

unesp  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

LUIZ RODRIGO ALEGRE PERNAMBUCO

**AVALIAÇÃO DA USINABILIDADE DE CILINDROS PARA LAMINAÇÃO DE TIRAS A
QUENTE**

GUARATINGUETÁ

2014

LUIZ RODRIGO ALEGRE PERNAMBUCO

AVALIAÇÃO DA USINABILIDADE DE CILINDROS PARA LAMINAÇÃO DE
TIRAS A QUENTE

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro.

Guaratinguetá

2014

P452a	Pernambuco, Luiz Rodrigo Alegre Avaliação da usinabilidade de cilindros para laminação de tiras a quente / Luiz Rodrigo Alegre Pernambuco – Guaratinguetá, 2014. 108 f : il. Bibliografia: f. 103 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014. Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro 1. Metais – Usinabilidade 2. Laminação (Metalurgia) 3. Ferro fundido I. Título CDU 621.9 (043)
-------	---

LUIZ RODRIGO ALEGRE PERNAMBUCO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS

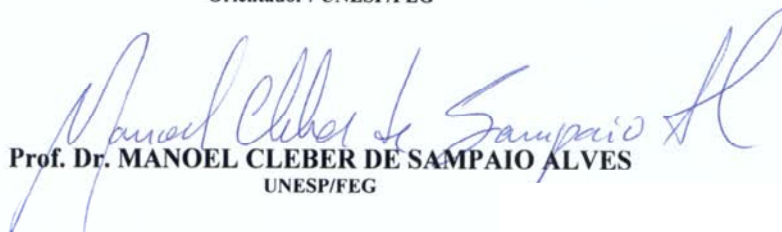
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



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



Prof. Dr. MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES
UNESP/FEG



Prof. Dr. AMAURI HASSUI
UNICAMP

Dezembro de 2014

DADOS CURRICULARES

LUIZ RODRIGO ALEGRE PERNAMBUCO

NASCIMENTO	23.04.1985 – TAUBATÉ / SP
FILIAÇÃO	Luiz Carlos Pernambuco Elisabeth Alegre Pernambuco
2000/2002	Aprendizagem Industrial em Mecânica de Usinagem na Escola SENAI Félix Guisard de Taubaté/SP.
2003/2007	Curso de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica na UNITAU - Universidade de Taubaté.
2012/2014	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

Dedico este trabalho a minha família, que me deu base para entender o que realmente é importante na vida, possibilitando meu discernimento para tantas escolhas acertadas e força para enfrentar as adversidades do caminho, e a Deus, por manter acesa a chama de um espírito de bondade em mim por todo o tempo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que me deu saúde e discernimento para as escolhas acertadas.

A todas as pessoas que me ajudaram na elaboração deste trabalho, na preparação dos ensaios e na obtenção dos resultados.

À minha família que me incentivou em todos os momentos.

À minha esposa Viviane Prado Alegre que soube compreender a dedicação necessária para a realização desse trabalho.

Ao professor Dr. Marcos Valério Ribeiro, agradeço a sua dedicação em formar um apaixonado pela Usinagem, além de principalmente sua amizade.

Aos colegas de trabalho, Sergio Domingos Júnior, Claudia Regina Serantoni, Christian Egídio da Silva e Luis Fernando Marini Pereira que me apoiaram incessantemente para a continuação de minha formação acadêmica.

A Seco Tools pelo apoio ao estudo através do fornecimento de insertos e suportes.

Ao Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP pelo apoio na realização deste trabalho de mestrado.

“Livros não mudam o mundo,
quem muda o mundo são as pessoas.
Os livros só mudam as pessoas.”

Mário Quintana

“Não tentes ser bem sucedido, tenta antes ser um homem de valor.”

Albert Einstein

PERNAMBUCO, L. R. A. **Avaliação da Usinabilidade de Cilindros para Laminação de Tiras a Quente**. 2014. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Univ. Estadual Paulista - UNESP, Guaratinguetá, 2014.

RESUMO

A utilização de ensaios de avaliação da usinabilidade dos materiais pode ser um fator determinante na viabilidade de processos de fabricação, contribuindo no planejamento dos custos, prazos e na busca pela qualidade do produto através de desenvolvimentos de estratégias e tecnologias de usinagem. Quando o produto usinado é um cilindro, que faz o papel de ferramenta no processo de laminação, a necessidade de tal desenvolvimento fica clara quando se analisa os requisitos para alta performance de cilindros de laminação e se identifica que eles são os mesmos requisitos para alta performance de insertos de usinagem: resistência ao desgaste, tenacidade e dureza. Assim esse trabalho propõe um ensaio de usinabilidade em laboratório para a avaliação de dois materiais de cilindros de laminação: o ferro fundido indefinido e o ferro fundido indefinido microligado. O ensaio foi executado através do fresamento com três arestas de metal duro em um centro de usinagem e a análise de usinabilidade foi feita pelo critério de fim de vida da ferramenta de usinagem. Foi constatado que a adição de elementos de liga na composição química dos cilindros influenciou diretamente na usinabilidade do ferro fundido indefinido microligado, pois a fração volumétrica de carbonetos VC aumentou em quase três vezes nesse material resultando em um desgaste abrasivo nas arestas das ferramentas de corte.

PALAVRAS-CHAVE: usinabilidade, cilindros de laminação, ferros fundidos, desgaste.

PERNAMBUCO, L. R. A. **Evaluation of machinability of rolling mill rolls for hot strips mill**. 2014. 108 f. Dissertation (MSc in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Univ. Estadual Paulista - UNESP, Guaratinguetá, 2014.

ABSTRACT

The use of tests to evaluate the machinability of the material may be a determining factor in the viability of manufacturing processes, and contribute to planning the cost, time and in the search for the quality of the product through development of strategies and machining technologies. When the machined product is rolling mill roll, who played as a tool in the milling process the need for such development becomes clear when is examined the requirements for high performance rolling mill roll and identifies that they are the same requirements for high performance machining tools: wear resistance, toughness and hardness. So, this work proposes a machinability test in laboratory seeking the evaluation of two materials for rolling mill rolls: an indefinite chilled double poured cast iron and a microalloyed indefinite chilled double poured cast iron. The test was performed by milling with three edges of carbide on a machining center and the machinability analysis of this work was done by the criterion of end of life of the machining tool. The work found that the addition of alloying elements on the chemical composition of the rolling mill rolls directly influenced the machinability of microalloyed indefinite chilled double poured cast iron, because the volume fraction of carbides VC increased by almost three times in this material resulting in an abrasive wear on the edges of cutting tools.

KEYWORDS: Machinability, rolling mill rolls, cast iron, wear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Tipos de laminadores.....	23
Figura 2- Gráfico de produção de aço bruto e laminado em 2013.....	24
Figura 3- Comportamento da estrutura cristalina do material no processo de laminação de tiras a quente.....	25
Figura 4- Esquema de um laminador de tiras a quente com três cadeiras desbastadoras e sete cadeiras acabadoras.....	26
Figura 5- Esquema de um trem acabador utilizando materiais diferentes para os cilindros de trabalho.....	26
Figura 6- Representação gráfica de uma cadeira laminadora.	29
Figura 7- O tribossistema na laminação de tiras a quente.....	30
Figura 8- Riscos de abrasão na superfície de um cilindro de laminação.....	31
Figura 9- A microestrutura de um cilindro com microsulcos que não afetaram os carbonetos, mas que afetaram a matriz.....	31
Figura 10- Variação de temperatura na superfície de cilindros do laminador de tiras a quente.....	32
Figura 11- Aspectos de veios de grafita observados em MEV após ataque por tempo prolongado.....	35
Figura 12- Curva típica de resfriamento de ferros fundidos cinzentos.....	36
Figura 13- Microestrutura típica de um ferro fundido branco.....	38
Figura 14- Microestrutura típica de um ferro fundido mesclado.....	39
Figura 15- Os tipos de carbonetos que podem ser formados.....	40
Figura 16- Microestrutura dos materiais utilizados para cilindros de laminação.....	42
Figura 17- Microestrutura de ferro fundido de coquilhamento indefinido	43

Figura 18 - Esquema de fundição por centrifugação de um cilindro bi-metálico.....	44
Figura 19- Imagem do fenômeno de encruamento sendo gerado.....	48
Figura 20- Cavacos de ruptura obtidos na usinagem de cilindros de laminação.....	49
Figura 21 A variação das propriedades dos Materiais de Ferramentas de Corte.....	52
Figura 22- A classificação normativa, conforme ISO 513, do metal duro utilizado em ferramentas de corte.....	53
Figura 23- A variação dos revestimentos em metal duro.....	54
Figura 24- MEV de um metal duro com triplo revestimento.....	54
Figura 25- Comparação de propriedades dos materiais de ferramentas de corte.....	55
Figura 26- Bucha teste de um cilindro de ferro fundido indefinido padrão.....	58
Figura 27- Esquema de extração de segmento da bucha teste.....	59
Figura 28- Segmento do ferro fundido indefinido padrão após o ensaio.....	59
Figura 29- Segmento do ferro fundido indefinido microligado em desenvolvimento.....	60
Figura 30- Composição química dos materiais ensaiados.....	61
Figura 31- Microestrutura do ferro fundido indefinido ensaiado.....	61
Figura 32- Microestrutura do ferro fundido indefinido microligado ensaiado.....	62
Figura 33- Gráfico comparativo de durezas médias dos materiais ensaiados.....	62
Figura 34- Gráfico comparativo de fração volumétrica de carbonetos VC.....	63
Figura 35- Micrografia para contagem da fração de VC do ferro fundido indefinido..	64
Figura 36- Micrografia para contagem da fração de VC do ferro fundido indefinido microligado.....	64
Figura 37- Gráfico comparativo de fração volumétrica de carbonetos Fe_3C	65
Figura 38- Fresa utilizada nos ensaios.....	65

Figura 39– Geometria do inserto utilizado nos ensaios.....	66
Figura 40– Centro de usinagem utilizado para os ensaios.....	67
Figura 41- Microscópio de medição utilizado.....	68
Figura 42- Rugosímetro utilizado.....	68
Figura 43- Trajeto da ferramenta para o ensaio.....	69
Figura 44- Segmento fixado na máquina.....	70
Figura 45- Esquema de análise das arestas em cada um dos ciclos dos ensaios.....	73
Figura 46- Gráfico de vida de ferramenta no ensaio preliminar.....	74
Figura 47- Condição da ferramenta após usinagem com $V_f=150$ mm/min	75
Figura 48- Condição da ferramenta após usinagem com $V_f=120$ mm/min	76
Figura 49- Condições da 1ª aresta após 1º ciclo de usinagem de FoFo indefinido.....	78
Figura 50- Condições da 2ª aresta após 1º ciclo de usinagem de FoFo indefinido.....	79
Figura 51- Condições da 3ª aresta após 1º ciclo de usinagem de FoFo indefinido.....	80
Figura 52- Condições da 1ª aresta após 2º ciclo de usinagem de FoFo indefinido.....	81
Figura 53- Condições da 2ª aresta após 2º ciclo de usinagem de FoFo indefinido.....	82
Figura 54- Condições da 3ª aresta após 2º ciclo de usinagem de FoFo indefinido.....	83
Figura 55- Condições da 1ª aresta após 3º ciclo de usinagem de FoFo indefinido.....	84
Figura 56- Condições da 2ª aresta após 3º ciclo de usinagem de FoFo indefinido.....	85
Figura 57- Condições da 3ª aresta após 3º ciclo de usinagem de FoFo indefinido.....	86
Figura 58- Condições da 1ª aresta após 1º ciclo de usinagem de FoFo indefinido Microligado.....	87
Figura 59- Condições da 2ª aresta após 1º ciclo de usinagem de FoFo indefinido microligado.....	88

Figura 60- Condições da 3ª aresta após 1º ciclo de usinagem de FoFo indefinido microligado.....	89
Figura 61- Condições da 1ª aresta após 2º ciclo de usinagem de FoFo indefinido microligado.....	90
Figura 62- Condições da 2ª aresta após 2º ciclo de usinagem de FoFo indefinido microligado.....	91
Figura 63- Condições da 3ª aresta após 2º ciclo de usinagem de FoFo indefinido microligado.....	92
Figura 64- Condições da 1ª aresta após 3º ciclo de usinagem de FoFo indefinido microligado.....	93
Figura 65- Condições da 2ª aresta após 3º ciclo de usinagem de FoFo indefinido microligado.....	94
Figura 66- Condições da 3ª aresta após 3º ciclo de usinagem de FoFo indefinido microligado.....	95
Figura 67- Medições de rugosidade após usinagem dos materiais.....	96
Figura 68- Vida das ferramentas utilizadas no ensaio de usinabilidade.....	97
Figura 69 – Relação entre desgaste na superfície de saída e comprimento usinado gerada no ensaio de usinabilidade dos materiais.....	98
Figura 70– Superfície usinada do material com lascamentos nas arestas.....	99
Figura 71 – Vida da Ferramenta para Usinagem de FoFo indefinido.....	100
Figura 72 – Comparação de vida após aplicação de regressão.....	101

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Composição típica de ferro fundido cinzento.....	34
Quadro 2 - Composição química típica de ferro fundido branco.....	36
Quadro 3 - Constituição dos materiais quanto à composição química, fração global de carbonetos e dureza.....	40
Quadro 4 - Dureza e elementos formadores dos carbonetos existentes nos materiais..	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de corte utilizados do ensaio preliminar.....	71
Tabela 2 - Variação da velocidade de avanço.....	71
Tabela 3 - Parâmetros de corte utilizados no ensaio de usinabilidade.....	72
Tabela 4 - Desgaste das 3 arestas utilizadas no 1º ciclo de usinagem de ferro fundido indefinido.....	77
Tabela 5 - Desgaste das 3 arestas utilizadas no 2º ciclo de usinagem de ferro fundido indefinido.....	81
Tabela 6 - Desgaste das 3 arestas utilizadas no 3º ciclo de usinagem de ferro fundido indefinido.....	84
Tabela 7 - Desgaste das 3 arestas utilizadas no 1º ciclo de usinagem de ferro fundido indefinido microligado.....	87
Tabela 8 - Desgaste das 3 arestas utilizadas no 2º ciclo de usinagem de ferro fundido indefinido microligado.....	90
Tabela 9 - Desgaste das 3 arestas utilizadas no 3º ciclo de usinagem de ferro fundido indefinido microligado.....	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TTT – Temperatura Tempo Transformação

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

IC – *Indefinite Chill* - Ferro fundido de coquilhamento indefinido

HCI – *High Chromium Iron*- Ferro fundido branco

HSS – *High Speed Steel* - Aço Rápido

TEE – Temperatura do Eutético Estável

TEM – Temperatura do Eutético Metaestável

ISO – *International Organization of Standardization*

CBN – Nitreto Cúbico de Boro

CVD – *Chemical Vapor Deposition* – Deposição Química a Vapor

PVD – *Physical Vapor Deposition* – Deposição Física a Vapor

CNC – Comando Numérico Computadorizado

FoFo – Ferro Fundido

MO – Microscópio óptico

Z_n – Número de dentes

a_p – Profundidade de corte

D_c – Diâmetro de corte

v_c – Velocidade de corte

v_f – Velocidade de avanço

f_z – Avanço por dente

A_e – Contato Relativo do Diâmetro de Fresa

mm/min – Milímetro por minuto

LISTA DE SÍMBOLOS

Ø – Diâmetro

mm - Milímetro

t – Tonelada

V – Vanádio

Nb – Nióbio

W – Tungstênio

Ti – Titânio

Fe₃C – Cementita

C – Carbono

Si – Silício

Mn – Manganês

P – Fósforo

S – Enxofre

Cr – Cromo

Ni – Níquel

Cu – Cobre

Mo – Molibdênio

Cr₂₃C₆ – Carboneto de Cromo

TiC – Carboneto de Titânio

WC – Carboneto de Tungstênio

NbC – Carboneto de Nióbio

Mo_2C – Carboneto de Molibdênio

W_{eq} – Tungstênio Equivalente

X_K – Fração volumétrica de carbonetos (em %)

Ta – Tântalo

HV – Dureza Vickers

TiN – Nitreto de Titânio

Al_2O_3 – Óxido de Alumínio/Alumina

TiCN – Carbonitreto de Titânio

Co - Cobalto

Si_3N_4 – Nitreto de Silício

$^{\circ}\text{C}$ – Graus Celsius

kW – Quilowatt

μm – micro metro

Nb – Nióbio

VC – Carboneto de Vanádio

Ra – Rugosidade média

R_{máx.} – Rugosidade máxima

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE QUADROS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	21
1.1 - OBEJTIVOS.....	22
1.2 - JUSTIFICATIVA.....	22
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 - O PROCESSO DE LAMINAÇÃO DE TIRAS QUENTE.....	23
2.2 - CILINDROS DE LAMINAÇÃO.....	28
2.3- CLASSIFICAÇÃO DOS FERROS FUNDIDOS.....	33
2.3.1 - Características importantes.....	34
2.3.2 - Ferro Fundido Cinzento	34
2.3.3 - Ferro Fundido Branco.....	36
2.3.4 - Ferro Fundido Mesclado.....	38
2.4 - MATERIAIS DE CILINDROS DE LAMINAÇÃO DE TIRAS A QUENTE.....	39
2.5 – O PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CILINDROS DE LAMINAÇÃO.....	43

2.6 – USINABILIDADE DOS MATERIAIS.....	45
2.6.1 – Ensaio de Usinabilidade dos materiais.....	46
2.6.2 – A influência das propriedades do material na usinabilidade.....	47
2.6.3 – Aspectos Metalúrgicos e a Usinabilidade dos materiais.....	48
2.7 – MATERIAIS DE FERRAMENTAS DE CORTE.....	51
2.8 – OS MECANISMOS DE DESGASTE EM FERRAMENTAS DE CORTE.....	56
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	57
3.1 – A DEFINIÇÃO DO MÉTODO DE ENSAIO DE USINABILIDADE.....	57
3.2 – OS MATERIAIS DE CILINDROS ESCOLHIDOS.....	60
3.3 – OS MATERIAIS DE FERRAMENTAS ESCOLHIDOS.....	65
3.4 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	67
3.5 – ESTRATÉGIAS DE PROCESSO DEFINIDAS PARA O ENSAIO.....	69
3.6 – OS PARÂMETROS DE CORTE UTILIZADOS.....	70
3.6.1 – Os parâmetros de corte utilizados no ensaio preliminar.....	71
3.6.2 – Os parâmetros de corte utilizados no ensaio de usinabilidade.....	72
3.6 - ANÁLISE DO DESGASTE DAS ARESTAS.....	72
4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	74
4.1 – RESULTADOS DO ENSAIO PRELIMINAR.....	74
4.2 – RESULTADOS DO ENSAIO DE USINABILIDADE.....	76
4.2.1– Condições das ferramentas após usinagem do segmento de ferro fundido indefinido.....	76
4.2.1.1 – Condições das ferramentas após 1º ciclo de usinagem do segmento de ferro fundido indefinido.....	77

4.2.1.2 – Condições das ferramentas após 2º ciclo de usinagem do segmento de ferro fundido indefinido.....	80
4.2.1.3 – Condições das ferramentas após 3º ciclo de usinagem do segmento de ferro fundido indefinido.....	83
4.2.2– Condições das Ferramentas após usinagem do Segmento de Ferro Fundido Indefinido Microligado.....	86
4.2.2.1 – Condições das Ferramentas após 1º ciclo de usinagem do Segmento de Ferro Fundido Indefinido Microligado.....	86
4.2.2.2 – Condições das Ferramentas após 2º ciclo de usinagem do Segmento de Ferro Fundido Indefinido Microligado.....	89
4.2.2.3 – Condições das Ferramentas após 3º ciclo de usinagem do Segmento de Ferro Fundido Indefinido Microligado.....	92
4.2.3 – Resultados de rugosidade.....	95
4.2.4 – Consolidação dos resultados.....	96
5 – CONCLUSÕES.....	102
REFERÊNCIAS.....	103

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

A indústria moderna cada vez mais exige que os processos de fabricação sejam mensurados nas mais variadas perspectivas, e algo que cada vez mais vem sendo utilizado é a determinação da usinabilidade dos materiais que são processados nessas indústrias, algo que pode influenciar o custo, o prazo de entrega e a qualidade do produto.

A indústria de cilindros de laminação, cada vez mais demonstra exponencial evolução na busca por altos desempenhos dos laminadores que são resultantes da aplicação de novos materiais em cilindros através da adição de elementos de liga.

Entender os efeitos que a adição de elementos de liga nos materiais pode causar, principalmente na usinagem dos mesmos, é algo que cada vez mais se torna necessário visto que em todo o segmento metal-mecânico a exigência de se aumentar as propriedades físicas e mecânicas do material, que influenciam diretamente a usinabilidade, se torna constante. O mercado consumidor cada vez mais exige materiais que tenham vida mais longa em operação, tendo maior resistência aos esforços a que são submetidos. Todo esse desenvolvimento exponencial de materiais exige um desenvolvimento paralelo de tecnologias de usinagem que consigam atender a contínua demanda de aumento de produtividade na usinagem de tais materiais. A necessidade de tal desenvolvimento fica clara quando se analisa os requisitos para alta performance de cilindros de laminação e se identifica que eles são os mesmos requisitos para alta performance de insertos de usinagem: resistência ao desgaste, tenacidade e dureza. Quem fomenta tal desenvolvimento são os estudos científicos, que têm a função de expor as oportunidades de melhoria nas tecnologias.

1.1 - OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo caracterizar a usinabilidade de dois materiais utilizados para a fabricação de cilindros de laminação - o ferro fundido de coquilhamento indefinido e o ferro fundido de coquilhamento indefinido microligado – e para tanto foi desenvolvido um ensaio de usinabilidade, buscando o entendimento da influência da adição e/ou alteração dos teores de elementos de liga na usinabilidade dos mesmos.

1.2 – JUSTIFICATIVA

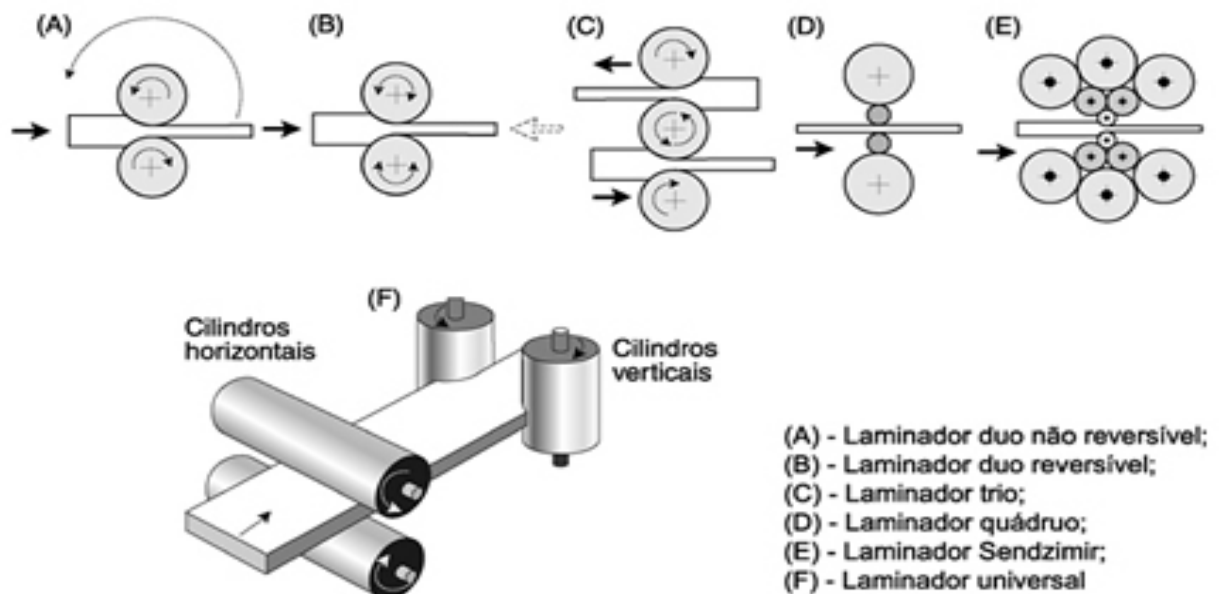
O presente estudo busca demonstrar como a avaliação da usinabilidade dos materiais pode ser utilizada na busca de um melhor planejamento com maior previsibilidade do processo e de suas variáveis, algo que atualmente tem sido cada vez mais necessário para a manutenção da competitividade das empresas.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – O PROCESSO DE LAMINAÇÃO DE TIRAS QUENTE

A laminação é um processo de conformação mecânica que consiste em deformar o metal pela passagem entre dois cilindros com geratriz retilínea, no caso da laminação de produtos planos, ou contendo canais entalhados de forma mais ou menos complexa, no caso da laminação de produtos longos. A laminação é o processo mais empregado dentre os processos de conformação mecânica de metais. Os diversos tipos de laminadores de produtos planos são mostrados na Figura 1.

