS, VILARES. **Cilindros para Laminação de tiras a quente**. Disponível em: <<https://www.yumpu.com/pt/document/view/14321767/tiras-a-quente-villares-rolls>>. Acesso em: 16 set. 2018.

ROLLS, VILARES. **Cilindros para Laminação de longos**. Disponível em: <<https://www.yumpu.com/pt/document/view/14321775/cilindros-para-laminadores-de-produtos-longos-villares-rolls>>. Acesso em: 16 set. 2018.

OSG. **Catálogo de Produtos 2012-2013 OSG Sulamericana**. Disponível em: <www.osg.com.br/v4/fotos/download/Catalogo_Produtos_OSG_2012.pdf>. Acesso em: 16 set. 2018.

PERNAMBUCO, L. R. A. **Avaliação da usinabilidade de cilindros para laminação de tiras a quente**. 2014. 108 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá 2014.

ROBERTS, W. L.; ROBERTS, C. D. **Mechanical principles of rolling processes**. In: *Rolls for the metalworking industries*. Warrendale. 2002. p. 215-265.

SHEN, C. **Performace e aplicações de ferramentas com revestimentos finos por CVD**. Switzerland: Trans Tech Publicantions, v. 138, 1998.

TESTMAT. **Tabela Elementos de Liga – Aços**. Disponível em: <<http://www.testmat.com.br/blog/2015/08/03/efeito-elementos-liga-tratamento-termico/>>. Acesso em: 12 set. 2018.

TSURUDA, T. K. **Influência do pré-furo na resistência à tração de roscas fabricadas com macho de corte em máquina CNC**. In: *IV SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA*. 2010, Goiânia. IFG - Instituto Federal de Goiás – Campus Goiânia. 2010.

VIANELLO, P. I. A. et al. Análise e comparação do torque filete a filete no rosqueamento interno por machos de corte. **Acta mechanica et mobilitatem**, Belo Horizonte, v. 3, n. 6, p. 14-18, mar. 2018.

CIMHSA. **Máquinas Operatrizes**. Disponível em: <<http://www.cimhsa.com.br/por/p/product/product/produtos/33/mandriladora-tpx6111b3.htm>>. Acesso em: 17 set. 2018.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

COELHO, R. T. et al. **Usinagem em altíssimas velocidades: como conceitos HSM/HSC podem revolucionar a indústria metal-mecânica.** São Paulo: Editora Érica Ltda, 2003.

VERGINELLI, R. M. **Otimização de processo de desbaste em usinagem de cilindros de trabalho para laminação de tiras a frio.** 2015. 68 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ANEXO A – Informativo Villares Rolls – Cilindros para Laminação de Longos

CILINDROS PARA LAMINAÇÃO DE LONGOS



APLICAÇÃO

Existe uma grande variedade de cilindros Villares Rolls comercializados para a aplicação em laminadores de Produtos Longos. Estes cilindros podem ser fabricados por processo de fundição estática, em que são constituídos por um único material ou fundição centrífuga, em que a camada mais externa do cilindro (camada de trabalho) proporciona a resistência ao desgaste necessária para que o cilindro apresente elevado rendimento, enquanto o núcleo e pescoços proporcionam uma combinação entre tenacidade e resistência mecânica. A principal diferença entre os dois processos é a característica de dureza, como mostra a figura 1.



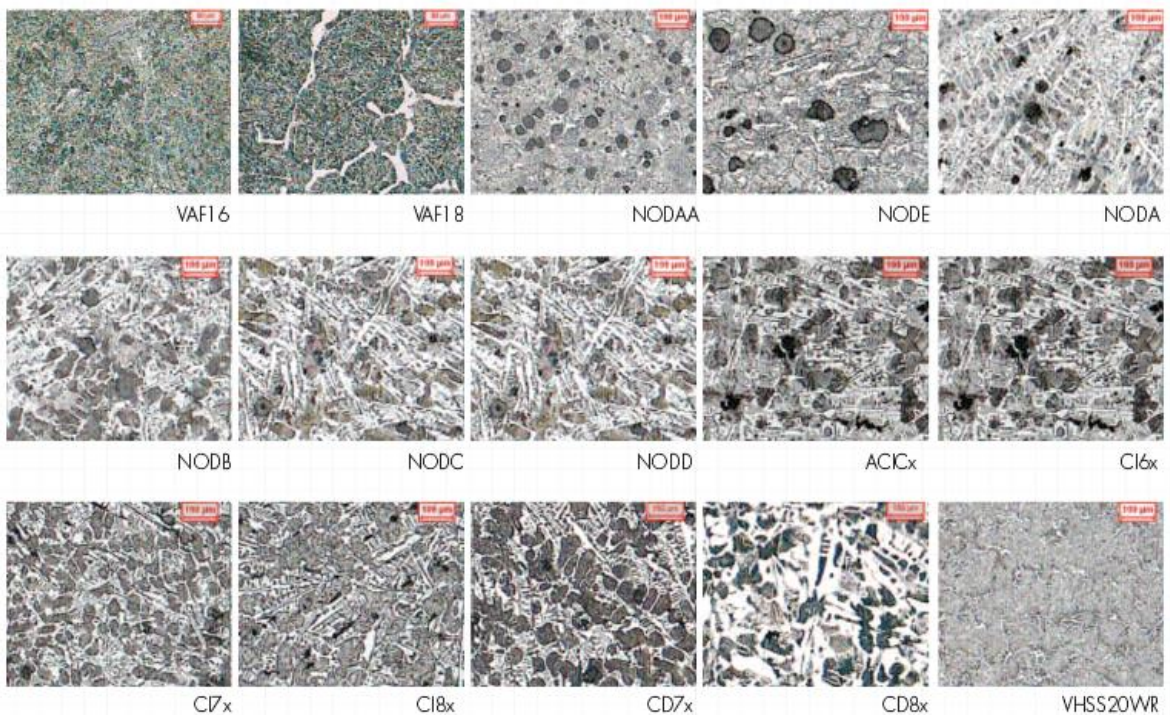
Figura 1: Variação de dureza em função da distância da superfície para cilindros Villares Rolls fabricados por fundição estática ou fundição centrífuga.

As propriedades necessárias ao cilindro de laminação dependem de características típicas do processo de laminação, tais como: taxa de redução do produto, dimensões do tarugo, eficiência da refrigeração, tipo de cadeira, diâmetro do cilindro e cadeira em que o cilindro trabalha.

Tabela 1 Composição química nominal (% em peso; balanço em Fe) dos cilindros Villares Rolls para aplicação em laminadores de produtos longos.