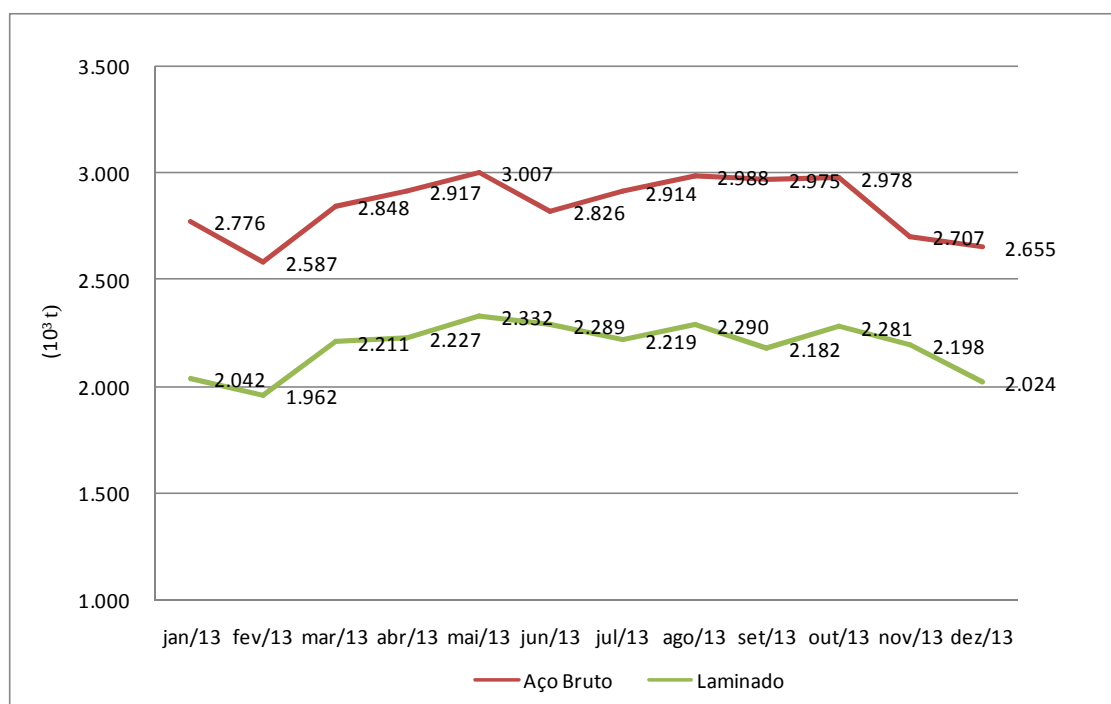
Figura 1 – Tipos de Laminadores.



Fonte: (BARROS,2006).

Em 2013, conforme ilustrado na Figura 2, 76,8% do aço bruto produzido no Brasil foi conformado por laminação e desses, 57% foi laminado em produtos planos e 43% em produtos longos (Instituto Aço Brasil, 2014).

Figura 2 – Gráfico de Produção de aço bruto e laminado em 2013.



Fonte: (Adaptado de Instituto Aço Brasil, 2014).

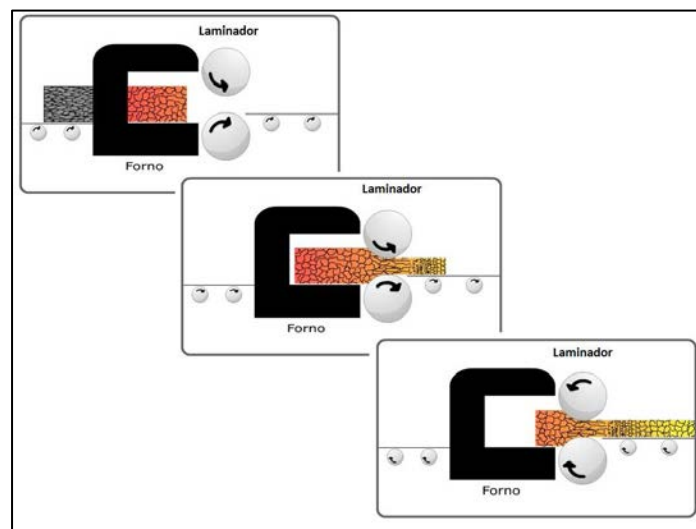
Em função da temperatura de trabalho na laminação, pode-se classificar os processos de laminação em dois grupos principais: laminação a quente e laminação a frio.

O processo é nomeado laminação a quente, pois a temperatura que o material atinge durante o processo é maior que sua temperatura de recristalização, assim sua estrutura é refinada em grãos equiaxiais recristalizados de menor tamanho (KIMINAMI, 2013), enquanto que na laminação de tiras a frio a temperatura que o material atinge no processo não chega a sua temperatura de recristalização.

Na laminação a quente, o grau de deformação é tipicamente da ordem de centenas de vezes, enquanto que na laminação a frio este grau de deformação é pelo menos dez vezes menor, lembrando que, grau de deformação em laminação, é a relação entre a espessura inicial e a espessura final do material laminado, podendo ser analisado em cada passe ou considerando a deformação total.

A laminação a quente modifica por completo a estrutura bruta de fundição e refina o grão do metal que foi laminado, melhorando suas propriedades mecânicas e metalúrgicas, no sentido da laminação. Na Figura 3 é demonstrado o processo de aquecimento da chapa e o comportamento de sua estrutura cristalina durante o processo de laminação de tiras a quente.

Figura 3 – Comportamento da estrutura cristalina do material no processo de laminação de tiras a quente.

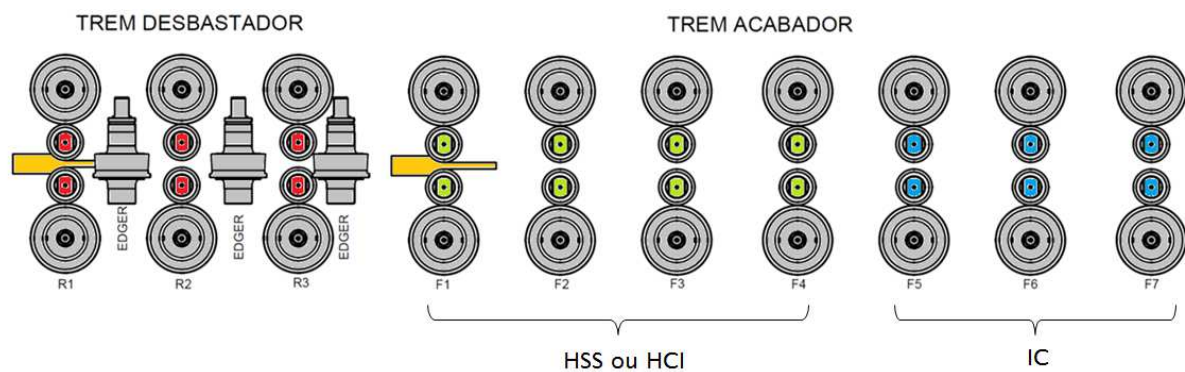


Fonte: (Adaptado de CIMM,2011).

Em geral, laminadores de tiras a quente têm suas cadeiras acabadoras contínuas e suas cadeiras desbastadoras contínuas ou reversíveis. As cadeiras desbastadoras geralmente são denominadas R1, R2, R3, enquanto que as cadeiras acabadoras são denominadas F1, F2, F3, F4, F5, F6 e F7. Além disso, também é usual que as cadeiras acabadoras sejam divididas de dois a três subgrupos, distinguindo-se assim o

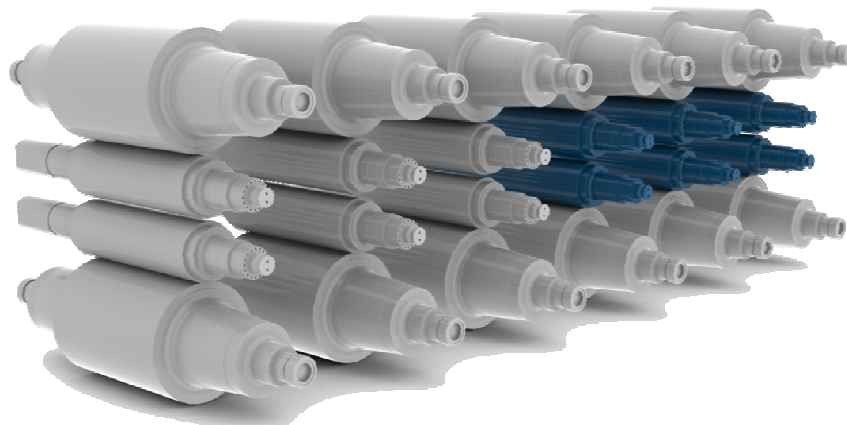
material do cilindro de laminação utilizado em cada uma delas conforme ilustrado nas Figuras 4 e 5.

Figura 4 – Esquema de um laminador de tiras a quente com três cadeiras desbastadoras e sete cadeiras acabadoras.



Fonte: O Autor.

Figura 5 – Esquema de um trem acabador utilizando materiais diferentes para os cilindros de trabalho.



Fonte: (CORNÉLIO,2010).

São considerados produtos planos laminados de aço os seguintes tipos de produtos: chapas finas, chapas grossas, tiras, folhas e fitas. Estes produtos são fornecidos na forma linear ou enrolados formando bobinas e rolos. A característica comum aos diversos produtos listados é a forma da seção transversal retangular (ou aproximadamente se considerarmos as bordas), sendo que a largura é varias vezes maior do que a sua espessura.

A capacidade de produção de uma linha de laminação de bobinas a quente para aços carbono de um laminador contínuo ou semicontínuo, situa-se na faixa de 2.000.000 a 5.000.000 t/ano. Para produção de aço inoxidável ou aço ao silício ou para um menor volume de produção de aços carbono e microligados, são utilizados laminadores reversíveis (do tipo *Steckel*) com capacidade de produção na faixa de 300.000 a 1.000.000 t/ano. O comprimento das chapas finas pode atingir faixas de até 3.000 m (RIZZO, 2011).

As bobinas de chapas laminadas a quente podem seguir vários caminhos distintos:

- podem servir de matéria-prima para o laminador de tiras a frio obtendo-se assim chapas e tiras laminadas a frio com ou sem revestimentos superficiais;
- podem ser utilizadas na fabricação de tubos com costura, por diversos processos; e
- podem servir de matéria-prima para os laminadores a frio do tipo *Sendzmir* para o caso de aços especiais (inoxidáveis, ao silício, etc.) onde são obtidas as folhas ou fitas laminadas.

As chapas finas laminadas a quente (espessura máxima de 5,0 mm) são utilizadas em um elevado número de aplicações na espessura com que sai do laminador, como por exemplo: rodas para automóveis, tubos de diâmetro médio, autopeças, compressores e reservatórios. Outra parte das chapas finas laminadas a quente (normalmente com espessura entre 2,0 e 3,0 mm) é destinada à laminação a frio para a produção de chapas finas (espessuras na faixa de 0,38 a 1,0mm) e folhas (espessura igual ou menor a 0,38mm) que são aplicadas em: estampagem de carrocerias de automóveis, embalagens de alimentos, telhas, autopeças e etc. (RIZZO, 2011).

Na produção de tiras a quente a qualidade e a produtividade estão ligados ao desempenho dos cilindros em operação. A forma e a rugosidade do produto laminado dependem da forma e da rugosidade do cilindro laminador. A produtividade por sua vez, é parcialmente determinada pelo tempo de serviço ininterrupto que o cilindro de trabalho pode suportar mantendo a qualidade do produto laminado (SILVA, 2003).

2.2 – CILINDROS DE LAMINAÇÃO

Os cilindros são componentes de destaque na elaboração dos laminados pois mantêm contato direto com o produto acabado e são responsáveis por sua forma e aspecto.

Os cilindros de laminação são compostos de três partes principais:

- Mesa: região do cilindro onde ocorre o contato com o material a ser laminado – pode ser lisa ou com canais;
- Pescoços: região dos cilindros onde se encaixam os mancais;
- Trevos ou garfos de acionamento: serve de ligação do cilindro com os eixos de força, por meio de uma luva.

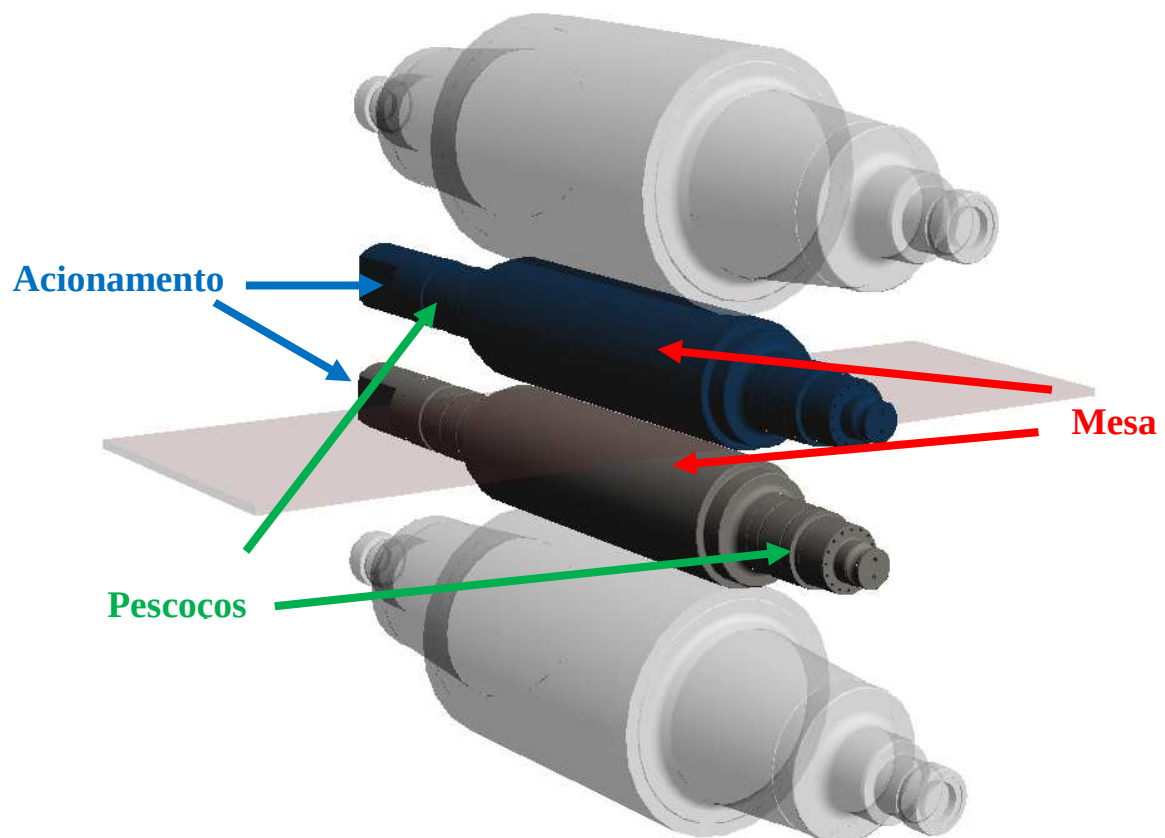
Os cilindros de laminação são sustentados por mancais nas gaiolas, ou cadeiras laminadoras (CHIAVERINI, 1978).

Os cilindros podem ser utilizados como cilindros de trabalho ou cilindros de encosto (ou apoio). Os cilindros de trabalho são aqueles que entram em contato direto com o material laminado e que sofrem, portanto, as maiores solicitações de temperatura e desgaste.

Os cilindros de encosto (ou apoio) são aqueles que não entram em contato com o material laminado, mas sim com o cilindro de trabalho. Servem para apoiar o cilindro de trabalho impedindo sua flexão. Para isso, são cilindros de maior porte.

Uma cadeia laminadora é representada na Figura 6, onde os cilindros maiores são os cilindros de encosto, e os menores são os cilindros de trabalho.

Figura 6 – Representação gráfica de uma cadeia laminadora.



Fonte:(Adaptado de CORNÉLIO, 2010).

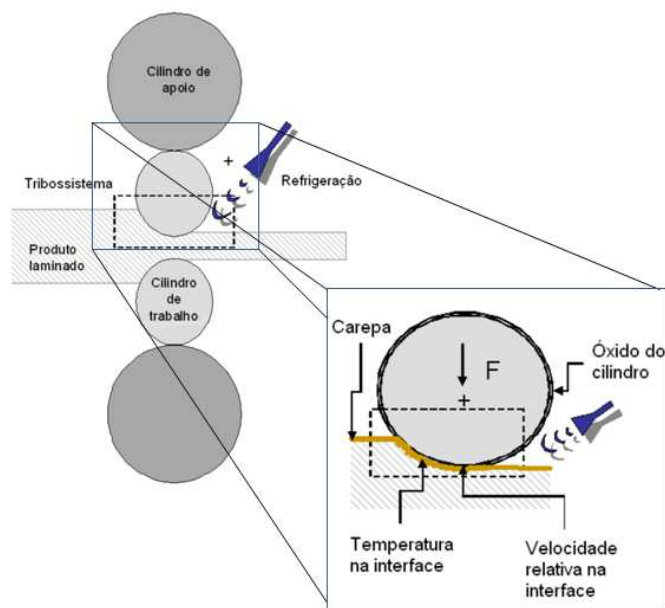
Visando melhorar a produtividade dos laminadores e a qualidade da tira laminada, tem-se desenvolvido cilindros para laminação que apresentam maior resistência ao desgaste, maior estabilidade dimensional, combinados com propriedades adequadas de resistência mecânica e tenacidade à fratura (ROBERTS, 2002).

A condição dos cilindros das últimas cadeiras afeta diretamente a produtividade de um laminador de tiras a quente e a qualidade final da tira, o que restringe o uso de

determinados materiais nessa aplicação. Por isso, um dos principais motivos responsáveis pela parada do laminador é a troca dos cilindros de ferro fundido indefinido, normalmente utilizados nestas cadeiras. Para o aumento da disponibilidade do laminador, e, conseqüentemente, de sua produtividade, há uma necessidade de cilindros que possam permanecer por mais tempo no laminador, diminuindo o número de paradas para trocas. Para que isso seja possível, são necessárias características de maior resistência aos mecanismos de degradação superficial atuantes nessas cadeiras.

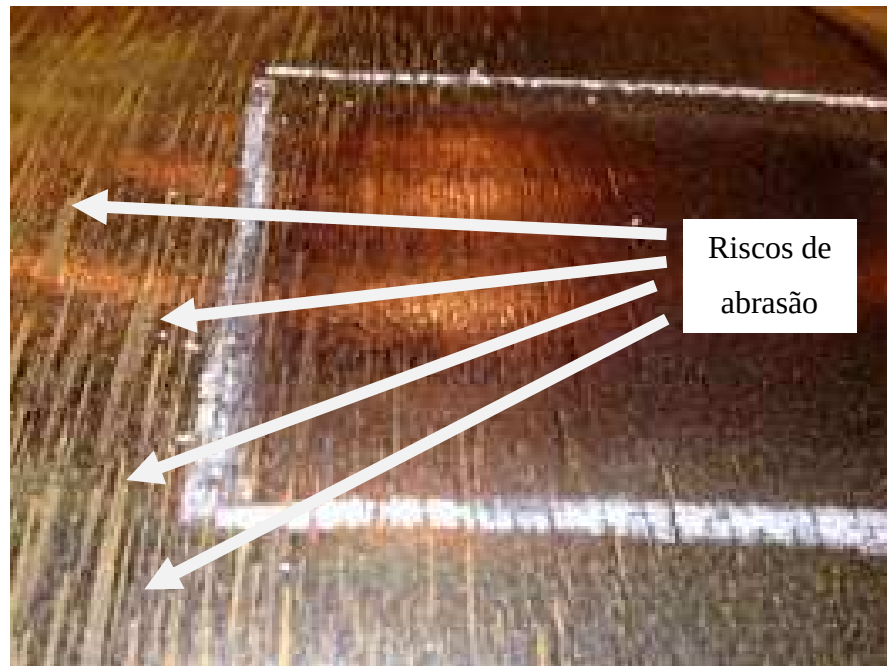
Dentre os principais mecanismos de degradação gerados em um tribossistema dos cilindros na laminação, retratado na Figura 7, estão destacados o desgaste abrasivo conforme ilustrados nas Figuras 8 e 9, a fadiga térmica, o desgaste por deslizamento e o desgaste oxidativo (Oliveira *et al.*, 2013).

Figura 7 – O tribossistema na laminação de tiras a quente.



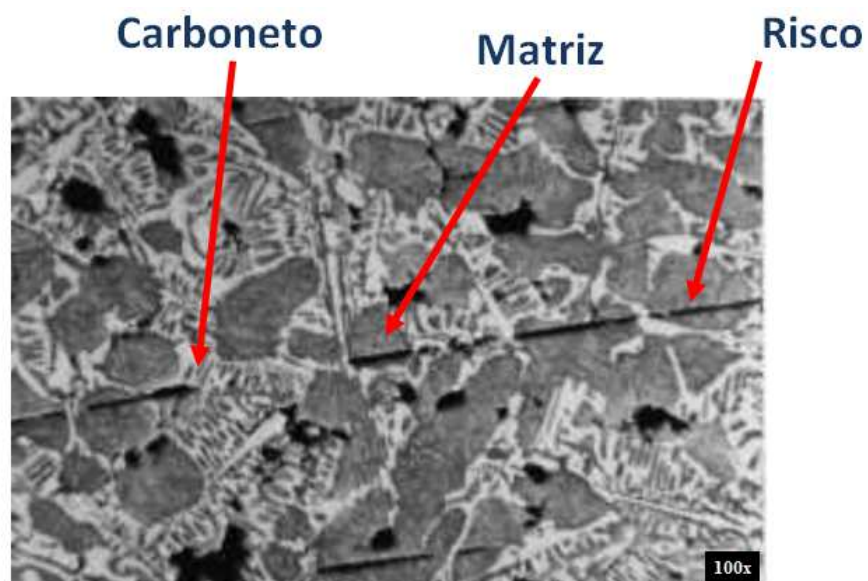
Fonte: (SERANTONI,2010).

Figura 8 – Riscos de abrasão na superfície de um cilindro de laminação.



Fonte: (Adaptado de SERANTONI, 2010).

Figura 9 – A microestrutura de um cilindro com microsulcos que não afetaram os carbonetos, mas que afetaram a matriz.

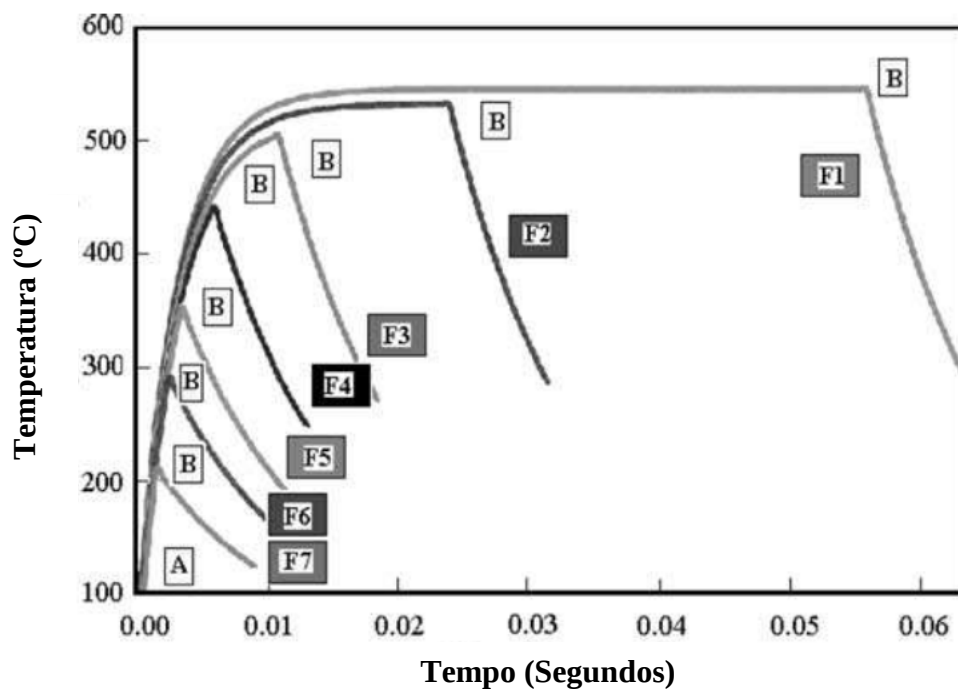


Fonte: (Adaptado de SERANTONI, 2010).

O bom comportamento em relação ao desgaste depende de variáveis como: o produto laminado; velocidade relativa entre cilindro e chapa laminada e a pressão específica nesse processo, sendo que os dois últimos aumentam significativamente nas últimas cadeiras laminadoras (ARAGUNDE, 2004).

Conforme ilustrado na Figura 10, a temperatura máxima da superfície de cilindros de laminação das últimas cadeiras (denominadas F5, F6, e F7) não é alta o suficiente como a das primeiras cadeiras (denominadas F1, F2, F3 e F4) para promover dano por fadiga térmica e, portanto, abrasão é o fator dominante de desgaste.

Figura 10 - Variação de temperatura na superfície de cilindros do laminador de tiras a quente.



Fonte: (Adaptado de BELZUNCE, 2004).

2.3 – CLASSIFICAÇÕES DOS FERROS FUNDIDOS

Os ferros fundidos são ligas de ferro-carbono com porcentagem de carbono entre 2 e 4%, contendo ainda outros elementos de liga como o silício, o manganês, o fósforo, o enxofre, níquel, molibdênio entre outros. Nesses materiais o carbono está presente sob a forma de cementita (Fe_3C) e como carbono livre (grafita). O teor de cada uma dessas formas depende parcialmente da quantidade de outros elementos na liga. Suas principais propriedades são a boa rigidez, resistência à compressão e ponto de fusão baixo (comparado aos aços com baixo teor de carbono), deste modo se utiliza da fundição como processo de fabricação de peças.

Os ferros fundidos são classificados de acordo com a forma em que o carbono se apresenta na microestrutura:

- a) ferro fundido branco – microestrutura em que todo o carbono está na forma de cementita (Fe_3C);
- b) ferro fundido mesclado – microestrutura em que o carbono está na forma de cementita, próximo à superfície, e de grafita no núcleo;
- c) ferro fundido cinzento – microestrutura em que a maior parte do carbono está na forma de veios de grafita;
- d) ferro fundido nodular ou ferro fundido dúctil – microestrutura em que a maior parte do carbono está na forma de grafita esferoidal;
- e) ferro fundido vermicular – microestrutura em que a maior parte do carbono está na forma de grafita vermicular, que é uma forma intermediária entre a grafita em veios e a em nódulos.

Nesse trabalho serão detalhados alguns dos tipos acima citados que mais se assemelham aos materiais de cilindros para laminação de tiras a quente.

2.3.1 Características importantes:

No estado bruto de fundição, suas propriedades mecânicas são definidas pela microestrutura, mais precisamente, pela forma em que o carbono encontra-se combinado:

- Na forma de grafita apresenta dureza baixa, baixa resistência mecânica e boa usinabilidade;

Na forma de cementita, apresenta dureza elevada, alta resistência mecânica e ao desgaste e baixa tenacidade.

2.3.2 Ferro Fundido Cinzento

Apresenta muita grafita devido ao alto nível de silício e quase nenhuma cementita, isso define o ferro fundido cinzento. A fratura desse material apresenta uma aparência cinza, de onde surgiu seu nome (CALLISTER, 2002).

A composição química típica com os principais elementos de liga de ferro fundido cinzento é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 - Composição química típica de ferro fundido cinzento.

Elementos principais	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Cu (%)
% peso (intervalo)	3,20	1,50	0,30	0,06	0,06	0,00	0,00	0,00
	3,70	2,10	0,80	0,20	0,20	1,00	1,50	1,50

Fonte: (SANTOS, 1991).

As características principais dos ferros fundidos cinzentos são:

- boa resistência mecânica;
- alta capacidade de amortecer vibrações;
- excelente usinabilidade;
- ductilidade nula;
- tenacidade superior aos ferros fundidos brancos;
- fácil fusão.

Por apresentar temperaturas de fusão relativamente baixas, a solidificação dos ferros fundidos cinzentos apresenta uma expansão de volume devido à precipitação da grafita.

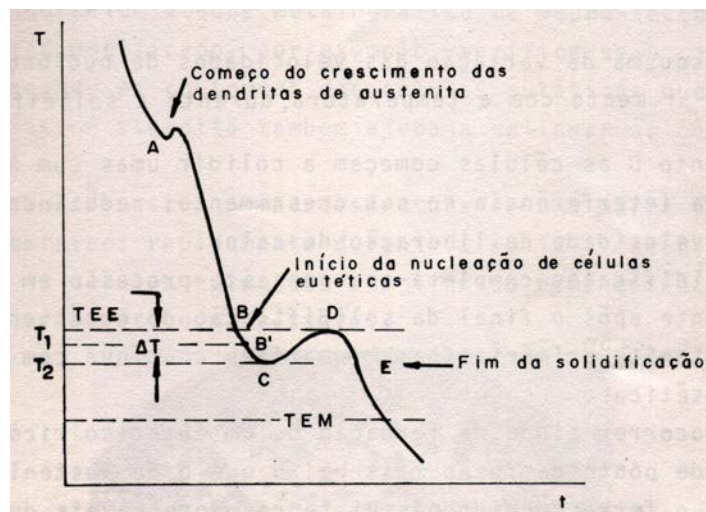
Na Figura 11 é mostrada uma microestrutura de veios de grafita observados em MEV (microscópio eletrônico de varredura) e na Figura 12 é mostrada a curva de resfriamento de ferro fundido cinzento.

Figura 11 - Aspectos de veios de grafita observados em MEV após ataque por tempo prolongado.



Fonte:(SANTOS, 1991).

Figura 12 - Curva típica de resfriamento de ferros fundidos cinzentos.



Fonte:(SANTOS, 1991).

2.3.3 Ferro Fundido Branco

São ligas do sistema Fe-C-Si, que contem baixos teores de silício e que apresentam o carbono quase que inteiramente na forma de Fe_3C (cementita), formando um constituinte com a austenita, denominado ledeburita. Apresenta elevada dureza, ductilidade nula e fratura de coloração clara.

A composição química típica com os principais elementos de liga de ferro fundido branco é apresentada no Quadro 2.

Quadro 2 - Composição química típica de ferro fundido branco.

Elementos principais	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)
% peso	1,80	0,50	0,25	0,06	0,06	11,0	0,50	0,50
(intervalo)	3,60	1,90	0,80	0,20	0,20	28,0	1,50	3,50

Fonte:(SANTOS, 1991).

Efeito dos elementos de liga principais:

Mn - estabiliza a cementita;

Ni – endurecimento por solução sólida e desloca a curva TTT para a direita;

Cr, Mo – formadores de carbonetos que aumentam a resistência ao desgaste;

Propriedades típicas como: elevada dureza, baixa tenacidade, elevada resistência ao desgaste, baixa usinabilidade (CALLISTER, 2002).

Fatores que influenciam na obtenção de ferros fundidos brancos:

- para evitar a formação da grafita o teor de Si é mantido baixo e a velocidade de resfriamento deve ser alta, sendo essa variada em função de:

- temperatura de vazamento;
- temperatura da coquilha (molde metálico ou resfriador);
- espessura da peça na seção coquilhada;

Na Figura 13 é representada uma microestrutura típica de um ferro fundido branco no estado bruto de fundição composta por dendritas de perlita (áreas escuras) e ledeburita (eutético formado por placas de cementita e perlita)

Figura 13 - Microestrutura típica de um ferro fundido branco.



Fonte: (Adaptado de SANTOS, 1991).

2.3.4 Ferro Fundido Mesclado

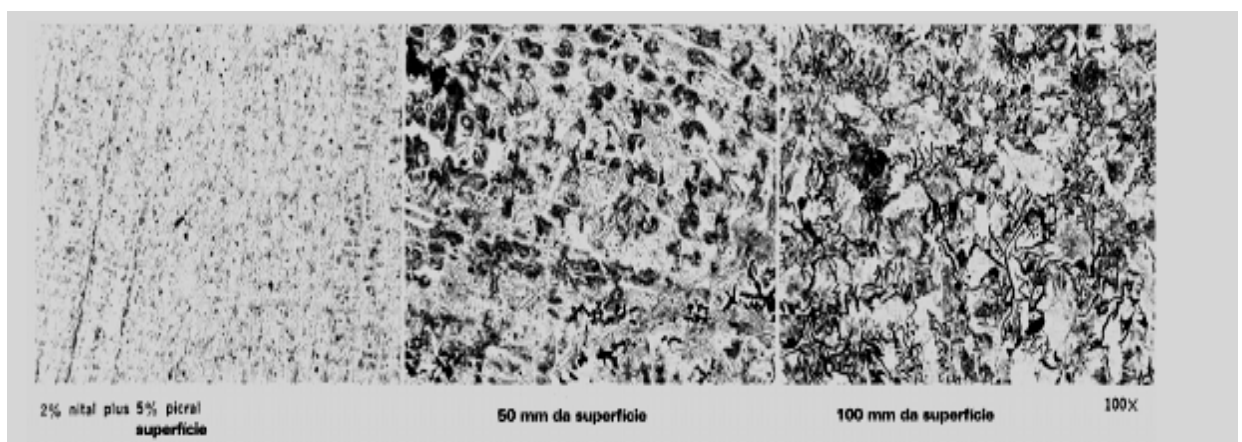
É o ferro fundido branco que, por um efeito da velocidade de resfriamento e/ou de altos teores de silício, apresentam uma microestrutura final composta por ferro fundido branco na superfície (formado pela elevada velocidade de resfriamento) e ferro fundido cinzento no núcleo do componente (SANTOS, 1991).

Algumas aplicações típicas:

- equipamentos para mineração e implementos agrícolas;
- cilindros de laminação;
- revestimentos de moinhos de bolas para moagem de minério;
- bolas de moinho;
- mandíbulas de britadores;

Na Figura 14 é representada uma microestrutura típica de um ferro fundido mesclado. Na superfície, verifica-se a presença de microestrutura típica de ferro fundido branco, a 50 mm da superfície a microestrutura é composta por perlita grossa e carbonetos e a 100 mm da superfície verifica-se a presença de veios de grafita do tipo B sobre uma matriz perlítica contendo ferrita.

Figura 14 - Microestrutura típica de um ferro fundido mesclado.



Fonte: (SANTOS, 1991).

2.4 - MATERIAIS DE CILINDROS DE LAMINAÇÃO DE TIRAS A QUENTE

Alguns fatores que podem ser considerados na escolha dos materiais de cilindros de laminação passam pelo: tipo de laminador e sua tecnologia, material laminado e volume de produção. Porém, historicamente os materiais mais utilizados para o trem acabador são: o ferro fundido de coquilhamento indefinido (*IC: indefinite chill*), o ferro fundido branco de alto cromo (*HCI: high chromium iron*) e o aço rápido (*HSS: high speed steel*), nessa mesma seqüência de ganhos de rendimento.

Seis tipos de carbonetos podem ser formados como mostrado na Figura 15, onde M indica soma de elementos (de metal) formadores de carbonetos. Os carbonetos colocados no grupo I possuem uma estrutura cristalina complexa, um exemplo é a

cementita (Fe_3C), ou o Cr_{23}C_6 . Uma característica estrutural específica dos carbonetos do grupo II como fases intersticiais é uma simples rede cristalina, como por exemplo, o TiC , WC , NbC e Mo_2C (MAALEKIAN, 2007).

Figura 15 – Os tipos de carboneto que podem ser formados.

Carbonetos do Grupo I	Carbonetos do Grupo II
M_3C	MC
M_{23}C_6	M_2C
M_7C_3	
M_6C	

Fonte: (Adaptado de MAALEKIAN, 2007).

A constituição desses materiais quanto à composição química, fração de carbonetos e dureza está mostrada no Quadro 3 e a dureza dos carbonetos que constituem esses materiais, bem como seus elementos formadores, no Quadro 4 (MARTINY; SINNAEVE, 2001).

Quadro 3 - Constituição dos materiais quanto à composição química, fração global de carbonetos e dureza.

Tipo	C [%]	Cr [%]	Weq = W + 2Mo [%]	x_K [%]	Dureza [HV]
IC	3,2 – 3,4	1,2 - 1,8	0,4 - 0,8	30 – 40	465 – 570
HCI	2,5 – 2,8	16 – 18	2 – 3	20 – 28	520 – 660
HSS	1,2 – 1,8	4 – 6	8 – 12	4 – 9	570 – 820

Fonte: (Adaptado de: MARTINY; SINNAEVE, 2001).

Quadro 4 - Dureza e elementos formadores dos carbonetos existentes nos materiais.

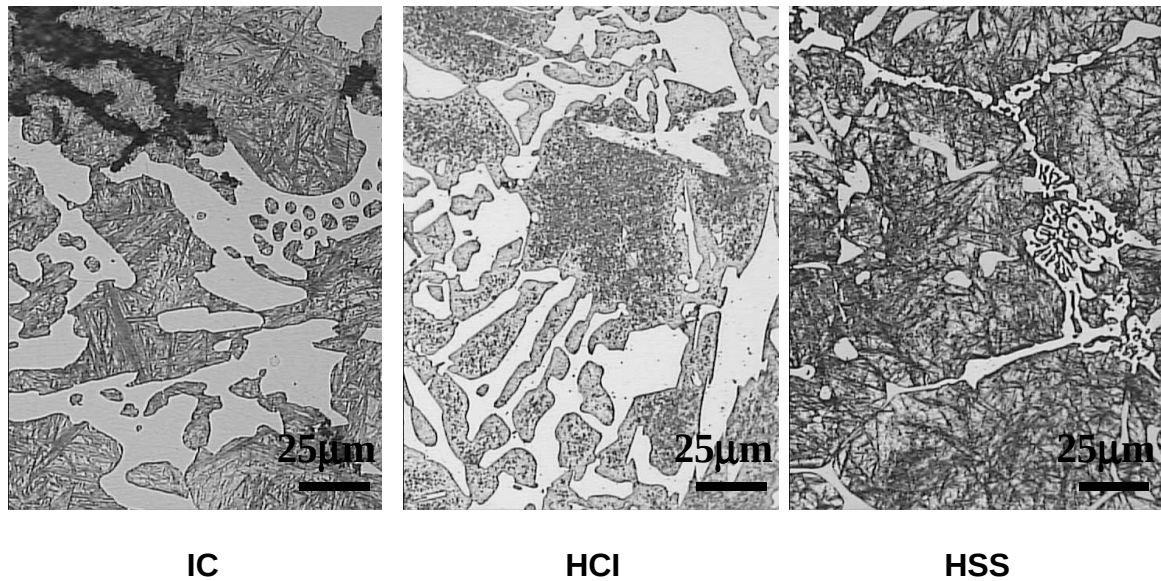
Tipo	Principal elemento formador (elementos secundários)	Dureza Vickers
M₃C	Fe (Cr, Mn)	1100 – 1350
M₇C₃	Cr (Fe, Mo)	1400 – 1800
	Ti	3000 – 3400
	V	2800 – 3000
	Nb	2200 – 2500
	Ta	1800 – 2000
M₂C	Mo (W, V, Cr, Fe)	1600 – 2200
M₆C	W (Mo, Fe, Cr)	1200 – 1800

Fonte:(MARTINY; SINNAEVE, 2001).

Apesar de apresentar uma menor fração global de carbonetos, a alta dureza do aço rápido (*HSS: high speed steel*) é decorrente à própria dureza dos carbonetos que o constitui, além de uma matriz metálica com intensa precipitação de carbonetos secundários. Enquanto que o M₃C apresenta a menor dureza, com 1100-1350HV, o MC poderá atingir 3400HV, o qual constitui a maioria dos HSS destinados à fabricação de cilindros laminadores.

As microestruturas desses materiais podem ser visualizadas na Figura 16. A matriz metálica de todos os materiais constitui-se preferencialmente por martensita, Enquanto que o ferro fundido de coquilhamento indefinido (IC) e o ferro branco de alto cromo (HCI) apresentam uma rede simples de carbonetos eutéticos, respectivamente M₃C e M₇C₃, o aço rápido é constituído por uma rede mista dos tipos M₇C₃, M₂C, M₆C e MC (CORNÉLIO, *et al.*,2004).

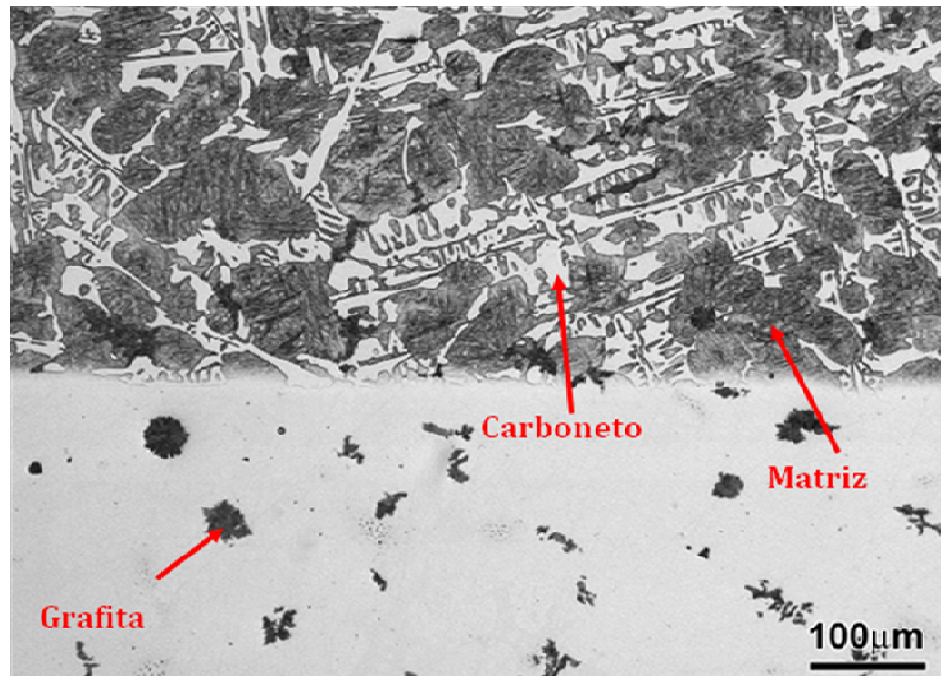
Figura 16 - Microestrutura dos materiais utilizados para cilindros de laminação.



Fonte: (CORNÉLIO, 2004).

Os Ferros fundidos de coquilhamento indefinido (*IC:indefinite chill*) ou ferro fundido do tipo “Ni-hard” apresentam uma rica constituição em carbonetos eutéticos em matriz martensítica. São chamados de indefinidos pelo fato de também apresentar grafita em sua microestrutura, estando em posição intermediária entre o ferro fundido branco e o cinzento. Entretanto, a grafita observada possui morfologia intermediária entre veios e nódulos conforme é demonstrado na Figura 17, que é uma micrografia em que a amostra foi parcialmente atacada com Nital 2% (2% de ácido nítrico e 98% de álcool etílico).

Figura 17 - Microestrutura de ferro fundido de coquilhamento indefinido.



Fonte: (SERANTONI, 2010).

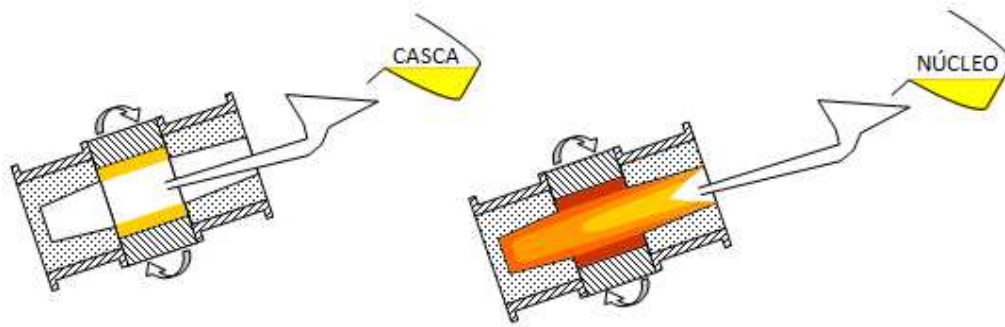
A grafita tem um papel importante de melhorar as propriedades da superfície do produto laminado, sendo aplicada assim particularmente para os materiais de cilindros das últimas cadeiras (ZYBILL, 2014). E se não houvesse a grafita nessa estrutura, a grande quantidade de carbono seria encontrada na forma de carbonetos o que fragilizaria o cilindro e levaria a uma tendência de geração de trincas durante a operação (BRANDNER, 2013).

2.5 – O PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CILINDROS DE LAMINAÇÃO

Os cilindros, que são produzidos com pescoço em ferro fundido nodular e mesa e ombros (em sua maioria dos casos) de ferros fundidos resistentes ao desgaste, obtidos por dupla fusão e centrifugação, conforme Figura 18, assim que desmoldados passam

por um tratamento térmico de alívio de tensões estando em seqüência disponíveis para o processo de usinagem.

Figura 18 – Esquema de fundição por centrifugação de um cilindro bi-metálico.



Fonte: O Autor.

Uma tinta refratária acaba permanecendo aderida à mesa do cilindro após a fundição e solidificação, pois a mesma é aplicada no interior da coquilha onde se funde o cilindro por centrifugação buscando a proteção dessa coquilha. As coquilhas são furadas em todo o perímetro e comprimento em certos intervalos, na busca pela saída de gases gerados no interior da coquilha durante a fundição, gerando assim pontos na mesa dos cilindros de maior dureza superficial (MALÈRE, 2006).

Esses cilindros têm suas mesas esmerilhadas para remoção de restos da tinta refratária aderida ao cilindro, marcas de tinta mais destacadas na região dos furos de saída de gases e também a oxidação que acaba sendo gerada durante o processo de tratamento térmico de alívio de tensões e ainda, em alguns casos se faz necessária a preparação de pistas para medição de dureza.

Todas essas ocorrências geram um cenário para um processo de usinagem em que as principais características são o corte interrompido e a abrasividade gerada pelos insumos do processo de fundição. Por isso a operação de desbaste das mesas e ombros dos cilindros de laminação é feita através de insertos de metal duro, apresentando ainda um tímido desenvolvimento de usinagem com materiais cerâmicos.

Os tornos para usinagem de cilindros de laminação na usina onde são conduzidos os processos de torneamento longitudinal têm diâmetros admissíveis até 1.800 mm, distância entre pontas de 6.000 até 10.000 mm, e potências no motor do cabeçote, entre 150 e 300 kW. Estas máquinas apresentam configuração geométrica e rigidez compatíveis com as elevadas forças de corte desenvolvidas durante a usinagem de cilindros de laminação.

Em todo o processo de usinagem de cilindros de laminação de tiras a quente, a etapa de desbaste de mesa e ombros, se destaca por: apresentar o maior tempo de processo (e maior remoção de material); estar entre as três maiores tarifas (custo hora máquina – composto por mão-de-obra, insumos, etc.) de todo o processo de usinagem; ser a maior impactada quando existe o desenvolvimento de novos materiais (de mesa) de cilindros de laminação. Sendo assim, o ensaio proposto nesse trabalho auxiliará diretamente no entendimento da diferença de usinabilidade obtida nessa etapa, e conseqüentemente uma melhor previsibilidade desse processo.

2.6 – USINABILIDADE DOS MATERIAIS

É facilmente encontrado na literatura que a usinabilidade não é uma propriedade intrínseca do material, mas, sim, um resultado da interação do metal com a operação de usinagem. Entendem-se, como propriedades de usinagem de um metal, aquelas que expressam o seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo de usinagem.

Para avaliação da usinabilidade, são, geralmente, usados quatro critérios, utilizados isoladamente ou em conjunto:

- Vida da ferramenta.
- Força de usinagem.
- Qualidade superficial da peça.

- Formação de cavacos (forma e tamanho dos cavacos).

Considera-se vida de uma ferramenta o tempo em que esta trabalha efetivamente (deduzido os tempos passivos) até que a sua capacidade de corte seja comprometida ou atinja um critério previamente estabelecido, como um determinado nível de desgaste (MICHELS, 2011).

Os fatores que influem na determinação da usinabilidade são:

a) Material da peça (composição química, microestrutura, dureza, propriedades mecânicas, rigidez da peça).

b) Processos mecânicos e condições de usinagem (material e geometria da ferramenta, condições de trabalho, fluido de corte, rigidez da máquina e do sistema de fixação, tipo de operação a ser realizada), segundo Baptista (2002).

Por fim na busca por maiores velocidades de processo, que no caso da usinagem pode-se citar a velocidade de corte e a velocidade de avanço, deve-se preferir materiais de ferramenta de corte com alta resistência ao desgaste e um material da peça a ser processada com alta usinabilidade. (CONSALTER *et al.*, 1987)

2.6.1 – Ensaios de Usinabilidade dos materiais

Os métodos de ensaios que buscam determinar os índices de usinabilidade podem se divididos em dois: os ensaios de longa duração e de curta duração, sendo que só os últimos fornecem resultados num intervalo de tempo pequeno e com reduzido consumo de material. No entanto, os ensaios de longa duração representam melhor as condições reais de usinagem, porém, por questões de economia, tempo e equipamentos costumam ser inviáveis para realização na indústria (CONSALTER *et al.*, 1987).

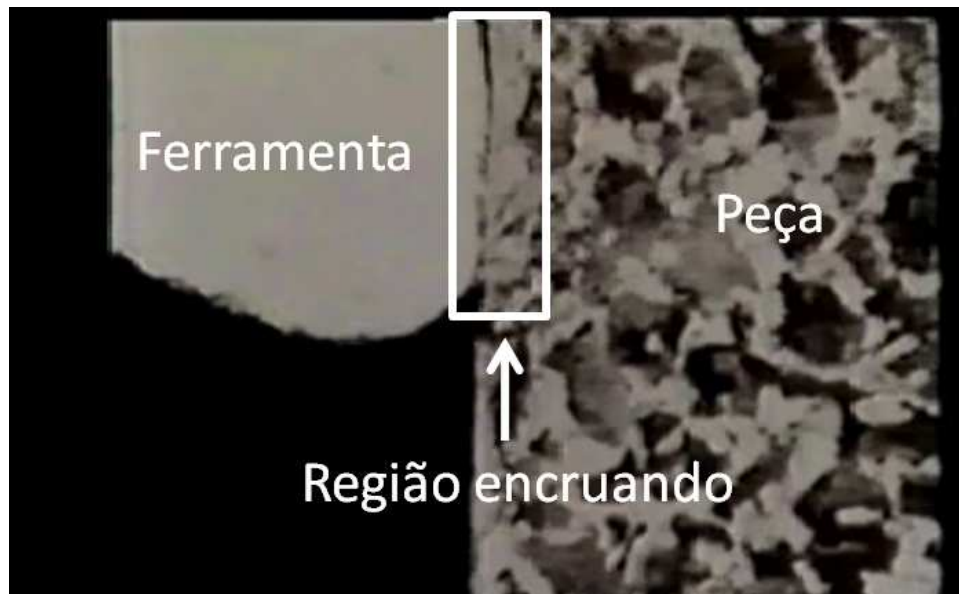
2.6.2 – A influência das propriedades do material na usinabilidade

Valores baixos de dureza e resistência mecânica normalmente favorecem a usinabilidade, porém matérias com alta ductilidade (de alta deformação plástica antes da ruptura) favorecem a formação da aresta postiça de corte e assim geram os inconvenientes de se perder a aresta e sua afiação em sua concepção. Baixos valores de ductilidade favorecem a usinabilidade dos materiais, pois a formação de cavacos curtos é facilitada e se perde menos energia no atrito cavaco-superfície de saída da ferramenta. Porém vale ressaltar que a baixa ductilidade se consegue com alta dureza e vice-versa, e assim uma equalização desses fatores resulta em uma usinabilidade ótima.

A condutividade térmica é uma propriedade que interfere na usinabilidade dos materiais, pois o calor gerado no processo de usinagem pode gerar um desgaste prematuro da ferramenta de corte. Os materiais com maior condutividade térmica são os alumínio, seguidos pelos aços sem liga, aços ligados, aços inoxidáveis e ferros fundidos.

O encruamento, destacado na Figura 19, é o nome dado para o fenômeno de aumento de resistência do metal após ser deformado plasticamente, ou seja, ocorre a formação de uma fina camada de dureza decorrente da pressão de corte de uma ferramenta. Um material com alta taxa de encruamento requer muita energia para a formação do cavaco, ou seja, apresenta um alto valor da pressão específica de corte (baixa usinabilidade) acarretando em um aumento de dureza numa fina camada da superfície usinada (DINIZ *et al.*, 2003).