Composição Química		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	P	S	V	W	
Aço Adamite	VAF16	Mín.	1,40	0,50	0,70	0,50	0,80	0,30	-	-	-	-
		Máx.	1,80	0,70	1,10	1,00	1,20	0,70	0,40	0,015	-	-
	VAF18	Mín.	1,70	0,50	0,40	1,40	1,30	0,10	-	-	-	-
		Máx.	2,00	0,70	0,70	1,90	1,70	0,40	0,04	0,015	-	-
Ferro Fundido Nodular	NODAA	Mín.	3,10	1,60	0,40	1,90	-	0,20	-	-	-	-
		Máx.	3,50	2,20	0,90	2,50	0,20	1,00	0,09	0,025	-	-
	NODE	Mín.	3,10	1,50	0,80	2,10	-	0,70	-	-	-	-
		Máx.	3,40	2,10	1,10	2,40	0,20	1,10	0,09	0,025	-	-
	NODA	Mín.	3,10	1,70	0,30	1,30	0,20	0,10	-	-	-	-
		Máx.	3,40	2,30	0,60	2,10	0,80	0,50	0,09	0,025	-	-
	NOCDB	Mín.	3,10	1,30	0,30	1,90	0,30	0,10	-	-	-	-
		Máx.	3,40	2,20	0,60	3,20	1,00	0,60	0,09	0,025	-	-
	NODC	Mín.	3,20	1,20	0,30	2,20	0,40	0,20	-	-	-	-
		Máx.	3,50	1,90	0,60	3,40	1,10	0,60	0,09	0,025	-	-
	NODD	Mín.	3,20	1,40	0,40	3,30	0,40	0,40	-	-	-	-
		Máx.	3,50	1,90	0,80	3,70	0,90	0,80	0,09	0,025	-	-
	ACICx	Mín.	3,10	1,10	0,30	3,40	-	0,50	-	-	-	-
		Máx.	3,60	2,20	1,00	4,00	0,30	1,00	0,10	0,025	-	-
Ferro Fundido Indefinido	C16x	Mín.	3,15	0,65	0,40	2,00	1,00	-	-	-	-	-
		Máx.	3,45	1,05	0,75	2,60	1,45	0,45	-	-	-	-
	C17x	Mín.	3,20	0,65	0,40	3,10	1,40	-	-	-	-	-
		Máx.	3,50	1,05	0,75	4,20	2,00	0,45	-	-	-	-
	C18x	Mín.	3,20	0,75	0,40	4,30	1,80	-	-	-	-	-
		Máx.	3,55	1,10	0,75	4,80	2,20	0,45	-	-	-	-
Ferro Fundido Definido	CD7X	Mín.	3,15	0,70	0,40	2,00	1,00	-	-	-	0,50	-
		Máx.	3,50	1,10	0,75	4,20	1,90	0,45	-	-	0,90	-
	CD8x	Mín.	3,25	0,80	0,40	3,80	1,60	-	-	-	0,50	-
		Máx.	3,50	1,10	0,70	4,30	2,00	0,45	-	-	0,90	-
Aço Rápido	VHSS20VR	Mín.	1,20	0,10	0,10	-	5,00	0,50	-	-	2,00	1,00
		Máx.	2,50	1,50	1,00	2,00	15,00	2,50	-	-	10,00	3,00
Aço Forjado	VC8Bx	Mín.	0,50	0,10	0,20	0,10	1,00	0,20	-	-	-	-
		Máx.	1,00	0,30	0,50	0,40	2,00	0,60	0,02	0,020	0,015	-
	SVC45	Mín.	0,35	0,15	0,70	0,45	1,30	0,20	-	-	-	-
		Máx.	0,50	0,35	1,20	0,80	2,00	0,60	0,02	0,020	0,15	-
	SVC50	Mín.	0,50	0,15	0,90	-	1,30	0,20	-	-	-	-
		Máx.	0,80	0,35	1,20	0,45	2,00	0,60	0,02	0,020	0,15	-

Figura 2 Mostra a microestrutura representativa dos cilindros Villares Rolls para a laminação de produtos longos.



Microestrutura representativa dos produtos Villares Rolls

A escolha do produto depende de uma análise das características do processo de laminação que exigirá dos cilindros os seguintes requisitos i/ resistência mecânica, ii/ resistência ao desgaste, iii) resistência à fadiga térmica e oxidação e iv) resistência à adesão.

Cadeiras Blooming

- Para as cadeiras com maiores solicitações a resistência mecânica, recomenda-se as linhas de cilindros forjados VC8Bx e SVCxx, os quais podem ser fabricados com os canais esboçados no processo de forjamento, oferecendo maior resistência ao desgaste para o cilindro.
- Nas cadeiras com menores solicitações, recomenda-se produtos da linha de Ferro Fundido Nodular como NODAA e NODE.

Cadeiras Desbastadoras

- Para laminadores de menor estabilidade, recomenda-se o uso de VAF16, VAF18 e NODAA, que apresentam boa resistência à fadiga térmica associada a uma adequada tenacidade.
- Para laminadores de elevada estabilidade, com refrigeração eficiente e condições operacionais de menor criticidade (menores reduções, tarugos menores e/ou diâmetro maior dos cilindros), recomenda-se a utilização de NODE, NODA e NODB.

Cadeiras Intermediárias

- Para laminadores de elevada estabilidade, com refrigeração eficiente, recomenda-se a utilização de ACICx, que apresentam elevada dureza da matriz.
- Para laminadores de menor estabilidade, recomenda-se o uso de NODA, NODB e NODC, que apresentam equilíbrio entre resistência a desgaste e tenacidade.

Cadeiras Acabadoras – Fio máquina

- Para laminadores de elevada estabilidade, com refrigeração eficiente, recomenda-se a utilização de produtos centrifugados como o Cl8x e VHSS20R.
- Para laminadores de menor estabilidade, recomenda-se o uso de produtos centrifugados como o Cl6x e Cl7x, que apresentam elevada resistência a desgaste, mas mantém tenacidade.