Figura 19 - Imagem do fenômeno de encruamento sendo gerado.



Fonte: (Adaptado do Manual Técnico Seco, 2012).

2.6.3 – Aspectos Metalúrgicos e a Usinabilidade dos materiais

De uma maneira geral os ferros fundidos são considerados materiais de alta usinabilidade (GUESSER, 2009). Vale ressaltar que os índices de usinabilidade usualmente encontrados na literatura são apresentados como valores referentes a tipos genéricos de ferros fundidos, considerando apenas a forma da grafita, ou seja, cinzentos, maleáveis e nodulares, ou então se referindo impropriamente a ferros fundidos duros, médios e macios. Sabe-se que para um mesmo tipo de ferro fundido existem diferentes classes e que em uma mesma classe as microestruturas não são necessariamente idênticas. A usinabilidade apresenta uma melhor correlação com a microestrutura dos materiais do que com a composição química, a dureza média ou a propriedade mecânica (classe).

A grafita apresenta um efeito positivo no que se refere à vida da ferramenta de usinagem, pois é um componente de dureza relativamente baixa quando comparada com os constituintes da matriz; e isto produz descontinuidades, facilitando a quebra do

cavaco na usinagem, até por que ela reduz o módulo elástico do material (CHOI, 1999). A grafita atua também como agente lubrificante, reduzindo o atrito entre ferramenta e peça e dificultando a ocorrência de microssolda. A quantidade de grafita na estrutura do material é mais importante que sua morfologia e distribuição, sendo que o ferro fundido tem a sua usinabilidade melhorada com o aumento da quantidade de grafita (CONSALTER *et al.*, 1987).

Assim sendo, o ferro fundido branco, que apresenta pouca grafita em sua microestrutura e grande formação de carbonetos duros e abrasivos, apresenta usinabilidade de ordem 10 vezes menor que o ferro fundido cinzento.

A usinagem de ferro fundido gera o cavaco de ruptura e esses pequenos cavacos podem ser carregados com o fluido de corte caso esse seja usado durante a usinagem e por isso na maioria dos casos se opta pela usinagem a seco, evitando assim a penetração desses cavacos nas partes de atritos da máquina-ferramenta. Em contrapartida essa escolha gera um aquecimento considerável da peça durante a usinagem o que pode atrapalhar na obtenção de dimensões com tolerâncias mais estreitas (DINIZ *et al.*, 2003). Exemplos de cavacos de ruptura gerados na usinagem de cilindros de laminação são mostrados na Figura 20.

Figura 20 - Cavacos de ruptura obtidos na usinagem de cilindro de laminação.



Fonte: O Autor.

Em função da possibilidade da transformação da microestrutura do aço ou ferro fundido, sem alteração da composição química, ela se constitui num importante fator de influência na usinabilidade. Os microconstituintes alteram as características de ductilidade e de fragilidade em função da sua presença, quantidade e forma, promovendo diferentes condições de quebra de cavaco, abrasividade, força e temperatura de corte (FERRARESI, 1977).

Os ferros fundidos possuem microestrutura composta por uma matriz metálica, constituída por quantidades variáveis de ferrita, perlita, martensita, bainita e carbonetos, cujas presenças dependem da composição química e das condições de resfriamento, tanto no estado bruto de fundição como da realização de tratamentos térmicos. A quantidade e distribuição destes constituintes influem diretamente na usinabilidade do material.

A ferrita dos ferros fundidos é um constituinte de baixa dureza (110-160 HV) cuja presença na estrutura melhora a usinabilidade do material. A maior parte da ferrita encontrada nos ferros fundidos contém silício em teores relativamente altos e, com isso, há uma redução da ductilidade correspondendo a uma melhor usinabilidade. Entretanto, como o silício endurece a ferrita por solução sólida, teores superiores a 3% deste elemento resultam em queda sensível na usinabilidade.

A perlita é o constituinte predominante na estrutura dos ferros fundidos mais usados em Engenharia, combinando boas propriedades mecânicas com razoável usinabilidade. É constituída por camadas alternadas de ferrita e cementita e, dependendo do espaçamento destas camadas, a perlita é considerada grosseira ou fina. Os ferros fundidos de perlita mais grossa são mais usináveis (CONSALTER *et al.*, 1987).

A cementita é um constituinte de elevada dureza (750-800 HV) e, portanto muito abrasivo. Sua presença nos ferros fundidos, mesmo em pequenas quantidades, reduz sensivelmente a usinabilidade principalmente em velocidades de corte relativamente altas.

O aumento da porcentagem de sulfeto de manganês nos ferros fundidos produz consideráveis efeitos benéficos na vida da ferramenta, já que se diminui o coeficiente

de atrito em até cinco vezes na interface cavaco-ferramenta (PEREIRA, 2006). O aumento da quantidade de eutéticos fosforosos causado por maiores teores de fósforo reduz a usinabilidade, porém com efeito, sensivelmente inferior que a presença de carbonetos livres na microestrutura (CONSALTER *et al.*, 1987).

A presença de fases aciculares tipo bainita e martensita, em função do efeito extremamente abrasivo, também são indesejáveis na usinagem.

O tamanho de grão é um dos parâmetros a se considerar, devido ao efeito de fragilização do cavaco, produzido em função de uma estrutura de grãos grosseiros. Porém, com uma estrutura mais refinada, menores são as fronteiras intergranulares e maiores são os contatos de natureza química e eletrostática, melhorando o comportamento frente às solicitações mecânicas impostas no trabalho de usinagem.

A adição de elementos de liga produz modificações microestruturais, conduzindo a um endurecimento, que tem reflexo sobre as propriedades mecânicas obtidas e sobre a usinabilidade, dependendo da quantidade, forma e distribuição desses elementos. Os elementos ligantes podem também formar partículas duras e abrasivas, prejudicando a usinabilidade (BAPTISTA, 2002).

2.7 – MATERIAIS DE FERRAMENTAS DE CORTE

Qualquer que seja o material para ferramenta em consideração, é necessário que ele apresente uma série de requisitos, de menor ou maior importância, cuja avaliação facilitará a sua seleção em função das condições de serviço. Três das principais características são: Dureza a quente, tenacidade e resistência ao desgaste.

Para a seleção criteriosa do material de ferramenta, uma série de fatores deve ser ponderada, dentre os quais pode se mencionar os seguintes:

- Material a ser usinado.

- Processo de usinagem.
- Condição da máquina-ferramenta.
- Forma e dimensões da ferramenta.
- Custo do material da ferramenta.
- Emprego de refrigeração/lubrificação.
- Condições de usinagem.
- Condições da operação.

Os materiais existentes atualmente para a produção de ferramentas de corte serão brevemente descritos a seguir, e podem ser ordenados quanto a suas propriedades mecânicas conforme mostrado na Figura 21.

Figura 21 - A variação das propriedades dos Materiais de Ferramentas de Corte.



Fonte: (Adaptado de AMORIM, 2002).

Aços rápidos: são materiais com maior teor de C do que de aços comuns e Cr, Mo, W, V, Co e outros. Tem elevada resistência ao desgaste e pode trabalhar sem perder suas propriedades a até 600°C, sua estrutura básica é a martensita com carbonetos incrustados. Também podem ser utilizados com revestimentos.

Metal duro: elaborado pela metalurgia do pó, sendo composto por carbonetos (W, Ta, Ti, Nb) com um ligante metálico (normalmente Co). Estão divididos em classes (conforme Norma ISO 513) para atender a usinagem de cada tipo de usinagem conforme apresentado na Figura 22.

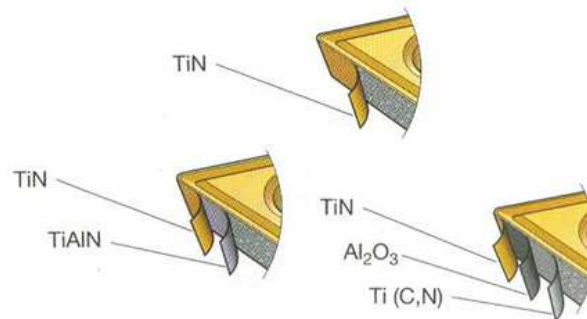
Figura 22 - A classificação normativa, conforme ISO 513, do metal duro utilizado em ferramentas de corte.

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: O Autor.

Metal duro revestido: são comumente utilizados dois processos de revestimentos nas ferramentas de metal duro, o PVD (sigla de Physical Vapor Deposition – Deposição Física a Vapor), ou o CVD (sigla Chemical Vapor Deposition – Deposição Química a Vapor) em camadas únicas ou múltiplas de TiN, TiC, Al₂O₃ dentre outras conforme demonstrado nas Figuras 23 e 24.

Figura 23 - A variação dos revestimentos em metal duro.



Fonte: (Adaptado de Manual Técnico de Usinagem Sandvik, 2005).

Figura 24 – MEV de um metal duro com triplo revestimento.



Fonte: (Adaptado de Apresentação Técnica Sandvik, 2011).

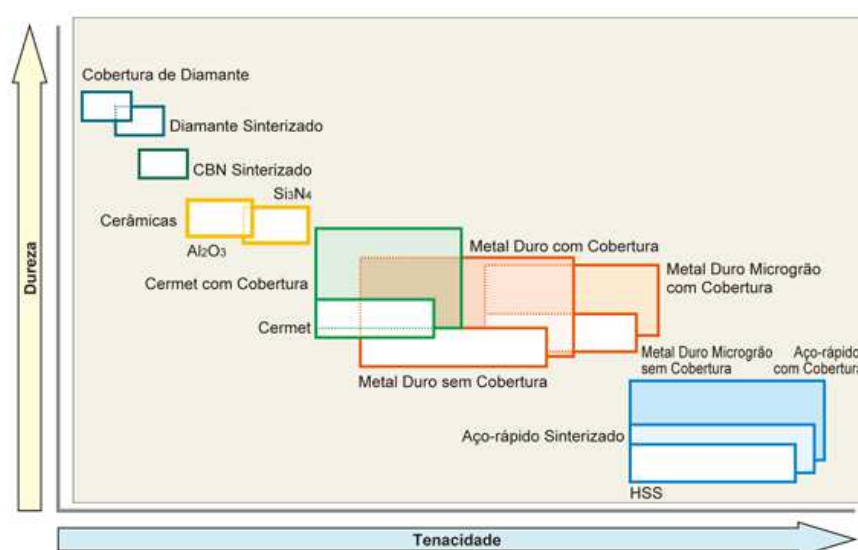
Cerâmicas: têm como principal característica a manutenção de suas propriedades em altas temperaturas de trabalho e baixa condutividade térmica. Em contrapartida, não recomendada para usinagens com corte interrompido devido a sua fragilidade, apresentando assim uma disposição à fratura com muito pouca absorção de energia (SOUZA, 2005). As composições mais comuns desses materiais são: Alumina (Al₂O₃) ou Nitreto de Silício (Si₃N₄), além de também existirem os “cermets”, que são constituídos de uma fase cerâmica e uma fase metálica (um grupo de materiais intermediário entre os metais duros e as cerâmicas).

Nitreto Cúbico de Boro (CBN): material sinterizado em altas pressões e temperaturas. Como esse material apresenta uma excelente dureza a quente, elevada resistência à oxidação e boa tenacidade, esses insertos apresentam uma excelente resistência de aresta e uma vida mais longa, nas operações de usinagem de materiais ferrosos duros. Outra vantagem é sua estabilização química, evitando assim o desgaste por difusão sua dureza é mantida altas temperaturas de trabalho (1000°C).

Diamante policristalino: produzido através da sinterização de partículas de diamante, sob condições de elevada temperatura e pressão, utilizado também em abrasivos. São recomendados quando é necessária alta resistência ao desgaste, precisão dimensional e acabamento superficial da peça usinada.

Enfim os diversos materiais de ferramentas apresentam uma variação de comportamentos em relação às suas propriedades mecânicas que permite a aplicação de todos eles nos mais diversos processos de usinagem. Na Figura 25 é demonstrada a localização de cada grupo de materiais em função do que se espera do processo de usinagem com a aplicação de tais materiais.

Figura 25 - Comparação de propriedades dos materiais de ferramentas de corte.



Fonte: (website MITSUBISHI MATERIALS, 2014).

2.8 – OS MECANISMOS DE DESGASTE EM FERRAMENTAS DE CORTE

O desgaste de uma ferramenta é considerado como uma perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta devido à ação do corte (DINIZ *et al.*, 2003).

O mecanismo de desgaste dominante em um processo de usinagem dependerá da combinação da peça de trabalho e da ferramenta de corte. Vários estudos demonstram que essa combinação pode mostrar um ou mais dos mecanismos de acordo com essas condições. Os três principais mecanismos identificados são: adesão, abrasão e difusão (TRENT, 2000).

Dentre os mecanismos acima citados, o desgaste abrasivo é o predominante na usinagem de ferro fundido indefinido, e se caracteriza como um fenômeno que consiste em perda de material da ferramenta por microsulcamento, gerada pela presença de partículas com dureza superior ao material da ferramenta, que são forçadas contra a superfície da ferramenta durante a usinagem originando crateras, entalhes e fragilização da aresta. Assim o desgaste abrasivo é característico da usinagem de materiais com elevadas concentrações de inclusões não metálicas, tais como: carbonetos, óxidos e silicatos (MARINOV, 1996). Portanto, quanto maior a dureza a quente da ferramenta, maior será sua resistência ao desgaste abrasivo. Este desgaste é mais provável de ocorrer em baixas velocidades de corte tendo a peça alta dureza.

Tanto o desgaste frontal quanto o desgaste de cratera podem ser resultados do mecanismo de abrasão mecânica, porém pode-se afirmar que esse mecanismo é mais elevado no desgaste frontal, pois a superfície de folga da ferramenta atrita com a peça de trabalho, que é um elemento rígido, enquanto que a superfície de saída, que onde ocorre o desgaste de cratera, atritará com o cavaco, que é um elemento bem mais flexível (DINIZ *et al.*, 2003).

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos todos os procedimentos experimentais realizados para o presente trabalho.

3.1 – A DEFINIÇÃO DO MÉTODO DE ENSAIO DE USINABILIDADE

A definição de como seriam realizados os ensaios de usinabilidade passou por uma linha de tomada de decisão que abrangia desde a confiabilidade do ensaio até a repetibilidade e padronização do mesmo de tal forma que possa ser replicado sempre que se julgar necessário o desenvolvimento de materiais para cilindro de laminação.

Em um primeiro momento foi estudada a hipótese de se utilizar o próprio maquinário disponível nas dependências da fábrica de cilindros, porém a ocupação do maquinário para execução de ensaios de caracterização de usinabilidade a custos de produção não torna viável tal prática, assim como a repetibilidade da peça testada fica comprometida, visto que não se tem condições de se obter um cilindro somente para teste, sendo necessária então a utilização de um cilindro da linha de produção, porém o tempo de processo e fluxo de produção desse cilindro seria afetado, inviabilizando tal alternativa.

Considerando que o departamento de Desenvolvimento e Aplicação de Materiais tem como procedimento a fundição de uma “bucha teste” de 2000 mm a 2500 mm de comprimento, demonstrada na Figura 26 com o material de casca da mesa para análise e comprovação de todo novo material desenvolvido, tem-se a possibilidade de se utilizar um segmento dessa bucha teste como material utilizado para o teste de usinabilidade (MATSUMOTO, 2013).

Figura 26 - Bucha teste de um cilindro de ferro fundido indefinido padrão.

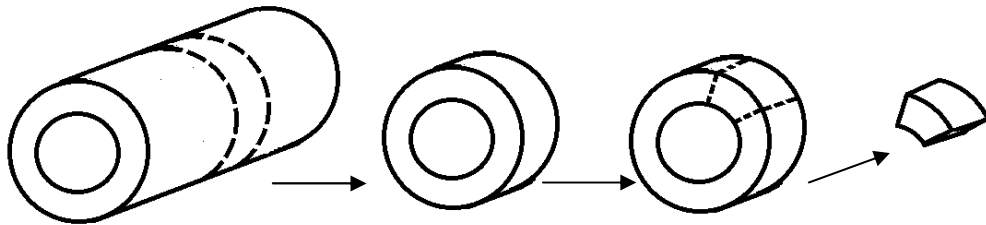


Fonte: O Autor.

Enfim, foi desenhado um ensaio de usinabilidade de fresamento (sem fluido refrigerante, assim como no processo de usinagem dos cilindros) que possa ser replicado em máquinas de menor porte (fresadora de coluna, ou ainda, um centro de usinagem) que utilizam segmentos da mesa do cilindro. Tal decisão inicialmente vai de encontro com o processo que mais sofre impacto com o desenvolvimento de materiais com diferentes níveis de usinabilidade, que é o torneamento longitudinal em caráter de desbaste, porém se tornaria inviável a produção de peças teste em menor escala, já que as mesmas não seriam submetidas às mesmas condições durante a solidificação, que influenciam na transformação das fases desse material, visto que a massa fundida é de grande porte (média de 15 toneladas) contra peças que pesariam alguns quilogramas somente. Por isso definiu-se que o processo de fresamento de um segmento retirado de um cilindro que foi submetido à condição de processo como ela realmente é seria mais representativo.

O processo de retirada do segmento da “bucha teste” consiste em primeiramente em seccionar a bucha teste em uma esmerilhadeira, obtendo assim um anel, e com esse anel busca-se sua ruptura parcial para obtenção de um segmento. Esse fluxo de extração do segmento é ilustrado na Figura 27 e os segmentos obtidos são demonstrados nas Figuras 28 e 29.

Figura 27 - Esquema de extração de segmento da bucha teste.



Fonte: O Autor.

Figura 28 - Segmento do ferro fundido indefinido padrão após o ensaio.



Fonte: O Autor.

Figura 29 - Segmento do ferro fundido indefinido microligado em desenvolvimento



Fonte: O Autor.

3.2 - OS MATERIAIS DE CILINDROS ESCOLHIDOS

Dentre os materiais de cilindros de laminação de tiras a quente que estão em constante desenvolvimento o ferro fundido de coquilhamento indefinido (*IC:indefinite chill*) tem-se destacado no ambiente industrial com uma grande evolução nas propriedades mecânicas esperadas de cilindros dessa aplicação após a adição de elementos de liga formadores de carbonetos (como por exemplo: V, Ti, Nb e W) que em contrapartida, prejudicam a usinabilidade devido ao fato que carbonetos são partículas muito duras e abrasivas. Esses cilindros são amplamente empregados nas últimas cadeiras do laminador de tiras a quente. Assim definiu-se que o ensaio de usinabilidade aconteceria comparando a vida da ferramenta na usinagem desses materiais: o ferro fundido de coquilhamento indefinido e o ferro fundido de coquilhamento indefinido microligado, que tem suas composições químicas demonstradas na Figura 30 e microestrutura demonstradas nas Figuras 31 e 32.

As amostras desses materiais foram embutidas em resina de poliéster de cura a frio, sendo realizado o preparo mecânico convencional por lixamento utilizando lixas com granulação de até de 600. O polimento final foi obtido sequencialmente em suspensão abrasiva de diamante de granulometria média de 6µm e 1µm e o ataque com Nital 2% (2% de ácido nítrico e 98% de álcool etílico).

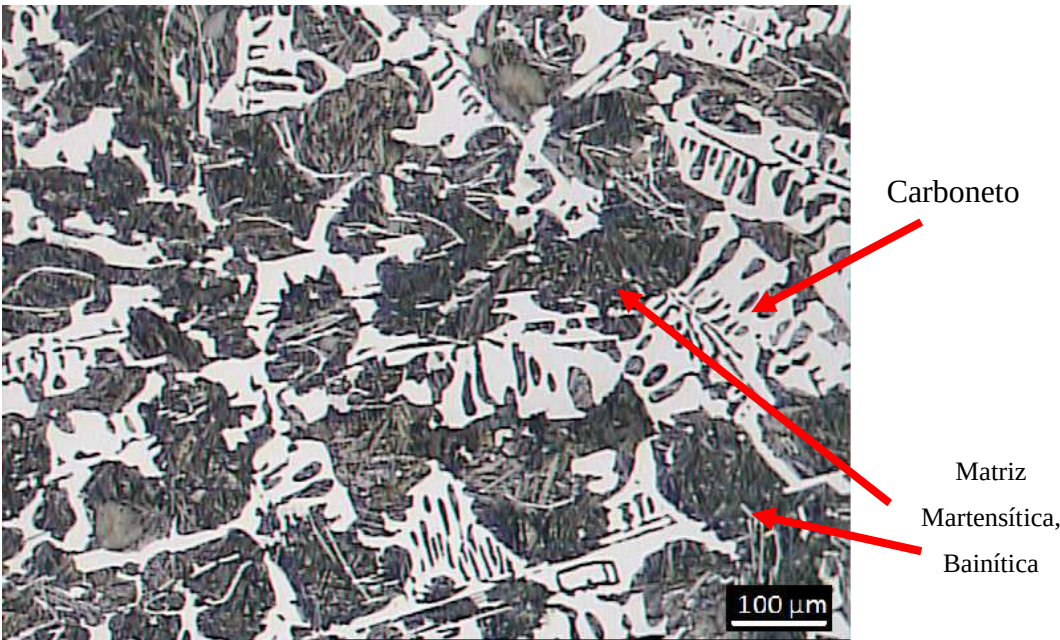
O registro das características e dos constituintes microestruturais existentes foi obtido em microscópio óptico (MO), modelo DMLM®, dotado de análise e aquisição de imagens automatizadas, ambos de fabricação LEICA®.

Figura 30 - Composição química dos materiais ensaiados.

Material		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	W	Nb+Ti
Ferro Fundido Indefinido	Mín.	3	0,55	0,45	4,1	1,4	0,25	-	-	-
	Máx.	3,6	1,25	1,3	4,8	2,1	0,7			
Ferro Fundido Microligado	Mín.	2,5	1	0,5	3	1	0,25	-	-	-
	Máx.	3,6	3	1,5	5	2,5	1	1,5	1,5	3

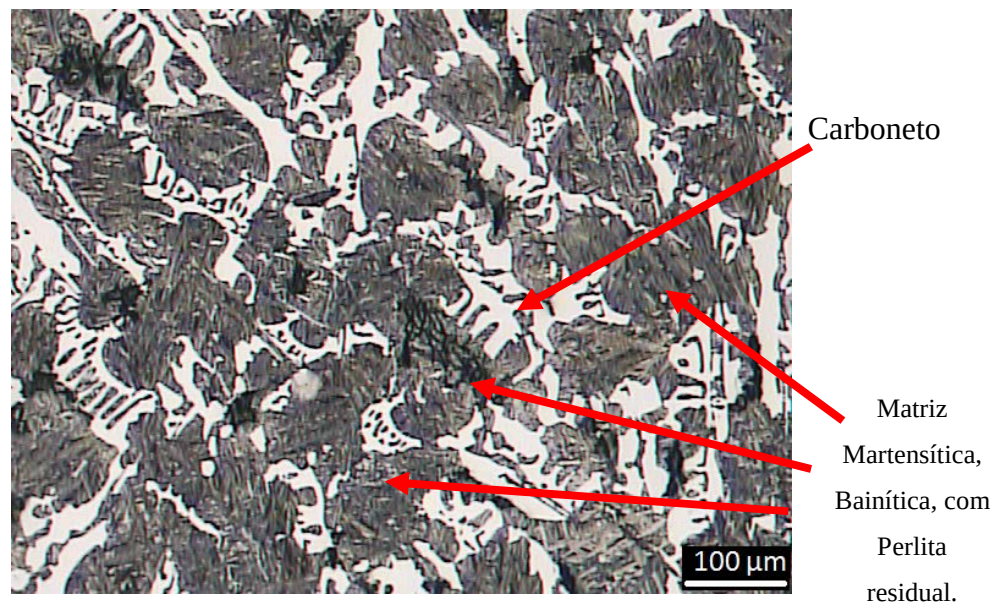
Fonte: O Autor.

Figura 31 – Microestrutura do ferro fundido indefinido ensaiado.



Fonte: O Autor.

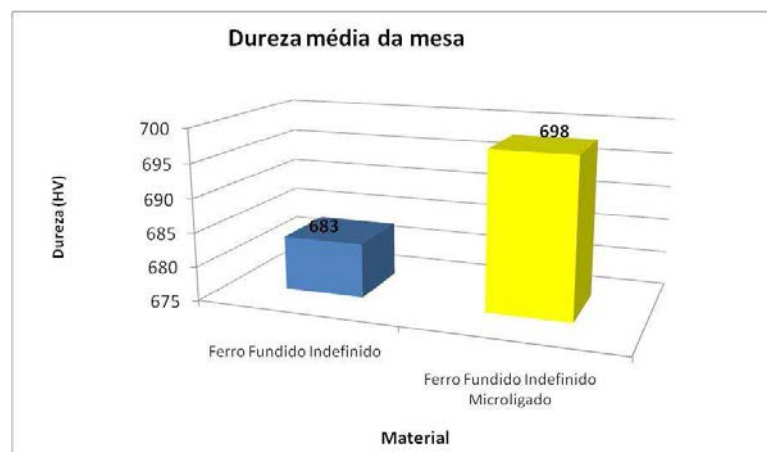
Figura 32 – Microestrutura do ferro fundido indefinido microligado ensaiado.



Fonte: O Autor.

Foi medida em uma pista de profundidade de 6 mm no centro da “bucha teste” o valor de dureza média, conforme é demonstrado na Figura 33 do material em desenvolvimento obtido foi 698 HV contra uma dureza média do material padrão de 683 HV o que para usinabilidade desses materiais não apresenta nenhuma influência significativa.

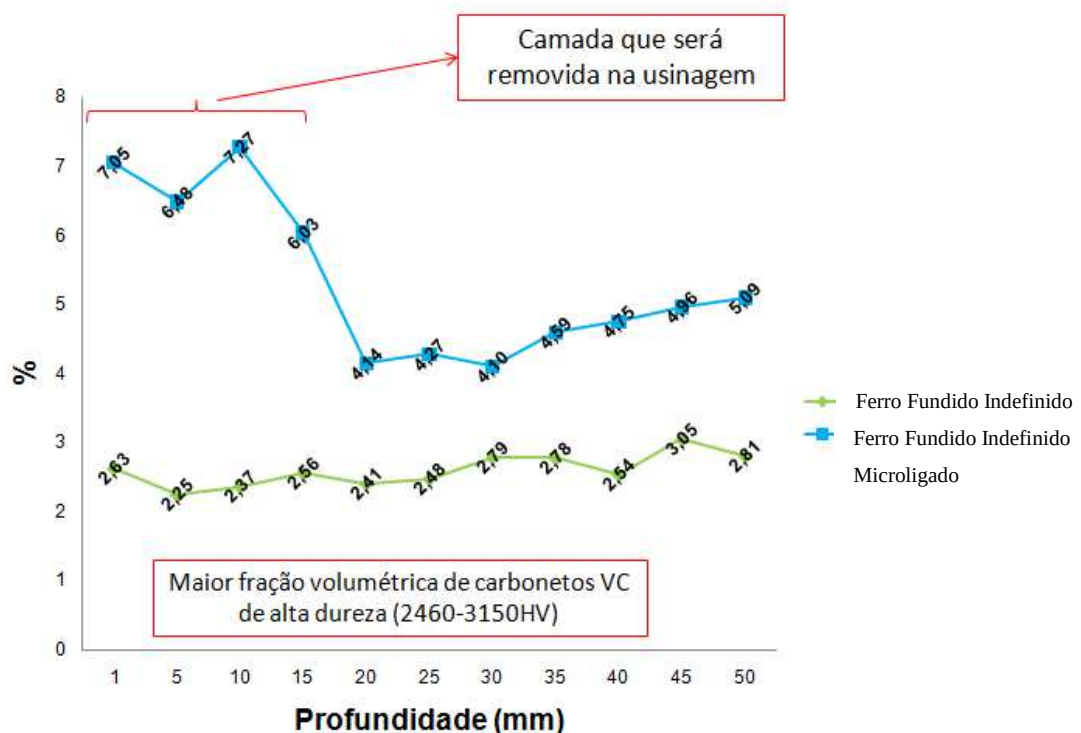
Figura 33 – Gráfico comparativo de durezas médias dos materiais ensaiados.



Fonte: O Autor.

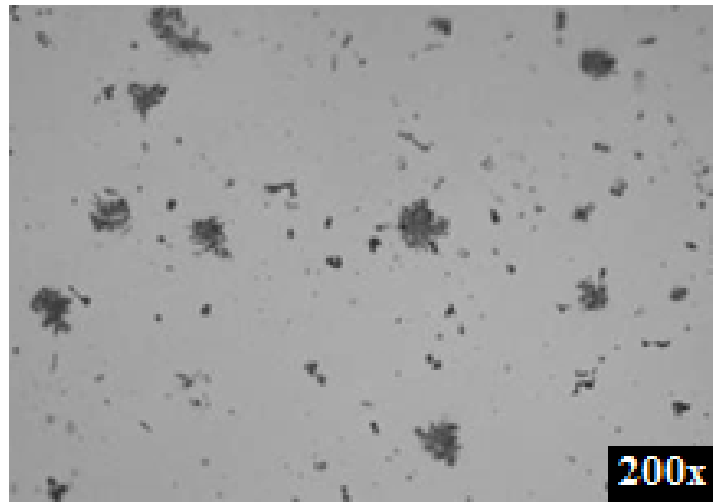
Em um anel removido da bucha foi feita uma caracterização ao longo de toda profundidade partindo do diâmetro externo de 5 em 5 mm com análise de fração de carbonetos de 7 campos em cada profundidade, com o auxílio de um microscópio óptico (MO), modelo DMLM®, dotado de análise e aquisição de imagens automatizadas, ambos de fabricação LEICA® após a realização de um ataque eletrolítico nas amostras. As caracterizações do ferro fundido indefinido microligado evidenciaram que a fração volumétrica de carbonetos VC de alta dureza aumentou significativamente conforme demonstrado nas Figuras 34, 35 e 36: o ferro fundido indefinido microligado apresentou uma variação de 4 a 7% enquanto que o ferro fundido indefinido apresenta uma variação de 2 a 3% de carbonetos VC. O fato mais interessante para o presente trabalho é que da superfície até 15 mm de profundidade a fração volumétrica apresentou percentuais entre 6 e 7%, lembrando que tal caracterização foi feita no material bruto, ou seja, esse é o material que será removido no processo de usinagem.

Figura 34 – Gráfico comparativo de fração volumétrica de carbonetos VC.



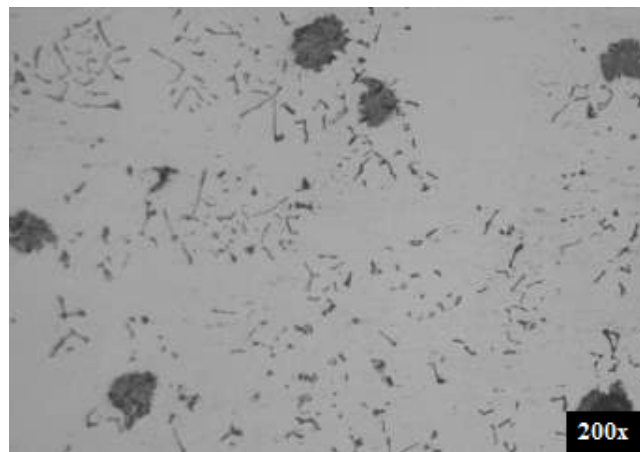
Fonte: O Autor.

Figura 35 – Micrografia para contagem da fração de VC do ferro fundido indefinido.



Fonte: O Autor.

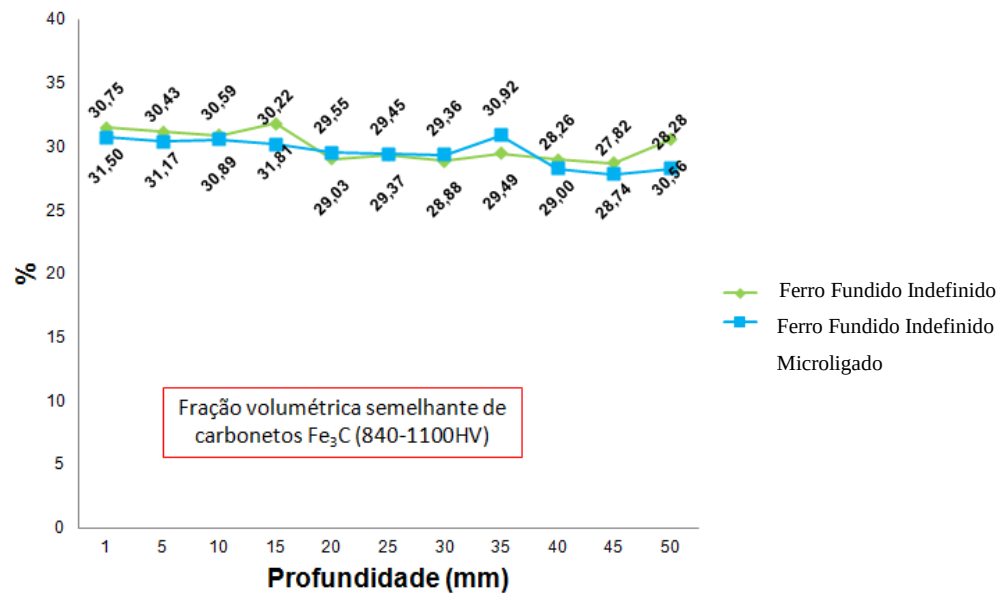
Figura 36 – Micrografia para contagem da fração de VC do ferro fundido indefinido microligado.



Fonte: O Autor.

Já para a fração volumétrica de carbonetos Fe_3C , conforme ilustrado na Figura 37, os números continuaram semelhantes, fato irrelevante para a análise comparativa de usinabilidade.

Figura 37 – Gráfico comparativo de fração volumétrica de carbonetos Fe_3C .

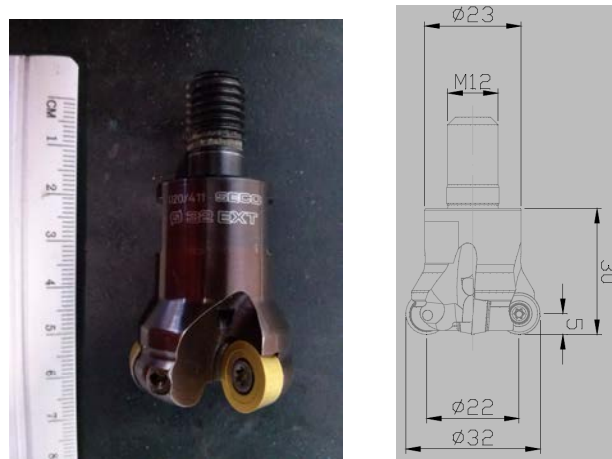


Fonte: O Autor.

3.3 – OS MATERIAIS DE FERRAMENTAS ESCOLHIDOS

O ensaio foi realizado com uma fresa toroidal de $\varnothing 32$ mm com três arestas conforme demonstrado na Figura 38.

Figura 38 – Fresa utilizada nos ensaios.



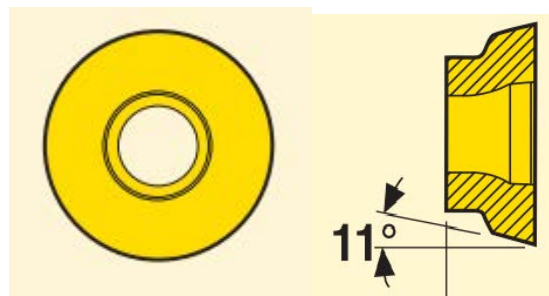
Fonte: O Autor.

Para os ensaios foram utilizados insertos redondos, ilustrados na Figura 39, de metal duro recoberto com dois diferentes materiais, com ângulo de folga de 11° , ângulo de saída de 0° e espessura de 4,76mm.

A primeira classe de inserto apresentava uma cobertura CVD (*Chemical Vapor Deposition*) de Carbetto e Nitreto de Titânio e Óxido de Alumínio que é indicada como escolha básica para aços inoxidáveis e como alternativa para operações difíceis em aços. A classe ISO desse inserto era S20. O fabricante do inserto é a Seco Tools e o código do inserto é o RPHT 1204 M0T - M08 – T350M se situando entre a classe S20 e S30.

A segunda classe de inserto apresentava uma cobertura PVD (*Physical Vapor Deposition*) de Nitreto de Titânio e Alumínio que é indicada pelo fabricante como uma classe de dureza extrema para fresamento de aços endurecidos, mas também favorável para acabamento de ferros fundidos, sendo assim essa a mais indicada para o ensaio de usinabilidade proposto nesse estudo. O fabricante do inserto é a Seco Tools e o código do inserto é RPHW 1204 M0T - MD10 – MH1000 se situando entre a classe H01 e H10.

Figura 39 – Geometria do inserto utilizado nos ensaios.



Fonte: O Autor.

3.4 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

A máquina escolhida para a realização dos ensaios, apresentada na Figura 40, foi um centro de usinagem CNC Deckel Maho DMU 50 de 18kW de potência alocado nas dependências da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pertencente à Universidade Estadual Paulista – UNESP.

Figura 40 – Centro de usinagem utilizado para os ensaios.



Fonte: O Autor.

O desgaste dos insertos foi monitorado em um microscópio de medição Mahr, no modelo MarVision MM200 com ampliação de 32x e mesa micrométrica, ilustrado na Figura 41. Os parâmetros utilizados para o controle de vida da ferramenta através da medição do desgaste do inserto foram: modificação do aspecto do cavaco obtido; alteração do ruído do processo, ou ainda geração de fagulhas durante a usinagem. Caso nenhuma dessas situações ocorressem, a medição aconteceria após a usinagem de todo o percurso definido na estratégia de usinagem.

Figura 41 – Microscópio de medição utilizado.



Fonte: O Autor.

A rugosidade obtida após usinagem foi medida com um rugosímetro Mahr de modelo MarSurf M300 demonstrado na Figura 42. Os parâmetros escolhidos para medição de rugosidade foram: Ra (*Roughness average*) e Rmáx (Rugosidade máxima). Foram feitas medições em três pontos da superfície após o último ciclo de usinagem em cada material com um *cut-off* de 0,8mm.

Figura 42 – Rugosímetro utilizado.

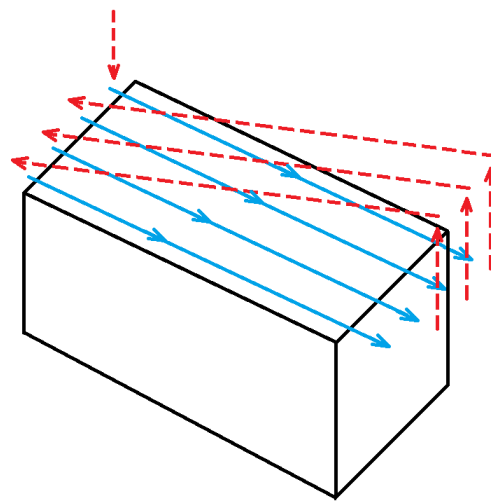


Fonte: O Autor.

3.5 – AS ESTRATÉGIAS DE PROCESSO DEFINIDAS PARA O ENSAIO

O trajeto definido em programação CNC ficou definido conforme Figura 43, com a largura fresada de 75% do diâmetro da fresa.

Figura 43 – Trajetória da ferramenta para o ensaio.



Fonte: O Autor.

O segmento foi fixado na morsa da máquina com os mordentes na face de maior largura conforme ilustrado na Figura 44, já que eram as faces com melhor relação de perpendicularidade, além de proporcionar a melhor rigidez do processo, visto que se esperava alguma vibração na usinagem.

Figura 44 – Segmento fixado na máquina.



Fonte: O Autor.

3.6 – OS PARÂMETROS DE CORTE UTILIZADOS

Para a primeira classe, decidiu-se que sua utilização seria somente para um ensaio preliminar, com fins de conhecimento do comportamento do processo da usinagem (inserto, máquina, peça usinada), visto que até então não se tinha conhecimento da validação do processo (estratégia de usinagem, máquina utilizada, etc.). Assim, a velocidade de avanço foi variada até que se encontrasse um parâmetro que permitisse a avaliação melhor controlada do desgaste da ferramenta de corte. Tal situação foi realizada com a usinagem do segmento de ferro fundido indefinido.

Com a segunda classe de material de ferramenta o ensaio de usinabilidade proposto nesse estudo foi realizado, e assim ficou definido que todos os parâmetros de corte e estratégia de usinagem seriam fixados, tendo assim somente a variação do material usinado para que então se pudesse analisar a vida da ferramenta em função do desgaste da ferramenta.

3.6.1 – Os parâmetros de corte utilizados no ensaio preliminar

Nesse momento os parâmetros da Tabela 1 foram utilizados de maneira fixa e a variação da velocidade do avanço se deu conforme Tabela 2 para se observar o comportamento da vida da ferramenta.

Tabela 1 – Parâmetros de corte utilizados do ensaio preliminar.

Parâmetros	Valores
Nº de dentes (z_n)	3
Profundidade de Corte (a_p)	0,5mm
Diâmetro de corte da fresa (D_c)	32 mm
RPM	160
Velocidade de Corte (v_c)	16m/min.

Tabela 2 – Variação da velocidade de avanço.

Ensaio	Velocidade de Avanço (mm/dente)	Velocidade de Avanço (mm/min)
1º ensaio	0,125	60
2º ensaio	0,167	80
3º ensaio	0,208	100
4º ensaio	0,25	120
5º ensaio	0,313	150
6º ensaio	0,354	170

3.6.2 – Os parâmetros de corte utilizados no ensaio de usinabilidade

Para a segunda classe de material da ferramenta todos os parâmetros da Tabela 3 foram utilizados de maneira fixa.

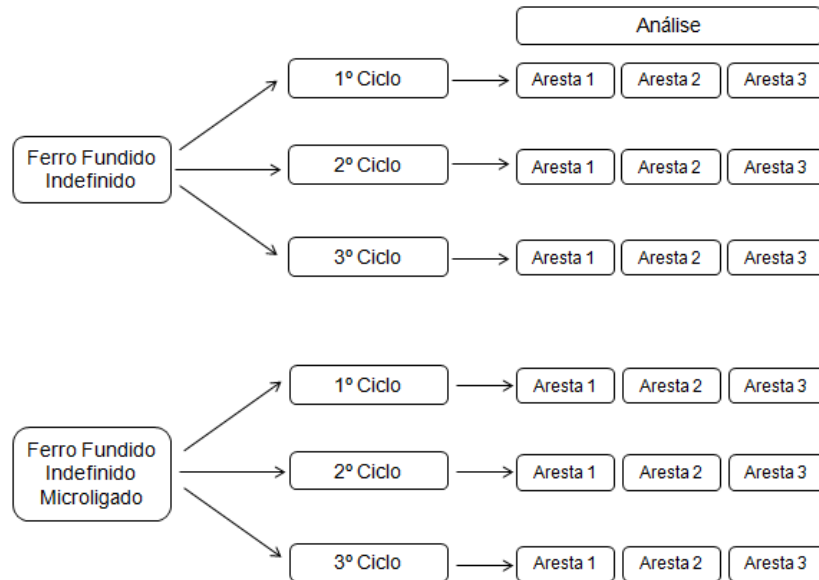
Tabela 3 – Parâmetros de corte utilizados no ensaio de usinabilidade.

Parâmetros	Valores
Nº de dentes (z_n)	3
Profundidade de Corte (a_p)	0,8mm
Diâmetro da fresa (D_c)	32mm
RPM	350
Velocidade de Corte (v_c)	35m/min.
Velocidade de Avanço (v_f)	155mm/min
Avanço por dente (f_z)	0,15 mm/dente
Contato Relativo do $\varnothing$ de Fresa (A_e)	75%

3.7 – ANÁLISE DO DESGASTE DAS ARESTAS

Foram analisadas as condições de cada uma das três arestas de cada um dos três ciclos de usinagens realizados com os dois materiais, conforme é demonstrado na Figura 45.

Figura 45 – Esquema de análise das arestas em cada um dos ciclos dos ensaios.



Fonte: O Autor.

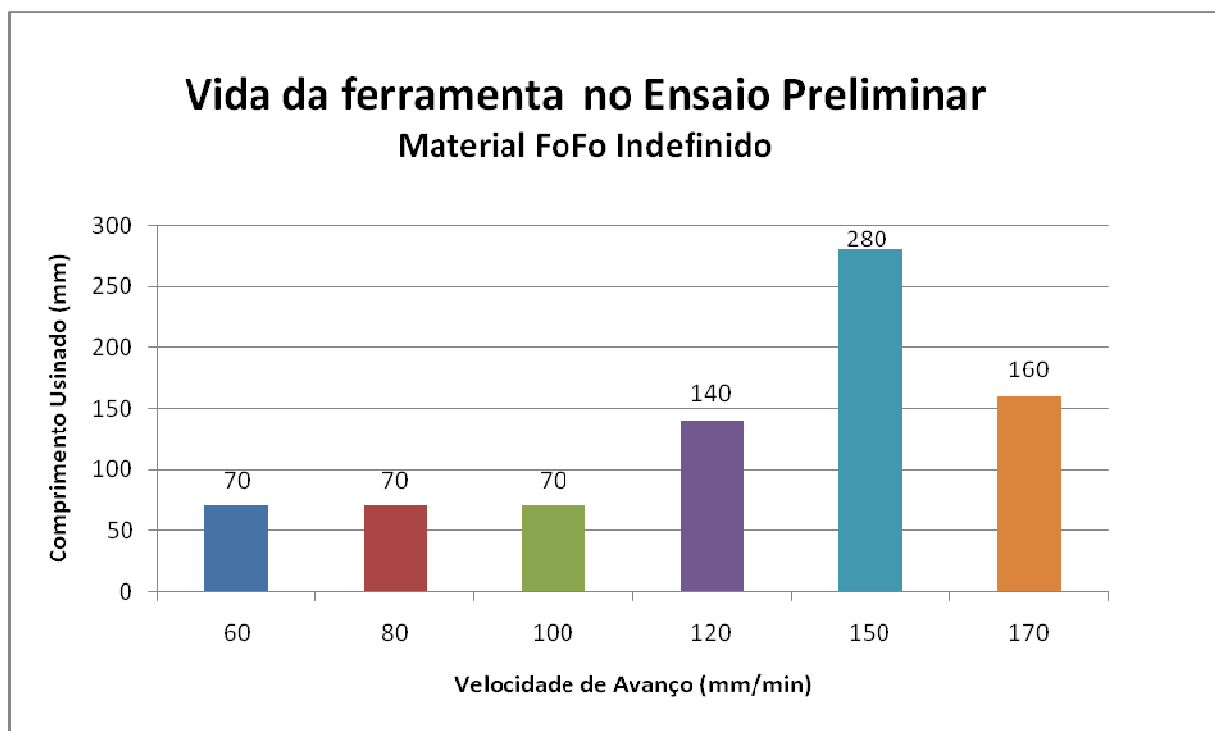
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são apresentados separadamente de acordo com os ensaios realizados.

4.1 – RESULTADOS DO ENSAIO PRELIMINAR

Na Figura 46 é mostrada a vida da ferramenta em função da velocidade de avanço na usinagem do segmento de ferro fundido indefinido.

Figura 46 – Gráfico de vida de ferramenta no ensaio preliminar.

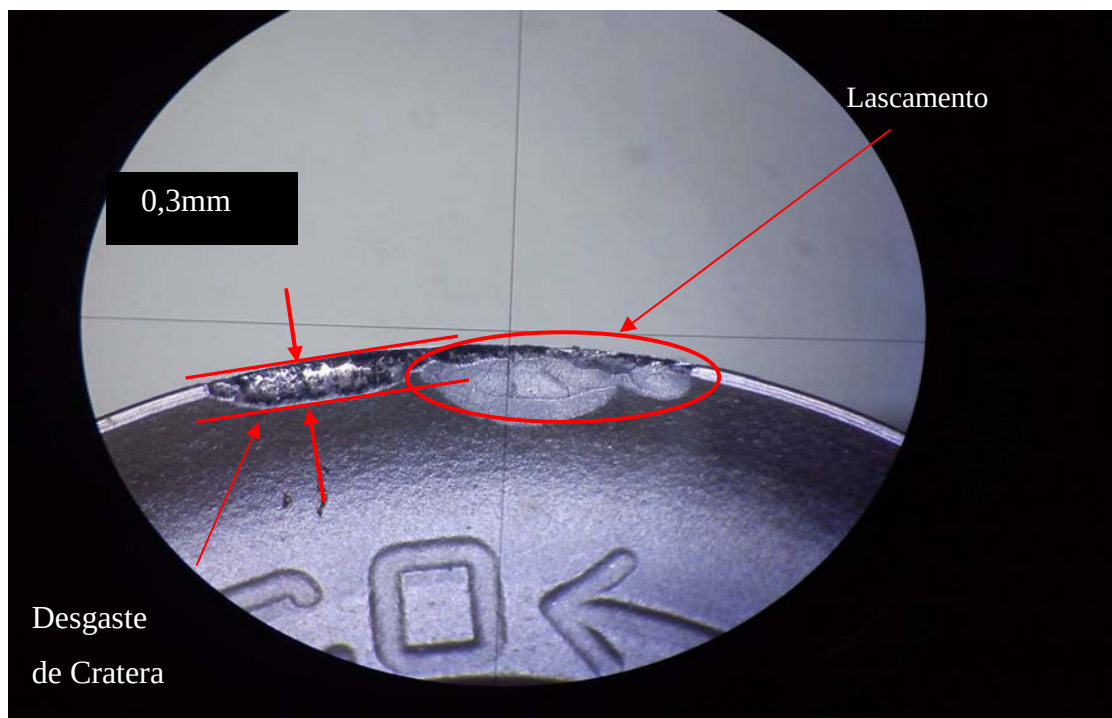


Fonte: O Autor.

Pode-se notar que o melhor resultado de vida de ferramenta se obteve com a velocidade de avanço de 150 mm/min, contribuindo assim para a escolha da velocidade de avanço que seria utilizada no ensaio de usinabilidade dos materiais.

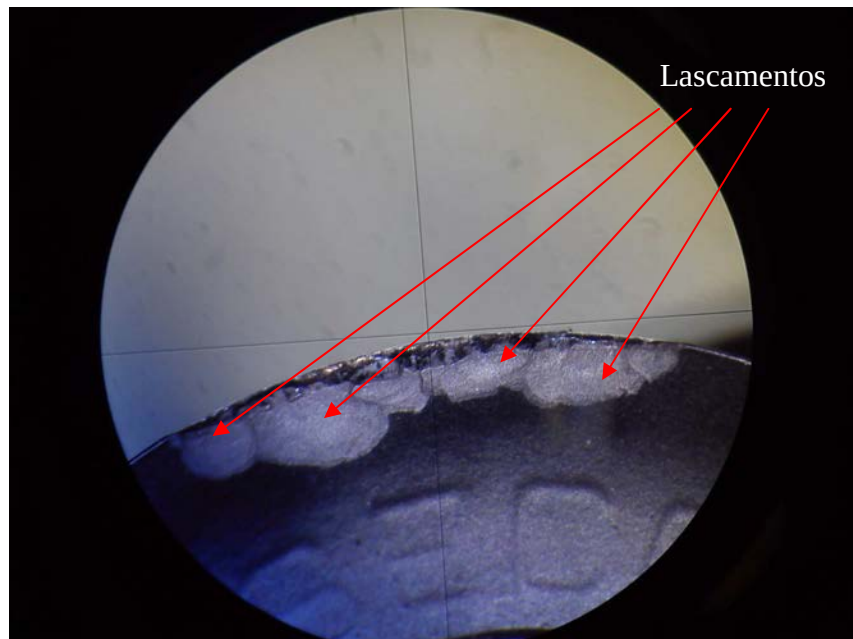
O desgaste predominante gerado na ferramenta utilizada no primeiro ensaio foi o desgaste de cratera que sempre culminou em lascamento conforme demonstrado nas Figuras 47 - com velocidade de avanço de 150 mm/min - e Figura 48 - com velocidade de avanço de 120 mm/min

Figura 47 – Condição da ferramenta após usinagem com $v_f=150$ mm/min.