Cadeiras Acabadoras – Perfis

- Para laminadores de elevada estabilidade, com refrigeração eficiente, recomenda-se a utilização de ACICx.
- Para laminadores de menor estabilidade, recomenda-se o uso de NODC.
- Para a laminação de grandes perfis (acima de 4") recomenda-se a linha de cilindros Adamite (VAF), atendendo a maiores exigências mecânicas durante o processo de laminação.

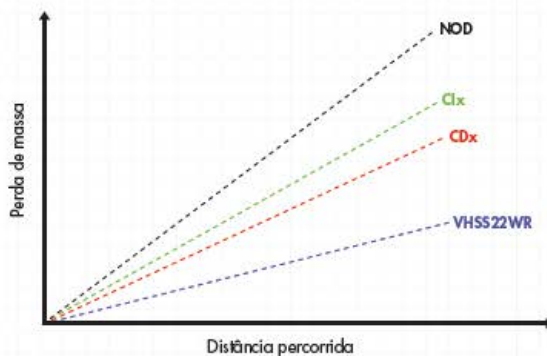
SOLICITAÇÕES NOS CILINDROS DURANTE PROCESSO DE LAMINAÇÃO

Os principais requisitos de um cilindro para a laminação de produtos longos são: i/ resistência mecânica, ii/ resistência ao desgaste e iii) resistência à fadiga térmica e oxidação.

Para avaliar o desempenho dos cilindros durante a aplicação, são conduzidos estudos que consistem na caracterização da superfície de degradação dos cilindros após laminação (figura 3).



Figura 3 Superfície típica de desgaste de cilindros após laminação num laminador de longos contínuo de 15 cadeiras.



DESEMPENHO DOS CILINDROS

São conduzidos estudos laboratoriais para avaliar o desempenho dos produtos sob determinadas solicitações. Os principais ensaios utilizados para avaliar produtos oferecidos para a laminação de produtos longos são i/ ensaio do tipo pino-sobre-lixa (figura 4), ii/ ensaio de fadiga térmica e iii) ensaio de oxidação.

Figura 4 Representação esquemática da característica de comportamento ao desgaste para os diversos grupos de materiais.

Tabela 2 Propriedades comparativas dos materiais dos cilindros para a laminação de produtos longos.

Propriedades/Material	Tenacidade	Resistência a fadiga térmica	Resistência ao desgaste
Aço Forjado	↑↑↑↑↑	↑↑↑↑↑	↑
Aço Adamite	↑↑↑↑	↑↑↑↑	↑↑
Ferro fundido modular	↑↑↑	↑↑↑	↑↑
Ferro fundido indefinido	↑↑	↑↑	↑↑↑
Ferro fundido definido	↑↑	↑↑	↑↑↑
Aço rápido	↑↑	↑↑	↑↑↑↑

A tabela 2 mostra as propriedades comparativas dos materiais utilizados na fabricação dos cilindros para a laminação de produtos longos.

PROPRIEDADES MECÂNICAS

A tabela 3 apresenta as principais propriedades mecânicas dos diversos grupos de produtos Villares Rolls destinados à laminação de produtos longos.

Tabela 3 Propriedades mecânicas dos cilindros Villares Rolls

Produto		Dureza (LD)		Resistência a Tração (Mpa)
Aço Adamite	VAF16	Mín.	585	800
		Máx.	655	1050
	VAF18	Mín.	585	500
		Máx.	655	600
Ferro Fundido Nodular	NODAA	Mín.	555	600
		Máx.	620	850
	NODE	Mín.	645	400
		Máx.	675	550
	NODA	Mín.	635	350
		Máx.	685	500
	NODB	Mín.	670	350
		Máx.	715	500
	NODC	Mín.	695	350
		Máx.	745	500
	NODD	Mín.	735	350
		Máx.	785	500
ACICx	Mín.	685	350	
	Máx.	745	500	
Ferro Fundido Indefinido	CI6x	Mín.	690	300
		Máx.	760	450
	CI7x	Mín.	750	350
		Máx.	800	500
	CI8x	Mín.	770	350
		Máx.	820	500
Ferro Fundido Definido	CD7X	Mín.	710	300
		Máx.	800	450
	CD8x	Mín.	800	300
		Máx.	830	450
Aço Rápido	VHSS20WR	Mín.	780	900
		Máx.	835	1150
Aço Forjado	VC8Bx	Mín.	550	1200
		Máx.	655	1450
	SVC45	Mín.	520	750
		Máx.	590	1000
	SVC50	Mín.	550	950
		Máx.	630	1250
Núcleo	Cinzento	Mín.	500	~ 200
		Máx.	615	
Núcleo	Nodular	Mín.	500	~ 400
		Máx.	615	

Fonte: Villares Rolls (2018).