Fonte: O Autor.

Figura 48– Condição da ferramenta após usinagem com $V_f=120$ mm/min.



Fonte: O Autor.

4.2 – RESULTADOS DO ENSAIO DE USINABILIDADE

4.2.1 – Condições das ferramentas após usinagem do segmento de ferro fundido indefinido

Uma tabela será apresentada com um resumo do ciclo, contendo os desgastes e o comprimento usinado até a determinação do fim do mesmo. É importante ressaltar que como a usinagem foi realizada com uma ferramenta com três arestas o ensaio sempre foi encerrado quando uma das três arestas (destacada em negrito nas tabelas) apresentava um desgaste na superfície de saída próximo a 0,3 mm ou quando havia a avaria (quebra) de uma das arestas.

4.2.1.1 – Condições das ferramentas após 1º ciclo de usinagem do segmento de ferro fundido indefinido

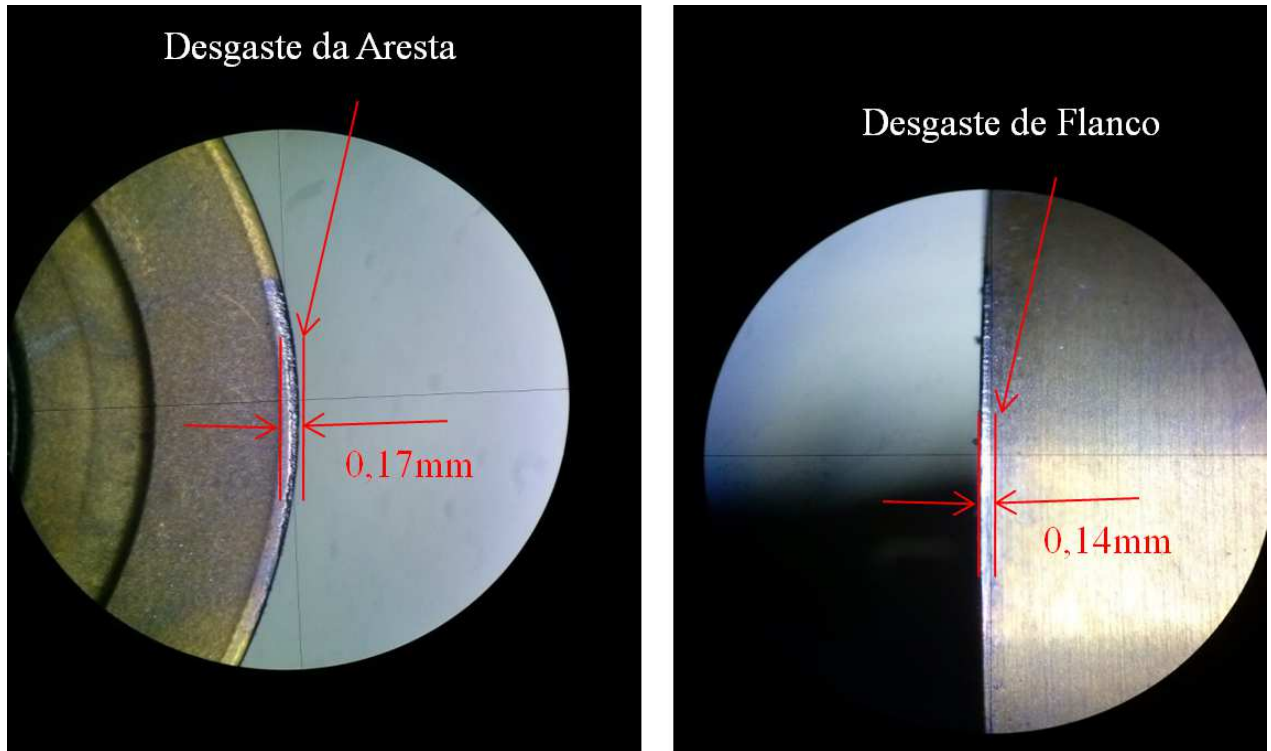
Para o 1º de ciclo de usinagem realizado no segmento de ferro fundido indefinido as condições obtidas das ferramentas foram as descritas na Tabela 4. O ciclo foi encerrado, pois a 3ª aresta apresentou um desgaste excessivo. O comprimento usinado da ferramenta foi de 1548 mm.

Tabela 4 – Desgaste das 3 arestas utilizadas no 1º ciclo de usinagem de ferro fundido indefinido.

Material	Ciclo	Aresta	Desgaste Superfície de Saída (mm)	Desgaste de Flanco (mm)	Comprimento Usinado (mm)
Ferro Fundido Indefinido	1º	1	0,17	0,14	1548
		2	0,11	0,13	
		3	0,26	0,13	

Na Figura 49 pode-se ver a condição da 1ª aresta após a usinagem, onde o desgaste por abrasão, de 0,17 mm, e o desgaste de flanco, de 0,14 mm, ocorreram, porém ainda com condições de se continuar o ciclo.

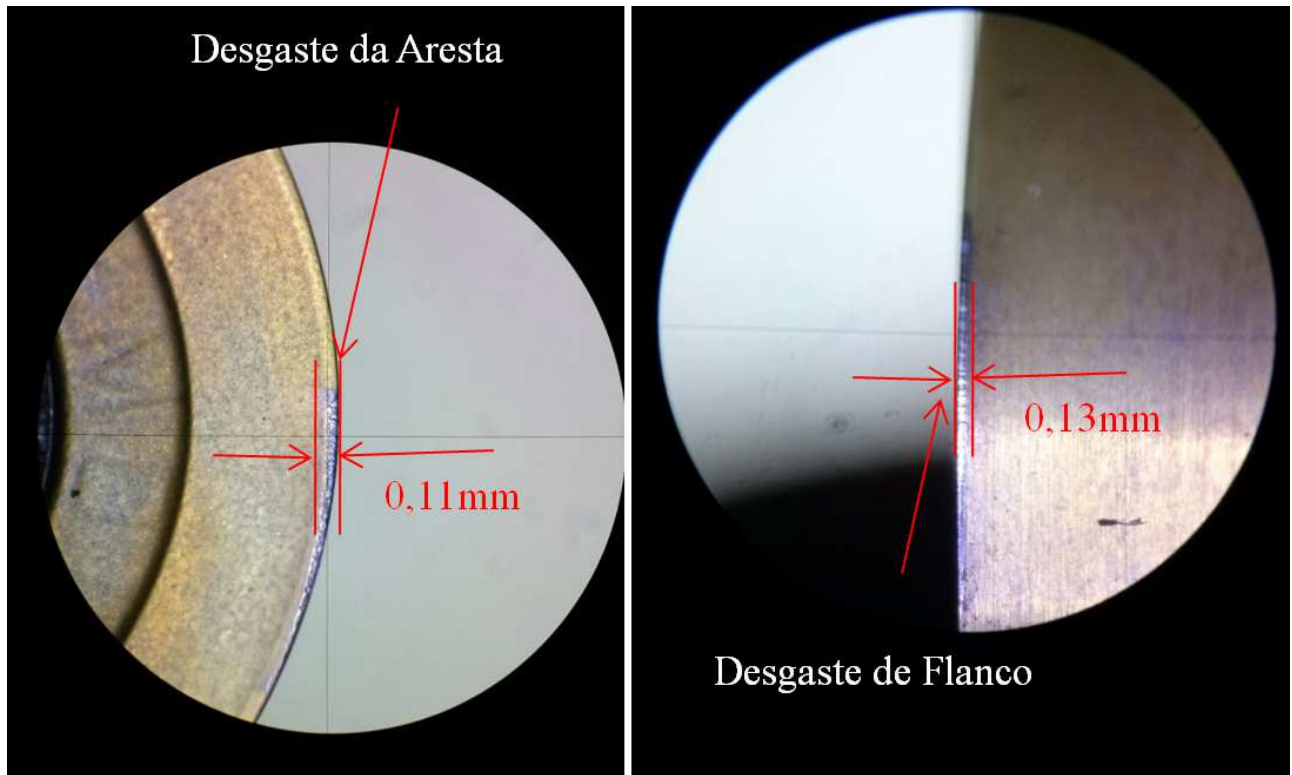
Figura 49 – Condições da 1ª aresta após 1º ciclo de usinagem de FoFo indefinido.



Fonte: O Autor.

Na Figura 50 pode-se ver a condição da 2ª aresta após a usinagem, sendo essa a de melhor condição das três arestas. O desgaste por abrasão foi de 0,11mm, e o desgaste de flanco de 0,13 mm.

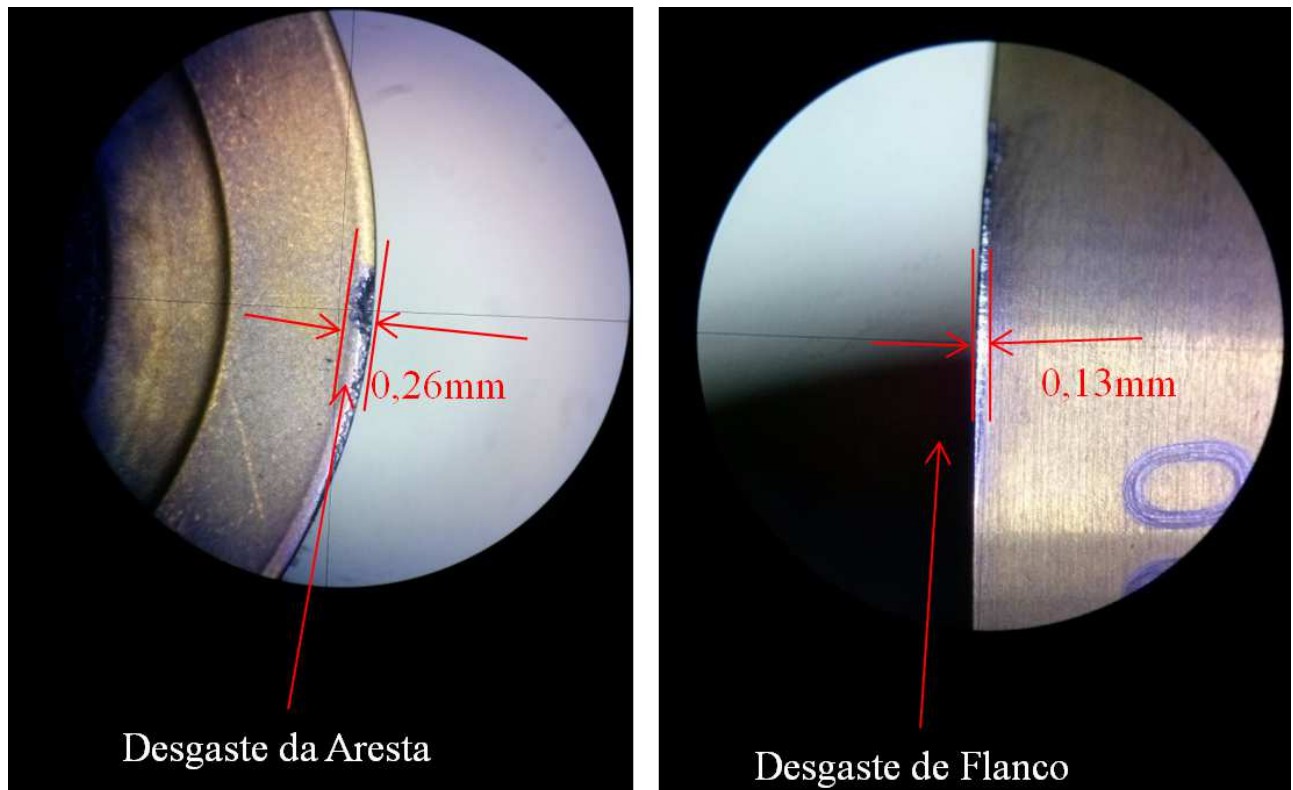
Figura 50 – Condições da 2ª aresta após 1º ciclo de usinagem de FoFo indefinido.



Fonte: O Autor.

Na Figura 51 pode-se ver a condição da 3ª aresta após a usinagem. Nessa aresta o desgaste foi de 0,26 mm impossibilitando a continuidade do ensaio e um desgaste de flanco de 0,13mm. O desgaste gerado pela abrasividade do material foi mais notório nessa aresta, pode-se perceber que a aresta sofreu pequenos arrancamentos, o que desestabilizou o ciclo de usinagem sendo assim necessária a interrupção do mesmo.

Figura 51 – Condições da 3ª aresta após 1º ciclo de usinagem de FoFo indefinido.



Fonte: O Autor.

4.2.1.2 – Condições das ferramentas após 2º ciclo de usinagem do segmento de ferro fundido indefinido

Para o 2º de ciclo de usinagem realizado no segmento de ferro fundido indefinido as condições obtidas das ferramentas foram as descritas na Tabela 5. O ciclo foi encerrado, pois a 2ª e a 3ª aresta apresentaram um desgaste excessivo. O comprimento usinado da ferramenta foi de 1124 mm.

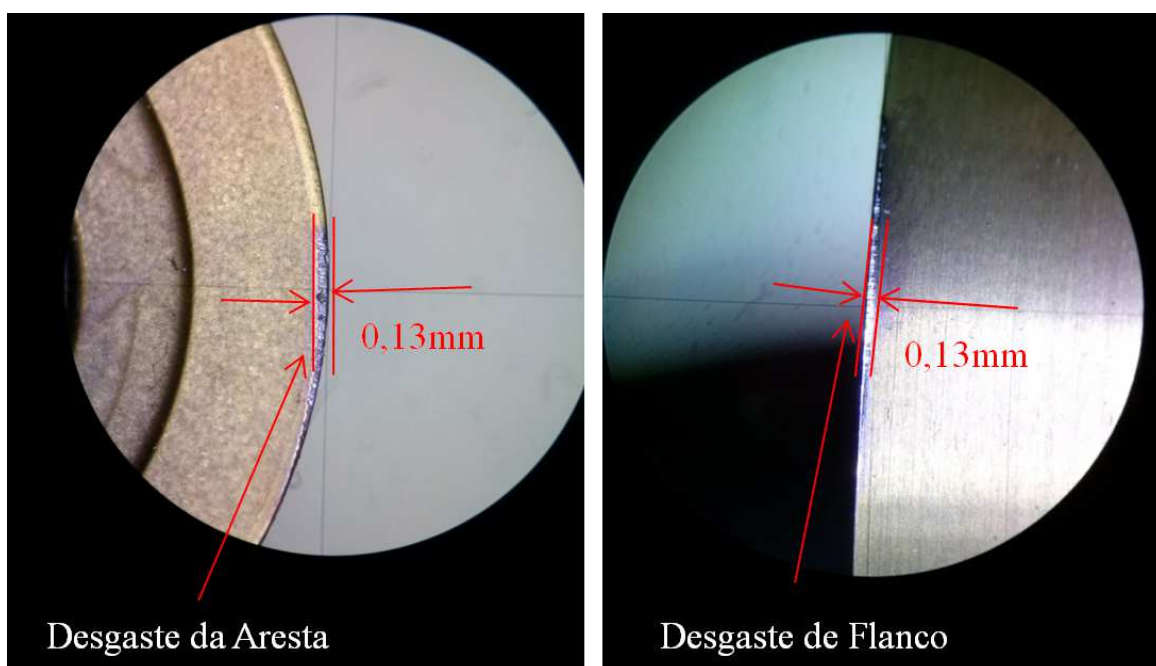
Tabela 5 – Desgaste das 3 arestas utilizadas no 2º ciclo de usinagem de ferro fundido indefinido.

Material	Ciclo	Aresta	Desgaste Superfície de Saída (mm)	Desgaste de Flanco (mm)	Comprimento Usinado (mm)
Ferro Fundido Indefinido	2º	1	0,13	0,13	1124
		2	0,13*	0,96	
		3	0,10**	0,12	

* Lascamentos na superfície de saída / ** Quebra

Na Figura 52 pode-se ver a condição da 1ª aresta após a usinagem, o desgaste na superfície de saída tem um pequeno ponto de início de lascamento. O desgaste de flanco foi pequeno (0,13 mm) o que ainda possibilitaria a continuação do ciclo.

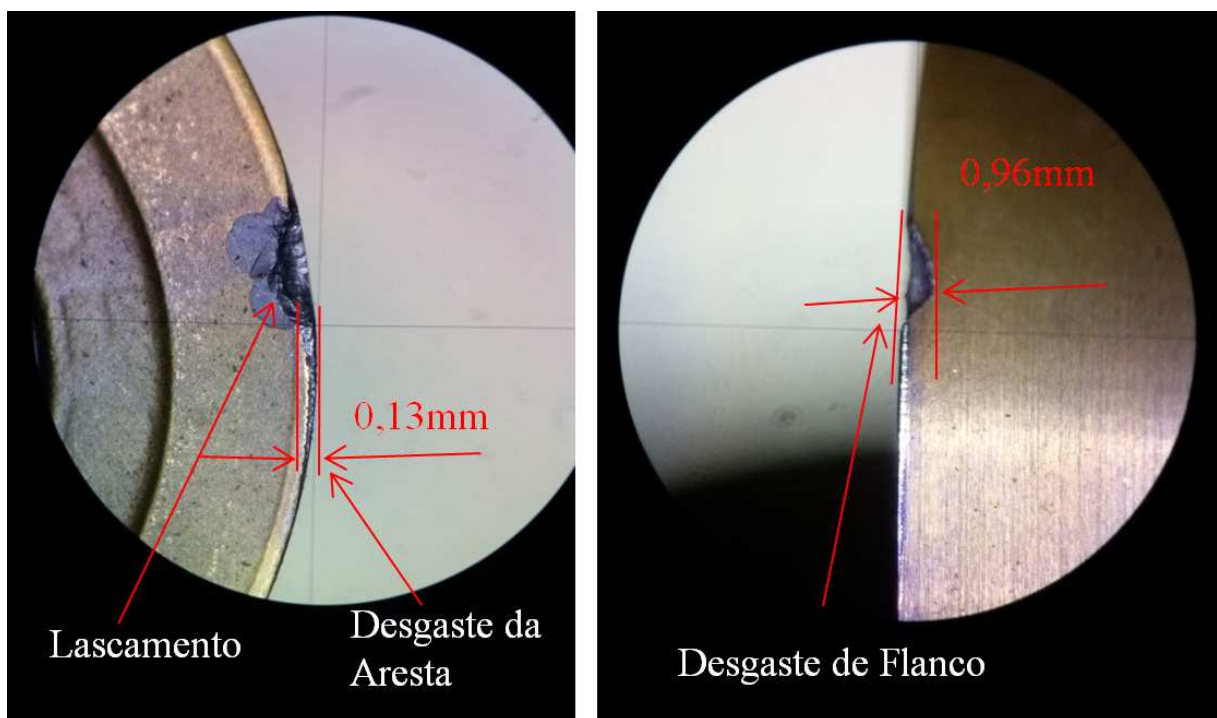
Figura 52 – Condições da 1ª aresta após 2º ciclo de usinagem de FoFo indefinido.



Fonte: O Autor.

A condição da 2ª aresta após a usinagem é demonstrada na Figura 53. Foram obtidos grandes lascamentos na superfície de saída, o que desestabilizou o ciclo de usinagem se forçando assim a interrupção do mesmo. O desgaste de flanco chegou a 0,96mm que foi gerado em consequência dos lascamentos da superfície de saída.

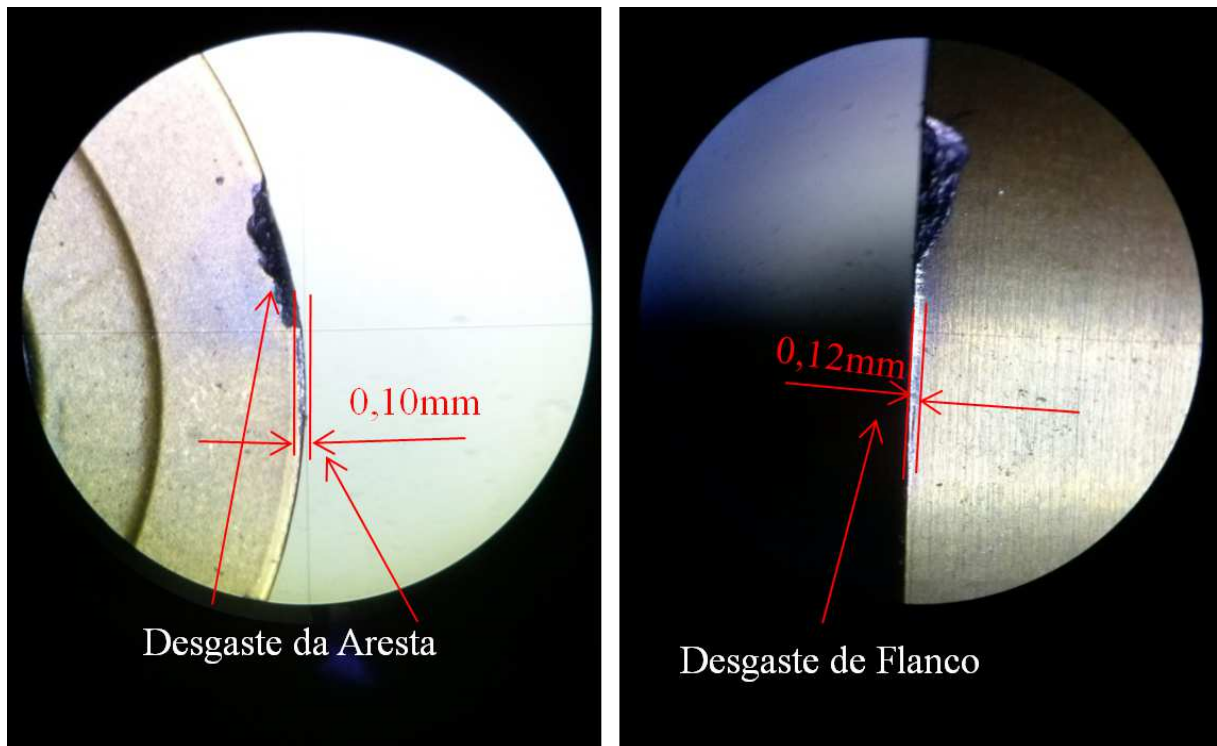
Figura 53 – Condições da 2ª aresta após 2º ciclo de usinagem de FoFo indefinido.



Fonte: O Autor.

Na Figura 54 pode-se ver a condição da 3ª aresta após a usinagem, que sofreu uma perda de material em uma região. Pode-se perceber que certa região da superfície de saída do inserto apresenta um desgaste de 0,10mm e nessa mesma região o desgaste de flanco foi de 0,12 mm.

Figura 54 – Condições da 3ª aresta após 2º ciclo de usinagem de FoFo indefinido.



Fonte: O Autor.

4.2.1.3 – Condições das ferramentas após 3º ciclo de usinagem do segmento de ferro fundido indefinido

Para o 3º de ciclo de usinagem realizado no segmento de ferro fundido indefinido as condições obtidas das ferramentas foram as descritas na Tabela 6. O ciclo foi encerrado, pois todas as arestas quebraram repentinamente o que forçou a interrupção imediata da usinagem. O comprimento usinado foi de 1932 mm.

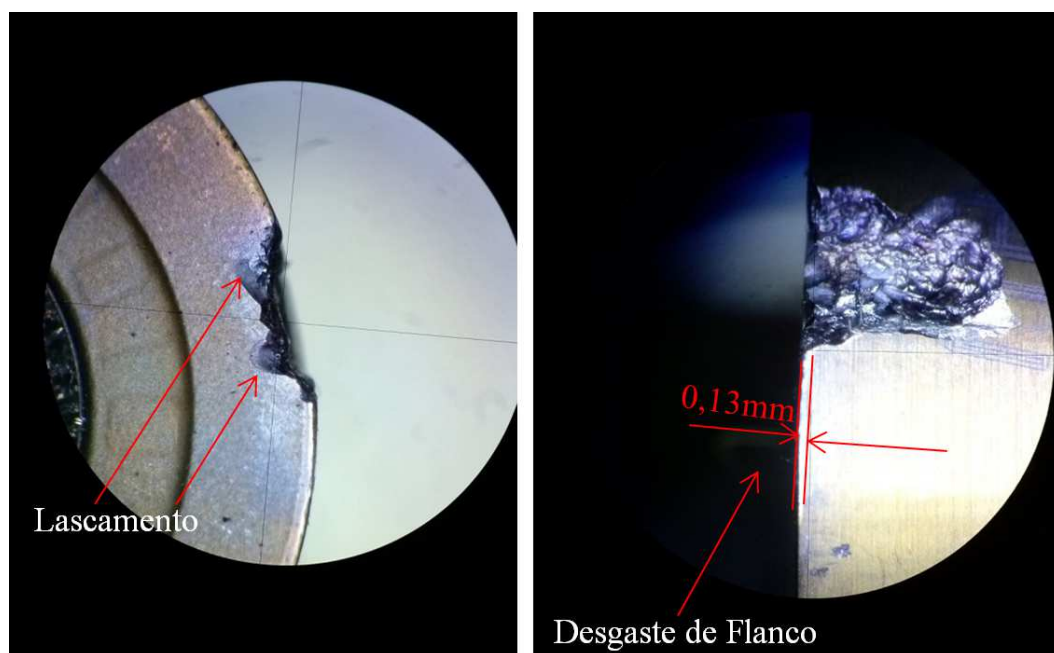
Tabela 6 – Desgaste das 3 arestas utilizadas no 3º ciclo de usinagem de ferro fundido indefinido.

Material	Ciclo	Aresta	Desgaste Superfície de Saída (mm)	Desgaste de Flanco (mm)	Comprimento Usinado (mm)
Ferro Fundido Indefinido	3º	1	*	0,13	1932
		2	0,11**	0,13	
		3	0,14**	0,15	

* Não foi possível medir o desgaste / ** Apresentou quebra, mas ainda teve-se condição de se medir o desgaste.

Na Figura 55 pode-se ver a condição da 1ª aresta após a usinagem, que apresentou uma quebra com lascamentos. Não foi possível medir um eventual desgaste na superfície de saída da ferramenta. Além da quebra consegue-se notar um pequeno desgaste de flanco de 0,13 mm.

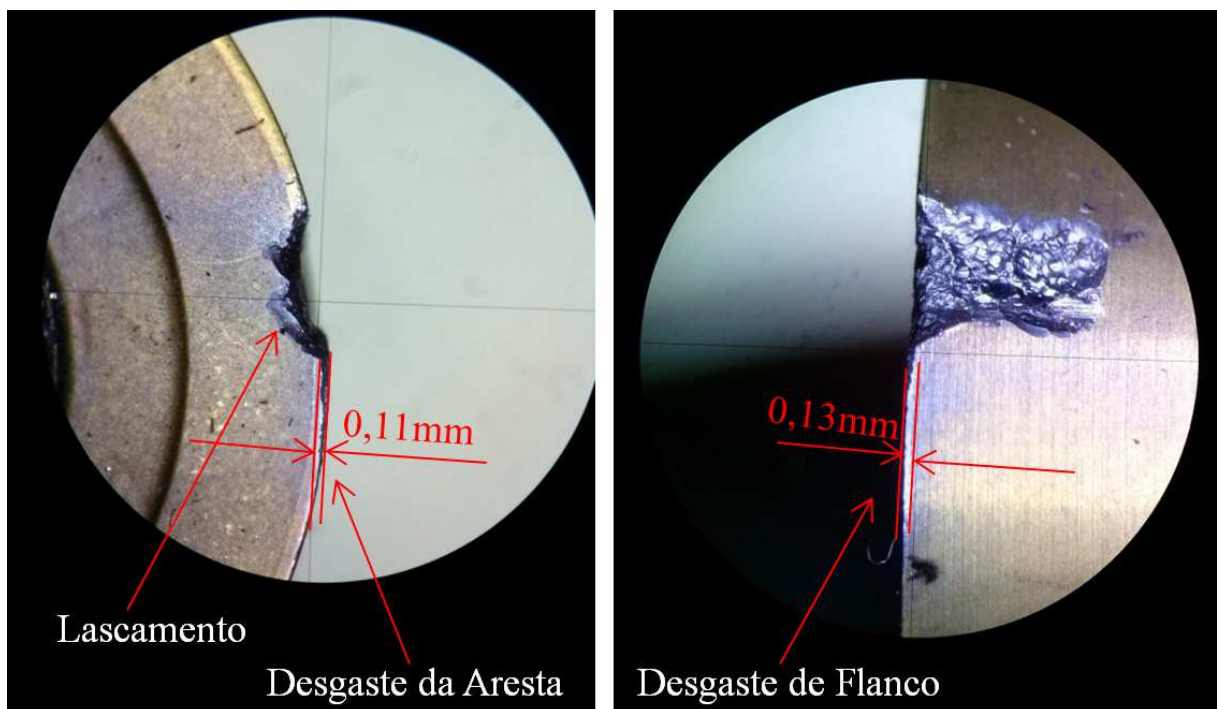
Figura 55 – Condições da 1ª aresta após 3º ciclo de usinagem de FoFo indefinido.



Fonte: O Autor.

A condição da 2ª aresta após a usinagem é demonstrada na Figura 56, que apresentou quebra também com lascamentos. O desgaste na superfície de saída era de 0,11 mm no momento da quebra, já o desgaste de flanco medido foi de 0,13 mm.

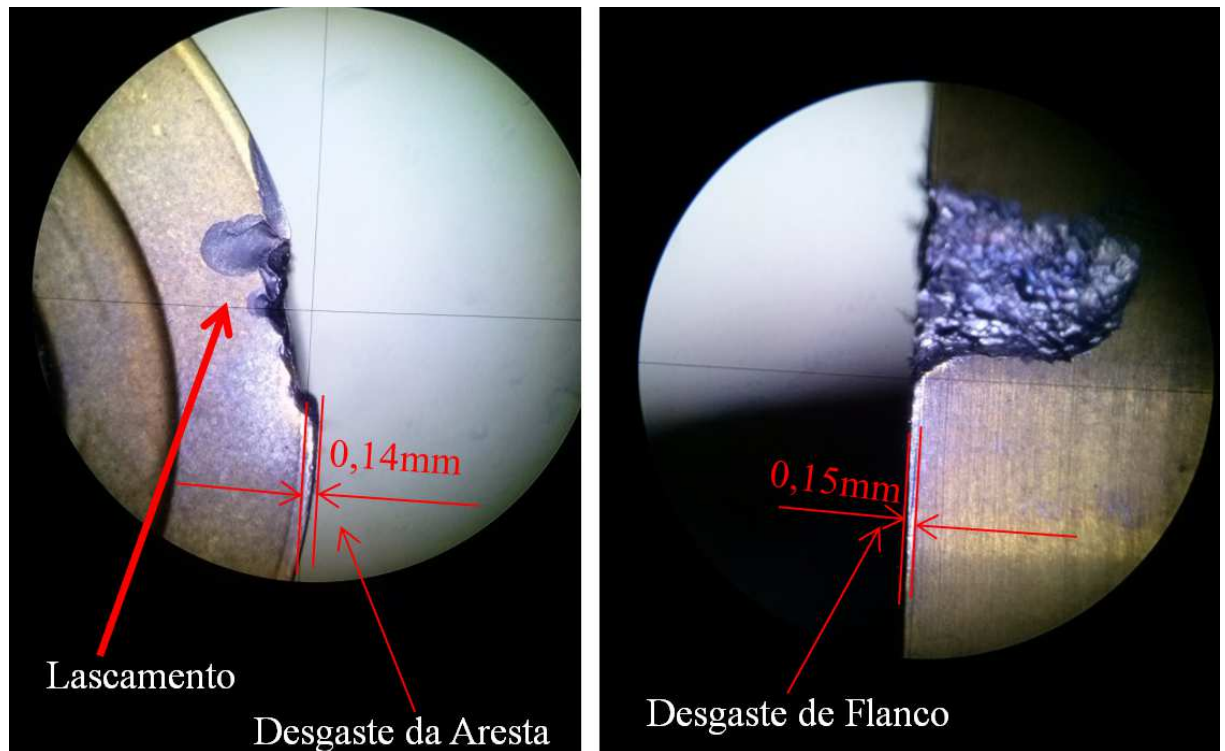
Figura 56 – Condições da 2ª aresta após 3º ciclo de usinagem de FoFo indefinido.



Fonte: O Autor.

Na Figura 57 pode-se ver a condição da 3ª aresta após a usinagem, que apresentou quebra também com lascamentos. O desgaste na superfície de saída era de 0,14 mm no momento da quebra, já o desgaste de flanco medido foi de 0,15 mm.

Figura 57 – Condições da 3ª aresta após 3º ciclo de usinagem de FoFo indefinido.



Fonte: O Autor.

4.2.2 – Condições das ferramentas após usinagem do segmento de ferro fundido indefinido microligado

4.2.2.1 – Condições das ferramentas após 1º ciclo de usinagem do segmento de ferro fundido indefinido microligado

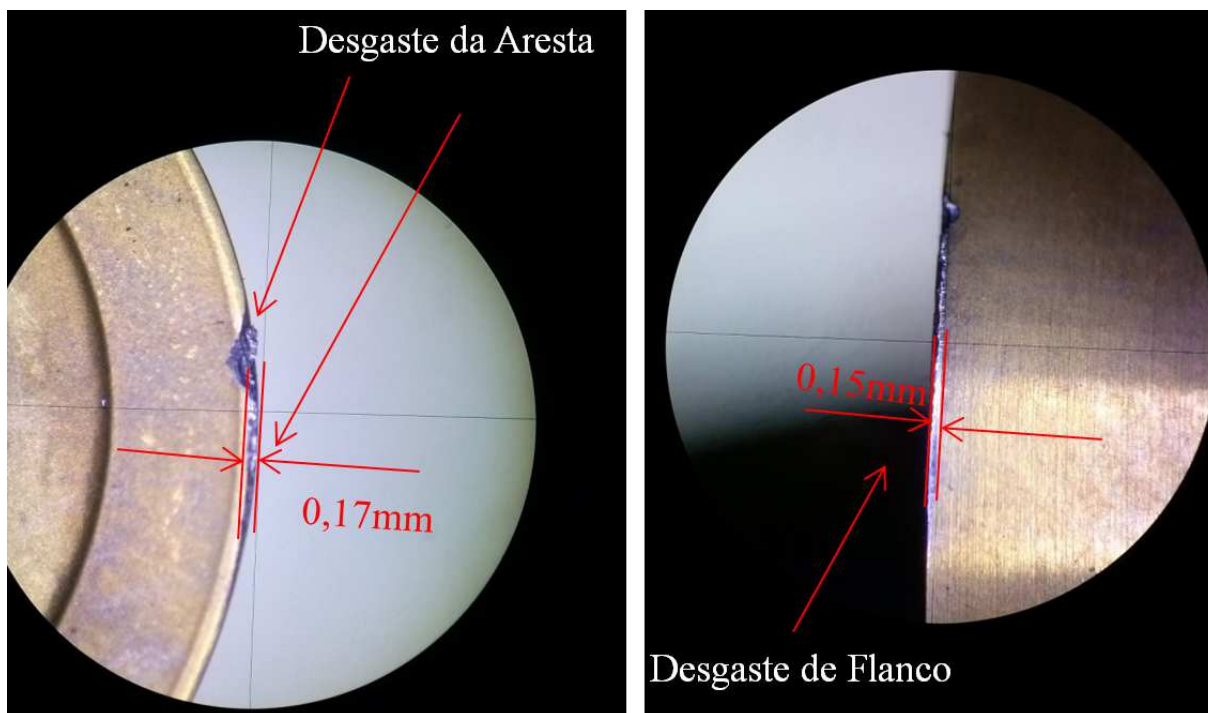
Para o 1º de ciclo de usinagem realizado no segmento de ferro fundido indefinido microligado as condições obtidas das ferramentas foram as descritas na Tabela 7. O ciclo foi encerrado, pois as três arestas apresentaram um desgaste por abrasão mecânica. O comprimento usinado foi de apenas 190 mm.

Tabela 7 – Desgaste das 3 arestas utilizadas no 1º ciclo de usinagem de ferro fundido indefinido microligado.

Material	Ciclo	Aresta	Desgaste Superfície de Saída (mm)	Desgaste de Flanco (mm)	Comprimento Usinado (mm)
Ferro Fundido Indefinido Microligado	1º	1	0,17	0,15	195
		2	0,2	0,11	
		3	0,19	0,17	

Na Figura 58 pode-se ver a condição da 1ª aresta após a usinagem, onde o desgaste por abrasão ocorreu na superfície de saída da ferramenta o valor médio encontrado foi de 0,17mm. O desgaste de flanco medido foi de 0,15mm.

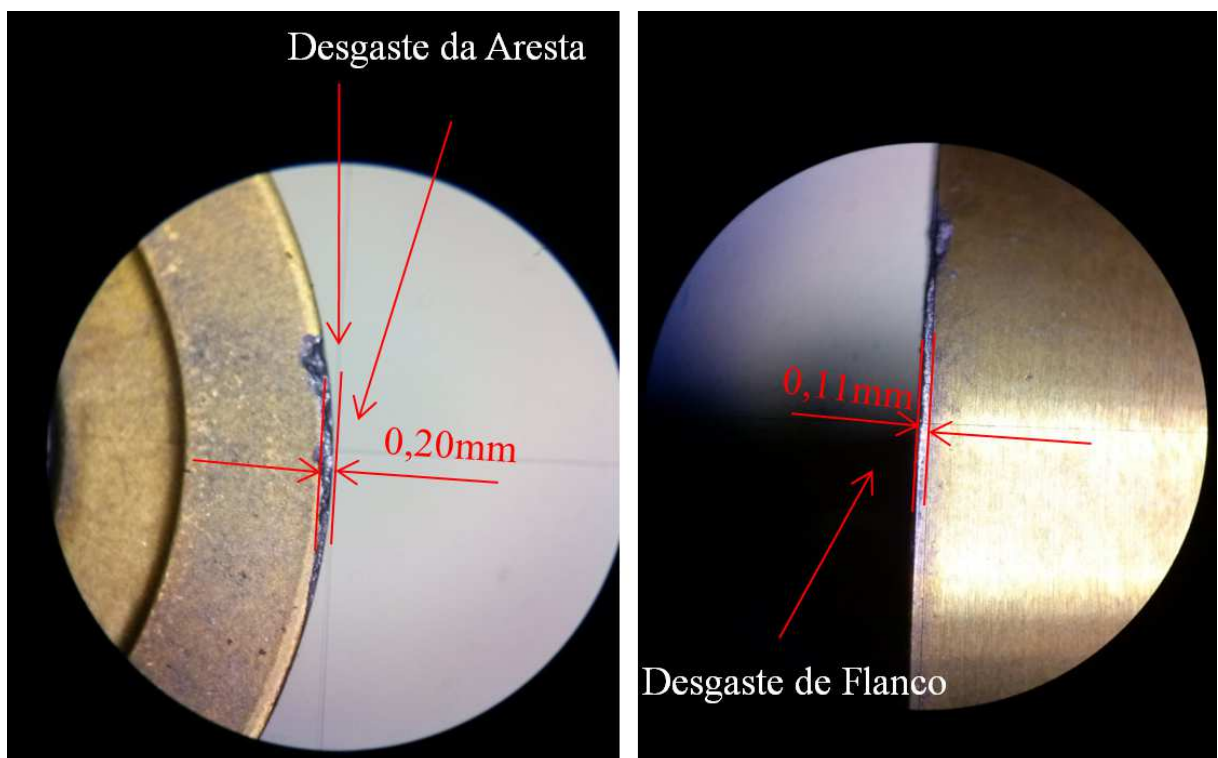
Figura 58 – Condições da 1ª aresta após 1º ciclo de usinagem de FoFo indefinido microligado.



Fonte: O Autor.

Na Figura 59 é ilustrada a condição da 2ª aresta após a usinagem, onde o desgaste por abrasão ocorreu na superfície de saída da ferramenta com um valor médio maior que a 1ª aresta – de 0,20 mm. O desgaste de flanco por sua vez, foi menor que o da 1ª aresta – foi de 0,11 mm.

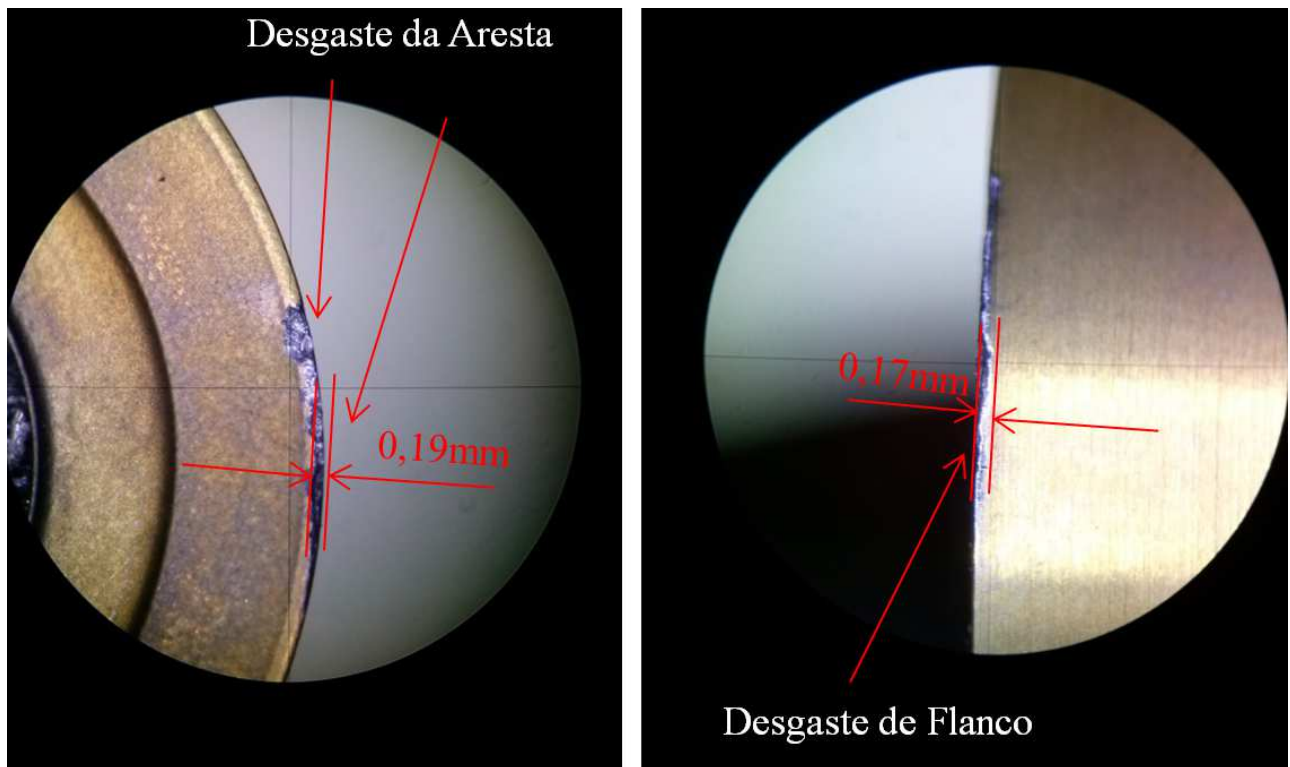
Figura 59 – Condições da 2ª aresta após 1º ciclo de usinagem de FoFo indefinido microligado.



Fonte: O Autor.

Na Figura 60 pode-se constatar que condição da superfície de saída da ferramenta da 3ª aresta após a usinagem foi bastante semelhante à da 2ª aresta foi maior, de 0,17 mm.

Figura 60 – Condições da 3ª aresta após 1º ciclo de usinagem de FoFo indefinido microligado.



Fonte: O Autor.

4.2.2.2 – Condições das ferramentas após 2º ciclo de usinagem do segmento de ferro fundido indefinido microligado

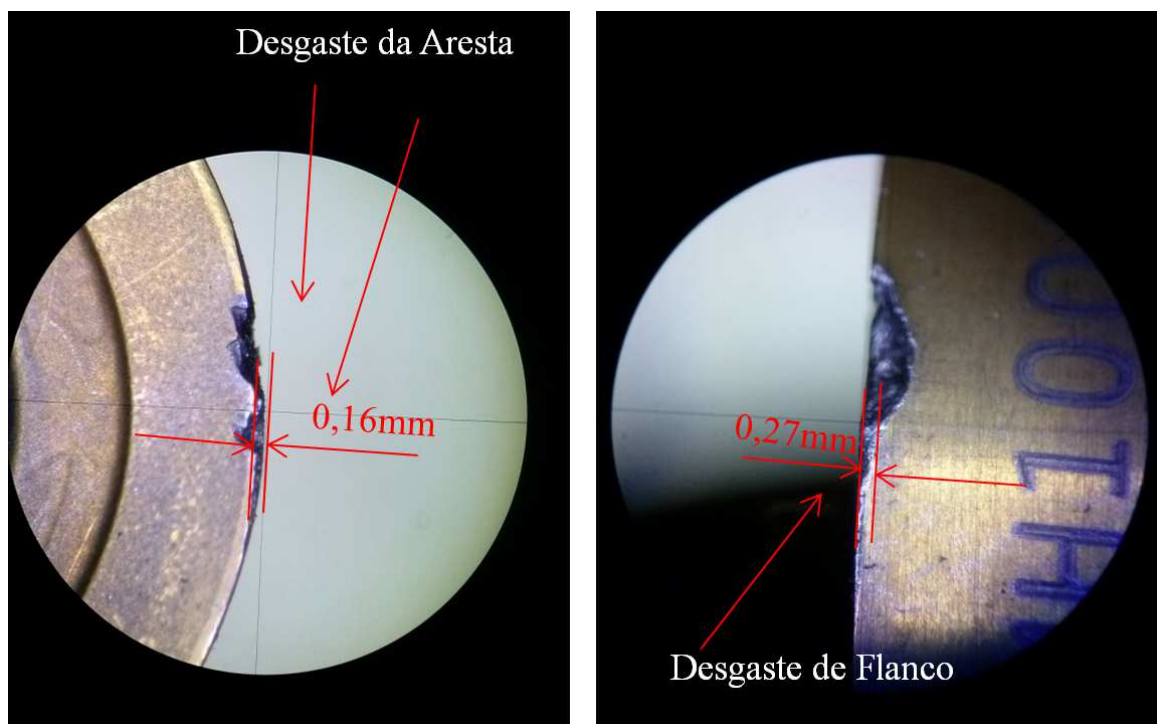
Para o 2º de ciclo de usinagem realizado no segmento de ferro fundido indefinido microligado as condições obtidas das ferramentas foram as descritas na Tabela 8. Os desgastes gerados por abrasão mecânica foram mais intensos em todas as arestas evidenciando que a vida da ferramenta já havia chegado ao fim quando o ciclo foi finalizado. O ciclo foi encerrado com um comprimento usinado de 435 mm.

Tabela 8 – Desgaste das 3 arestas utilizadas no 2º ciclo de usinagem de ferro fundido indefinido microligado.

Material	Ciclo	Aresta	Desgaste Superfície de Saída (mm)	Desgaste de Flanco (mm)	Comprimento Usinado (mm)
Ferro Fundido Indefinido Microligado	2º	1	0,16	0,27	435
		2	0,19	0,25	
		3	0,22	0,19	

Na Figura 61 pode-se ver a condição da 1ª aresta após a usinagem, onde o desgaste por abrasão mecânica foi bastante severo sendo encontrada uma média de 0,16 mm. O desgaste de flanco também foi intenso, de 0,27 mm.

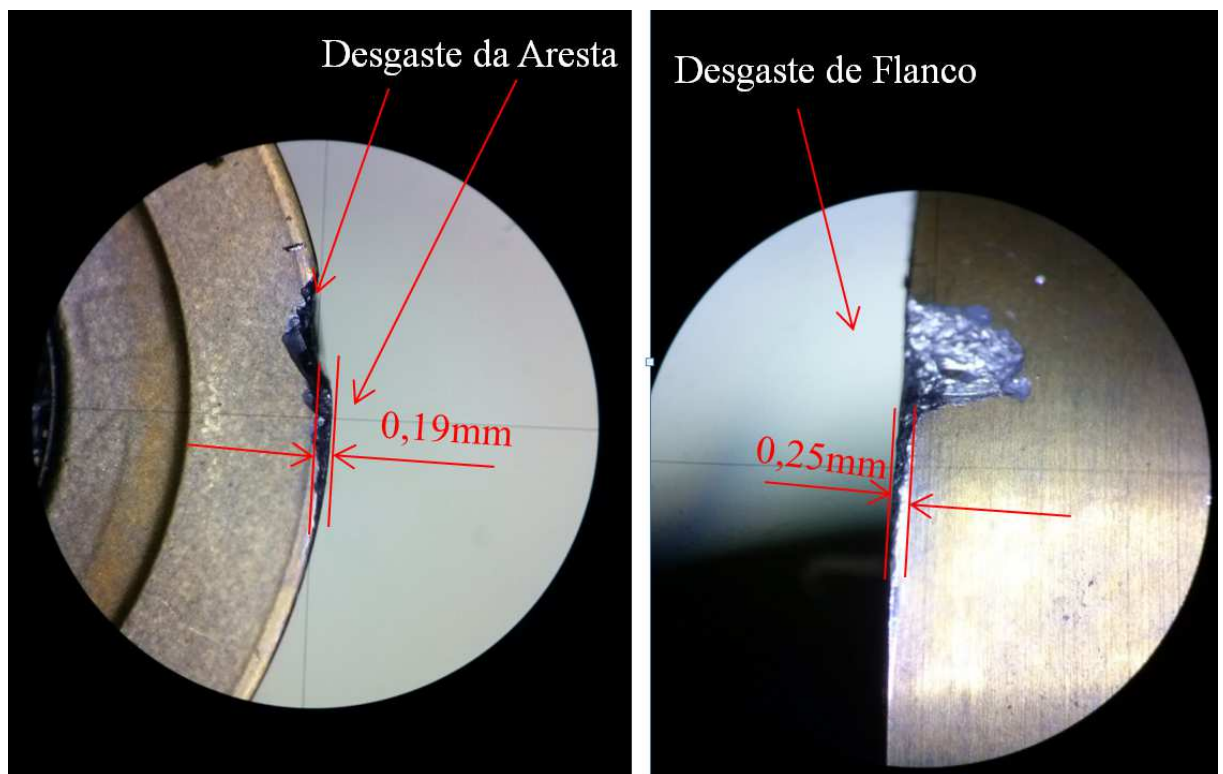
Figura 61 – Condições da 1ª aresta após 2º ciclo de usinagem de FoFo indefinido microligado.



Fonte: O Autor.

A condição da 2ª aresta após a usinagem é demonstrada na Figura 62, que apresentou quebra após um acentuado desgaste por abrasão mecânica. A média de desgaste na superfície de saída da ferramenta foi de 0,19 mm. O desgaste de flanco, também foi intenso com pontos mínimos de 0,25 mm.