ANEXO B – Informativo Villares Rolls – Cilindros para Laminação de Tiras a Quente

CILINDROS PARA LAMINAÇÃO DE TIRAS A QUENTE



APLICAÇÃO

Uma ampla gama de cilindros Villares Rolls são comercializados para atender as mais diversas propriedades necessárias, em relação à aplicação dos produtos nos processos de laminação. A tabela 1 apresenta a composição química destes produtos (tabela 1). Os cilindros são fabricados por processo de fundição centrifugada. A camada externa do cilindro (camada de trabalho) proporciona resistência ao desgaste, enquanto as camadas subseqüentes (núcleo) proporcionam uma combinação entre tenacidade e resistência mecânica, características necessárias para que o cilindro suporte os esforços de laminação.

Tabela 1 Composição química nominal (% em peso; balanço em Fe) dos cilindros de trabalho Villares Rolls para a laminação de tiras a quente.

Composição Química			C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	W	Nb+Ti
Ferro Alto Cromo	VHCRxx (HCl)	Mín.	2,10	0,45	0,80	0,90	14,00	0,90	-	-	-
		Máx.	3,00	0,95	1,30	1,90	18,00	1,90	0,40	-	-
Aço Alto Cromo	VHCR11 (HCS)	Mín.	1,00	0,45	0,50	0,50	8,00	0,90	-	-	-
		Máx.	2,50	1,00	1,50	2,00	16,00	3,00	0,50	0,50	0,50
Aço Rápido	VHSS18/LOLA (HSS)	Mín.	1,00	0,10	0,10	0,50	3,50	0,50	2,00	1,50	-
		Máx.	2,00	1,50	1,00	2,00	8,00	2,50	6,00	4,50	0,40
Ferro Fundido Indefinido	ClxxS (IC)	Mín.	3,00	0,55	0,45	4,10	1,40	0,25	-	-	-
		Máx.	3,60	1,25	1,30	4,80	2,10	0,70	1,50	1,50	3,00
Ferro Fundido Microligado	ClxxVS (IC)	Mín.	2,50	1,00	0,50	3,00	1,00	0,25	-	-	-
		Máx.	3,60	3,00	1,50	5,00	2,50	1,00	1,50	1,50	3,00

A escolha do produto depende de uma análise das características do processo de laminação que exigirá dos cilindros os seguintes requisitos i/resistência mecânica, ii/resistência ao desgaste, iii/ resistência à fadiga térmica e oxidação e iv/ resistência à adesão.

Primeiras cadeiras

- Para laminadores de elevada estabilidade, com refrigeração eficiente e dotado de uma oficina com práticas adequadas de inspeção, recomenda-se a utilização do VHSS18.
- Para aquelas cadeiras em que a temperatura dos cilindros é mais alta e se deseja maior dureza a quente do material laminado, recomenda-se utilizar o LOLA.
- Para laminadores de menor estabilidade, recomenda-se o uso de VHCRxx. Nas cadeiras desbastadoras pode-se utilizar o VHCR11, que apresenta boa resistência à fadiga térmica associada a uma adequada resistência às trincas térmicas.

Últimas cadeiras

- Para laminadores de elevada estabilidade são recomendados cilindros da série ClxxVS.
- Para laminadores de menor estabilidade são recomendados cilindros da série ClxxS.

A figura 1 mostra a microestrutura representativa dos diversos grupos de produtos Villares Rolls comercializados para a laminação de tiras a quente.



A figura 1 Microestrutura representativa dos diversos produtos Villares Rolls

SOLICITAÇÕES NOS CILINDROS DURANTE PROCESSO DE LAMINAÇÃO

Os principais requisitos de um cilindro para laminação de tiras a quente são: i/ resistência mecânica, ii/ resistência ao desgaste, iii/ resistência à fadiga térmica e oxidação e iv/ resistência à adesão.

Para avaliar o desempenho dos cilindros durante a aplicação, são conduzidos estudos que consistem na caracterização da superfície de degradação dos cilindros após laminação (figura 2).

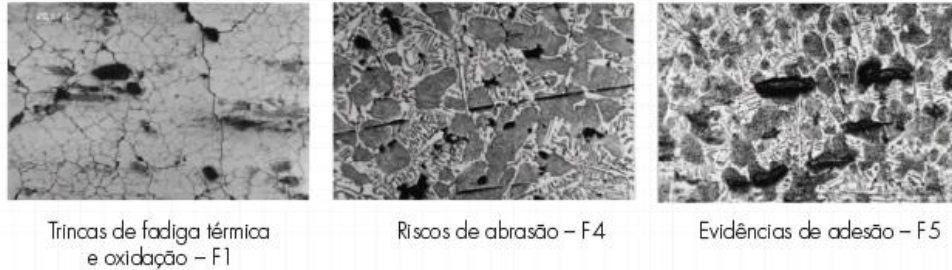


Figura 2 Superfície típica de desgaste de cilindros após laminação num laminador contínuo de 6 cadeiras.

DESEMPENHO DOS CILINDROS

São conduzidos estudos laboratoriais para avaliar o desempenho dos produtos sob determinadas solicitações. Os principais ensaios utilizados para avaliar produtos oferecidos para laminação de tiras a quente são i/ ensaio do tipo pino-sobre-lixo (figura 3), ii/ ensaio de fadiga térmica e iii/ ensaio de oxidação.

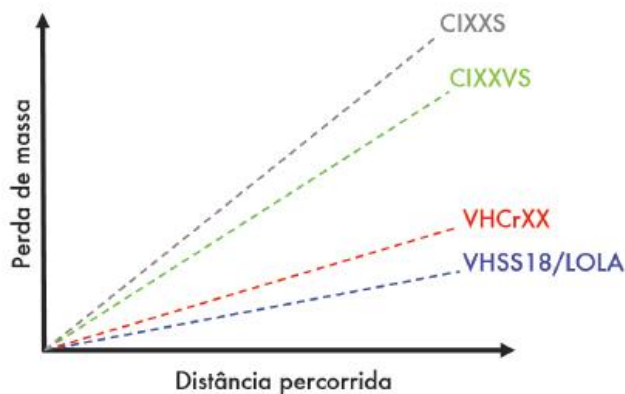


Figura 3 Representação esquemática da característica de comportamento ao desgaste para os diversos grupos de materiais.

A tabela 2 mostra propriedades comparativas dos produtos destinados à fabricação de cilindro de trabalho Villares Rolls para laminação a quente.

Material	Tipos de Carbonetos	Resistência a fadiga térmica	Resistência a Abrasão	Tenacidade	Resistência a Oxidação
HCl	M_7C_3	↑	↑	↑	↑↑↑
HSS Padrão	MC, M_7C_3	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
LOLA	MC, M_7C_3	↑↑	↑↑↑	↑↑	↑↑↑↑
CIXXS	M_3C	↑	↑	↑↑	↑
CIXXVS	M_3C, MC	↑	↑↑	↑	↑

PROPRIEDADES MECÂNICAS

A tabela 3 apresenta as principais propriedades mecânicas típicas dos diversos grupos de produto Villares Rolls destinados à laminação de tiras a quente.

Tabela 3 Propriedades mecânicas dos diversos produtos Villares Rolls

	VHSS18/LOLA (HSS)	VHCR11 (HCS)	VHCRxx (HCI)	Cbxx (IC)
Resistência à tração (MPa)	950	800	750	400
Módulo de elasticidade (GPa)	220	220	210	180
Resistência à flexão (MPa)	1200	1150	1100	600
Calor específico a 25° C (J/kgK)	490	490	455	470
Densidade (kg/m³)	7650	7600	7530	7450
Condutividade térmica (W/m.K)	25,5	25	20	23,5
Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /K)	13	13	14	14,5
Dureza (LD)	760-820	715-780	710-810	750-810