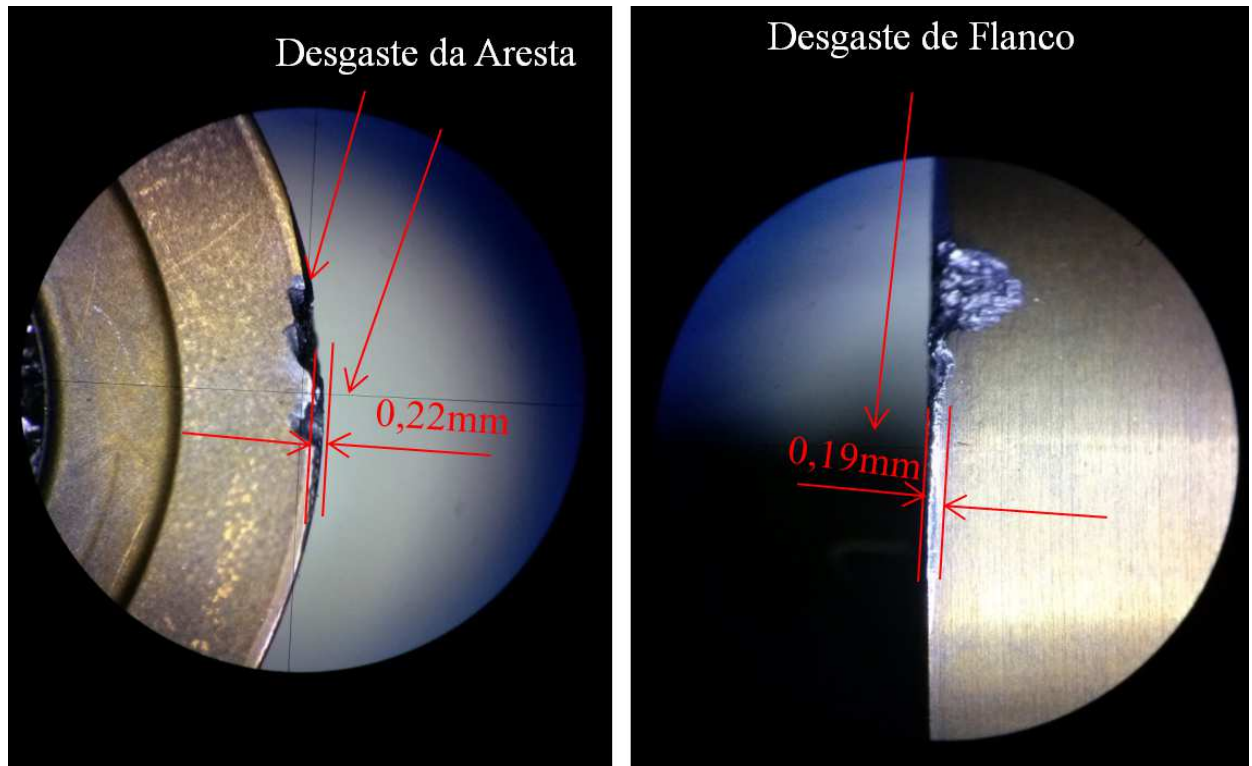
Figura 62 – Condições da 2ª aresta após 2º ciclo de usinagem de FoFo indefinido microligado.



Fonte: O Autor.

É demonstrada na Figura 63 a condição da 3ª aresta após a usinagem, onde o desgaste por abrasão também foi intenso, com a média de 0,22 mm. Foi medido um valor de mínimo de desgaste de flanco de 0,19 mm.

Figura 63 – Condições da 3ª aresta após 2º ciclo de usinagem de FoFo indefinido microligado.



Fonte: O Autor.

4.2.2.3 – Condições das Ferramentas após 3º ciclo de usinagem do segmento de ferro fundido indefinido microligado

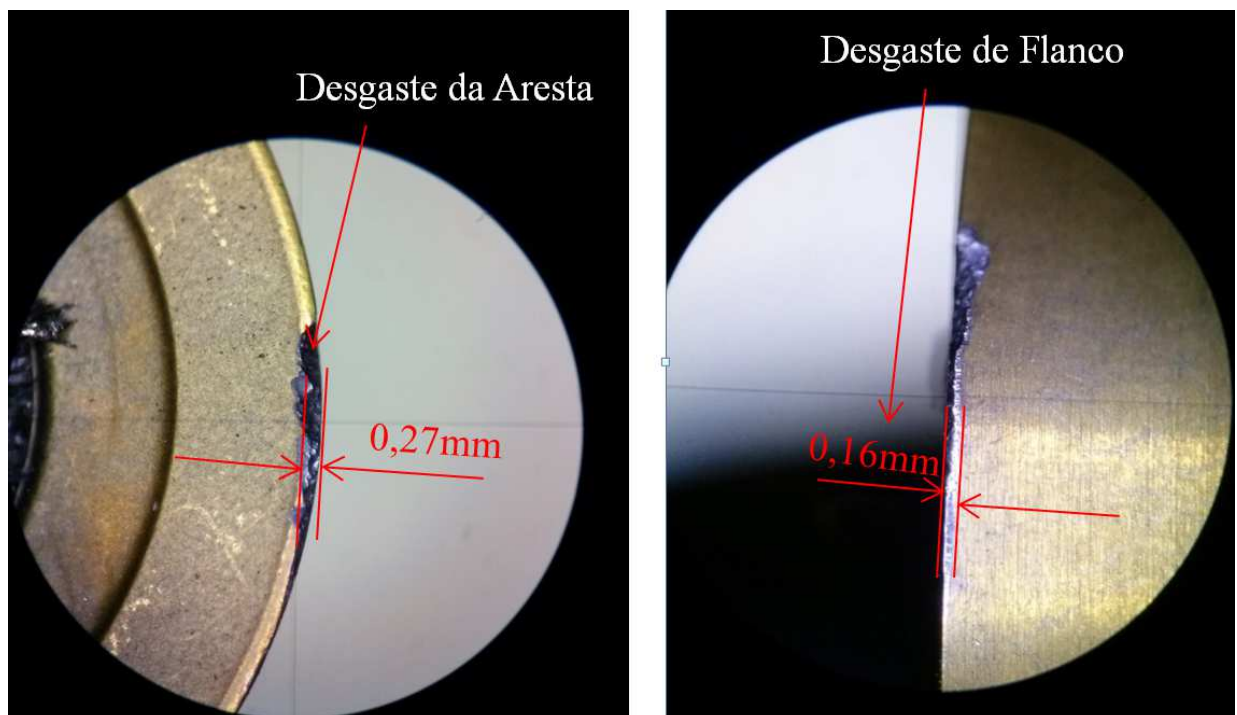
Para o 3º de ciclo de usinagem realizado no segmento de ferro fundido indefinido microligado as condições obtidas das ferramentas foram as descritas na Tabela 9. O ciclo gerou um desgaste por abrasão mecânica intenso nas três arestas com menos disparidade de valores encontrados. O ciclo foi encerrado com um comprimento usinado de 240 mm.

Tabela 9 – Desgaste das 3 arestas utilizadas no 3º ciclo de usinagem de ferro fundido indefinido microligado.

Material	Ciclo	Aresta	Desgaste Superfície de Saída (mm)	Desgaste de Flanco (mm)	Comprimento Usinado (mm)
Ferro Fundido Indefinido Microligado	3º	1	0,27	0,16	240
		2	0,28	0,29	
		3	0,29	0,22	

Na Figura 64 pode-se ver a condição da 1ª aresta após a usinagem, onde o desgaste por abrasão na superfície de saída da ferramenta apresentou uma média de 0,27 mm. O desgaste flanco medido no menor ponto foi de 0,16 mm.

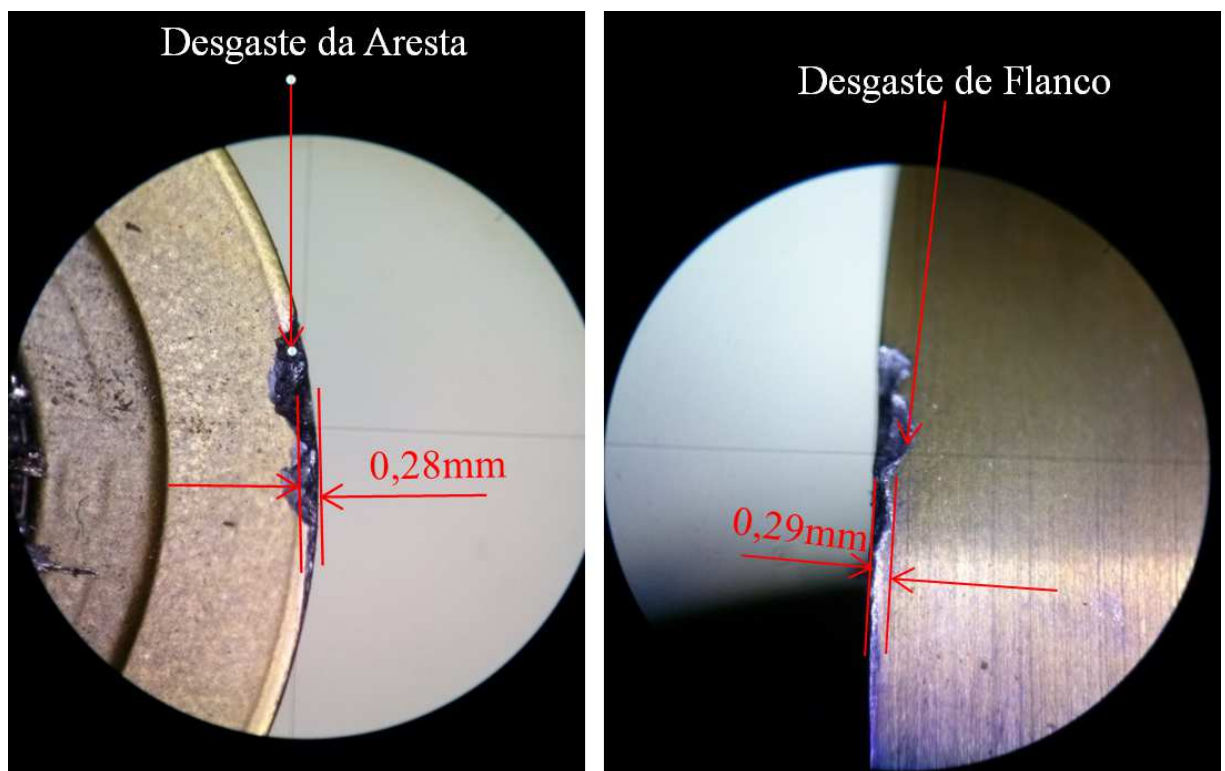
Figura 64 – Condições da 1ª aresta após 3º ciclo de usinagem de FoFo indefinido microligado.



Fonte: O Autor.

A condição da 2ª aresta é demonstrada na Figura 65 após a usinagem, onde o desgaste por abrasão na superfície de saída da ferramenta foi de 0,28 mm enquanto que um intenso desgaste de flanco foi medido com pontos mínimos de 0,29 mm.

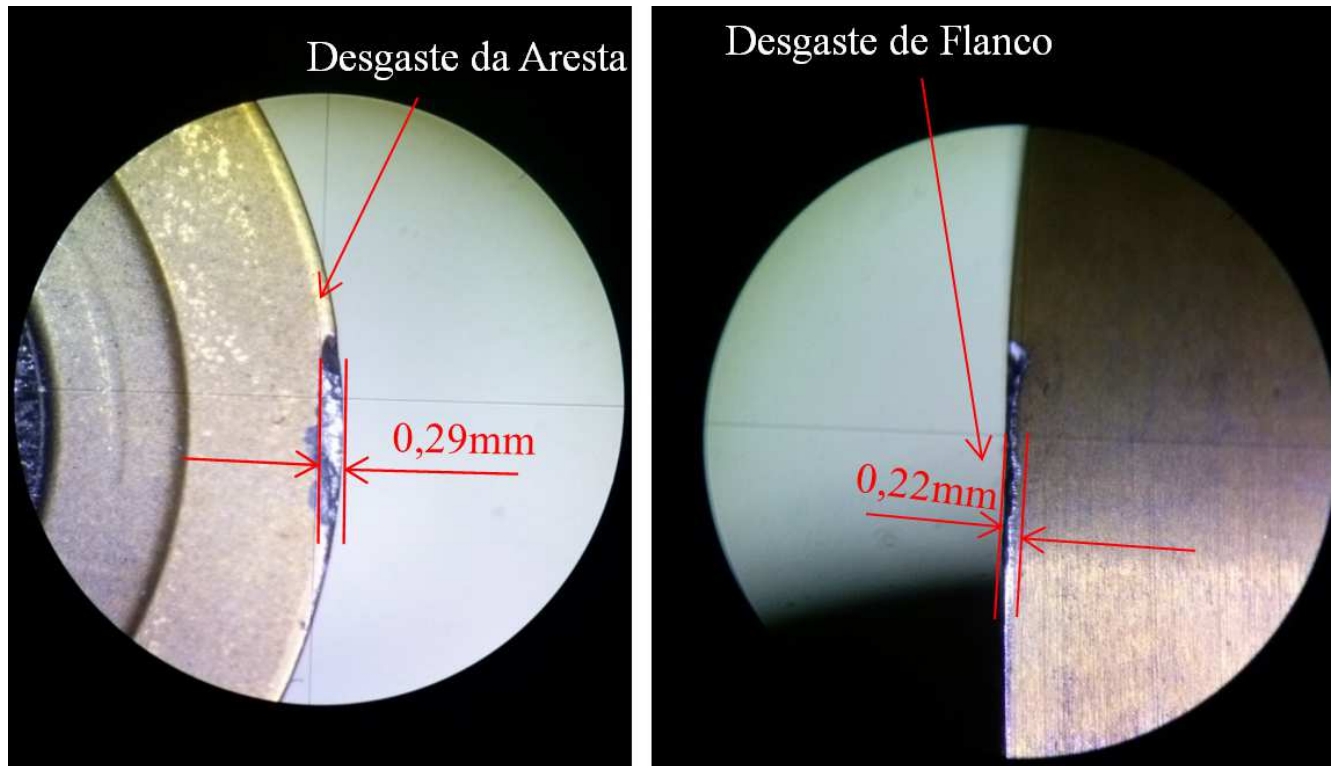
Figura 65 – Condições da 2ª aresta após 3º ciclo de usinagem de FoFo indefinido microligado.



Fonte: O Autor.

Na Figura 66 pode-se ver a condição da 3ª aresta após a usinagem, o desgaste por cratera aparece também, além do desgaste por abrasão mecânica, obtendo-se uma medição de 0,29 mm. O desgaste de flanco foi o menor entre as três arestas, de 0,22 mm.

Figura 66 – Condições da 3ª aresta após 3º ciclo de usinagem de FoFo indefinido microligado.



Fonte: O Autor.

4.2.3 Resultados de rugosidade

A usinagem com os parâmetros anteriormente descritos resultou em uma rugosidade superficial (em Ra) média (de medição em três pontos) de $0,736 \mu\text{m}$ e rugosidade máxima (R_{máx}) média (de medição em três pontos) de $4,697 \mu\text{m}$ para o segmento de ferro fundido indefinido e uma rugosidade superficial média (em Ra) de $1,13 \mu\text{m}$ e rugosidade máxima (R_{máx}) média (de medição em três pontos) de $9,748 \mu\text{m}$ para o segmento de ferro fundido indefinido microligado. Cada ponto medido pode ser visto na Figura 67.

Figura 67 – Medições de rugosidade após usinagem dos materiais.

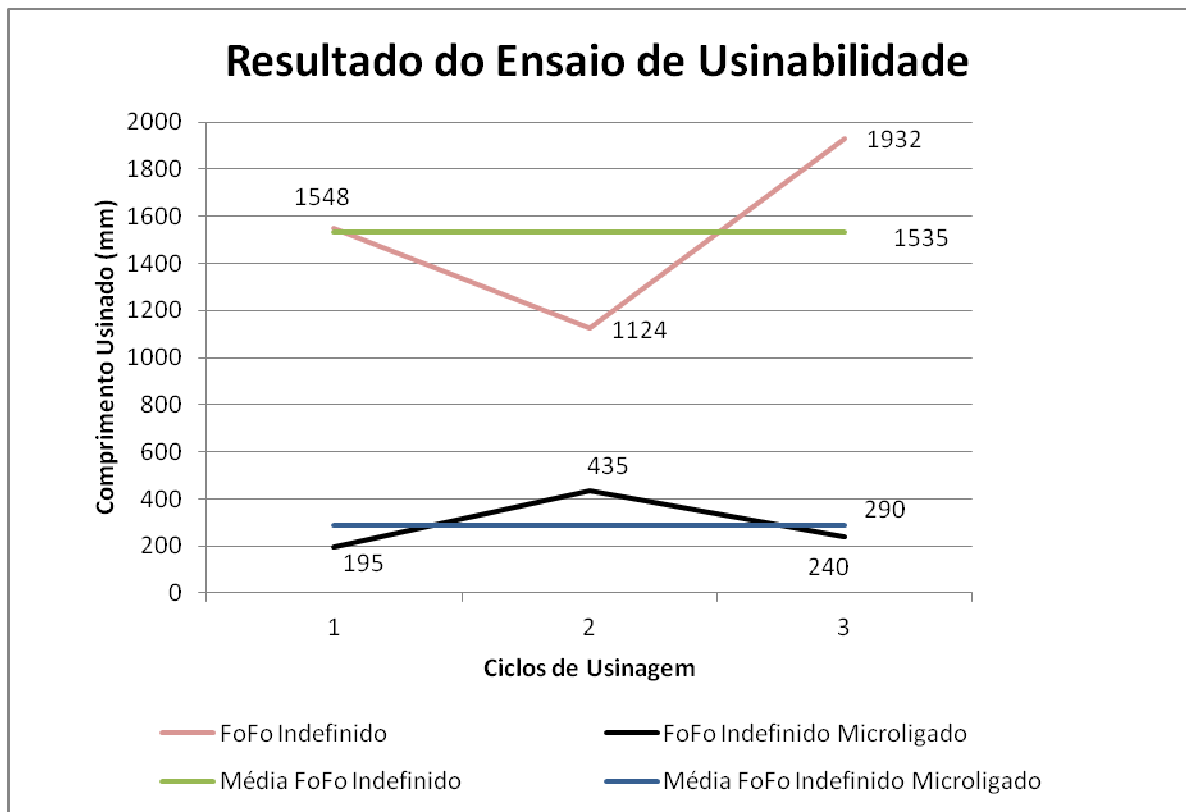
Material	Ra (μm)	Rmáx (μm)
Ferro Fundido Indefinido	0,839	4,956
	0,610	3,882
	0,759	5,255
Ferro Fundido Indefinido Microligado	1,124	9,503
	1,128	10,11
	1,149	9,632

Fonte: O Autor.

4.2.4 Consolidação dos resultados

Na Figura 68 é mostrada a vida da ferramenta, através do comprimento usinado, nos três ciclos de usinagens em cada um dos materiais ensaiado. O comprimento usinado médio da ferramenta para a usinagem do ferro fundido indefinido é 1535 mm enquanto que o comprimento usinado médio usinado do ferro fundido indefinido microligado é de 290 mm, ou seja, a vida da ferramenta para o ferro fundido indefinido se apresentou 5,3 vezes maior.

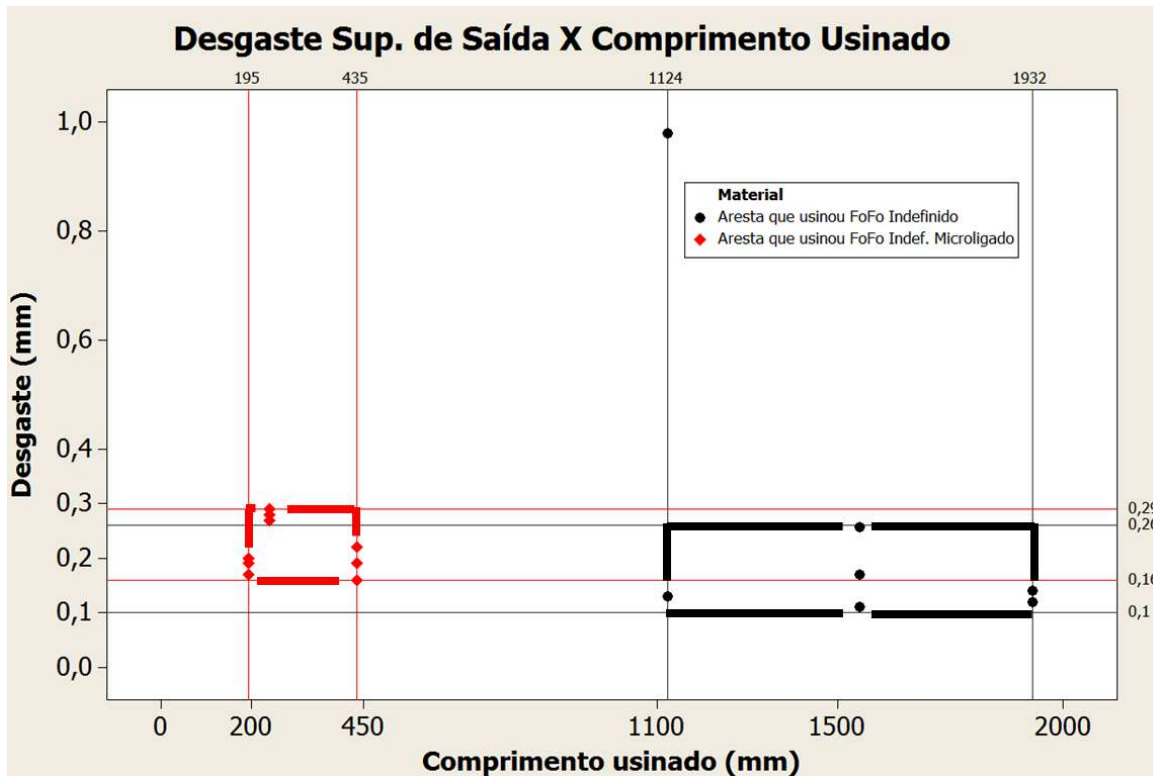
Figura 68 – Vida das ferramentas utilizadas no ensaio de usinabilidade.



Fonte: O Autor.

A Figura 69 correlaciona os valores de desgaste da superfície de saída das arestas com o comprimento usinado. Pode-se notar que a região gerada entre os limites mínimos e máximos de desgaste e de comprimento usinado são distintos e separados. Para os resultados obtidos na usinagem de ferro fundido indefinido é notada a formação de uma forma retangular, ou seja, a diferença de comprimento usinado foi de 808 mm entre eles (variação de 1124 mm a 1932 mm), porém o ciclo que usinou 1932 mm apresentou arestas muito avariadas, o que demonstra que apesar do desgaste medido na superfície de saída, as avarias geradas foram grandes. Para o ensaio com o ferro fundido indefinido microligado os valores de desgaste estão mais concentrados e com comportamentos mais semelhantes, o que gerou no gráfico uma geometria mais compacta, pois o comprimento usinado variou de 195 mm a 435 mm somente, o que gera uma diferença máxima de 240 mm.

Figura 69 – Relação entre desgaste na superfície de saída e comprimento usinado gerada no ensaio de usinabilidade dos materiais.

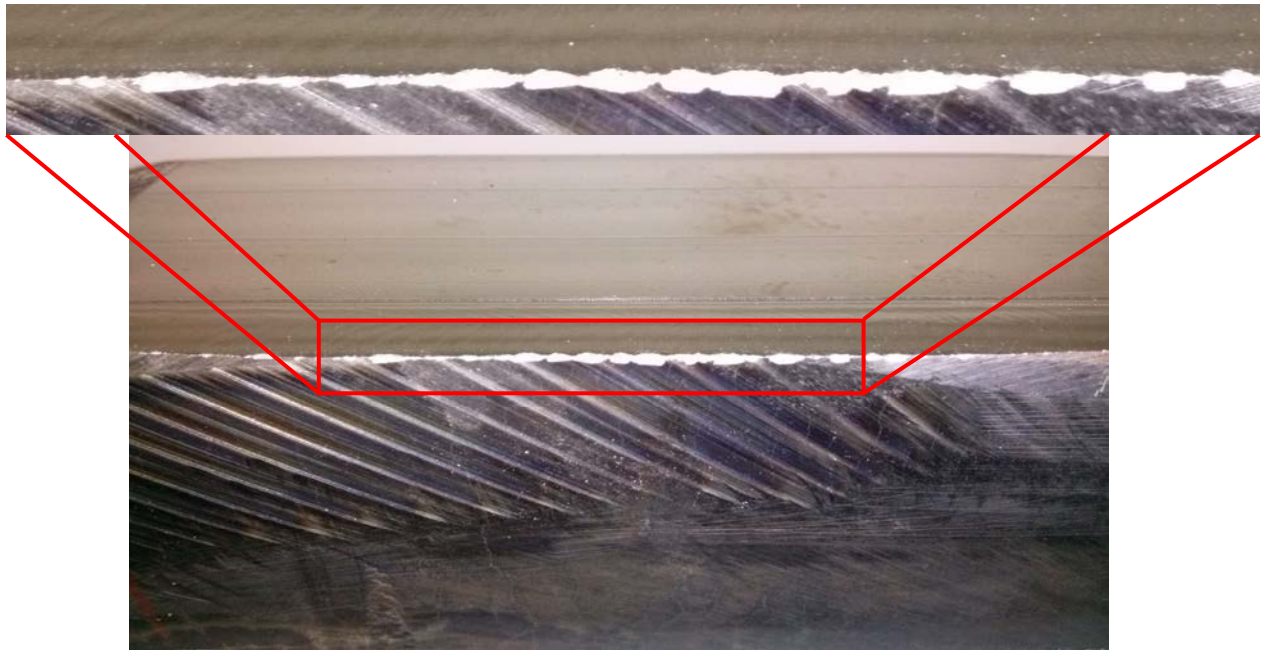


Fonte: O Autor.

O principal mecanismo de desgaste das arestas de corte resultante do ensaio foi o desgaste abrasivo, esse tipo de desgaste em as arestas usinando sob alta pressão culminou em perda de forma e quebra repentina do inserto.

Pode-se atribuir o lascamento gerado nas arestas dos insertos o seguinte fenômeno: no último passo do fresamento a aresta da superfície usinada se desprendia do material, ou seja, havia o arrancamento de material não por usinagem e sim por ruptura, tal situação interferia a região de corte. A superfície usinada com as arestas lascadas é demonstrada na Figura 70.

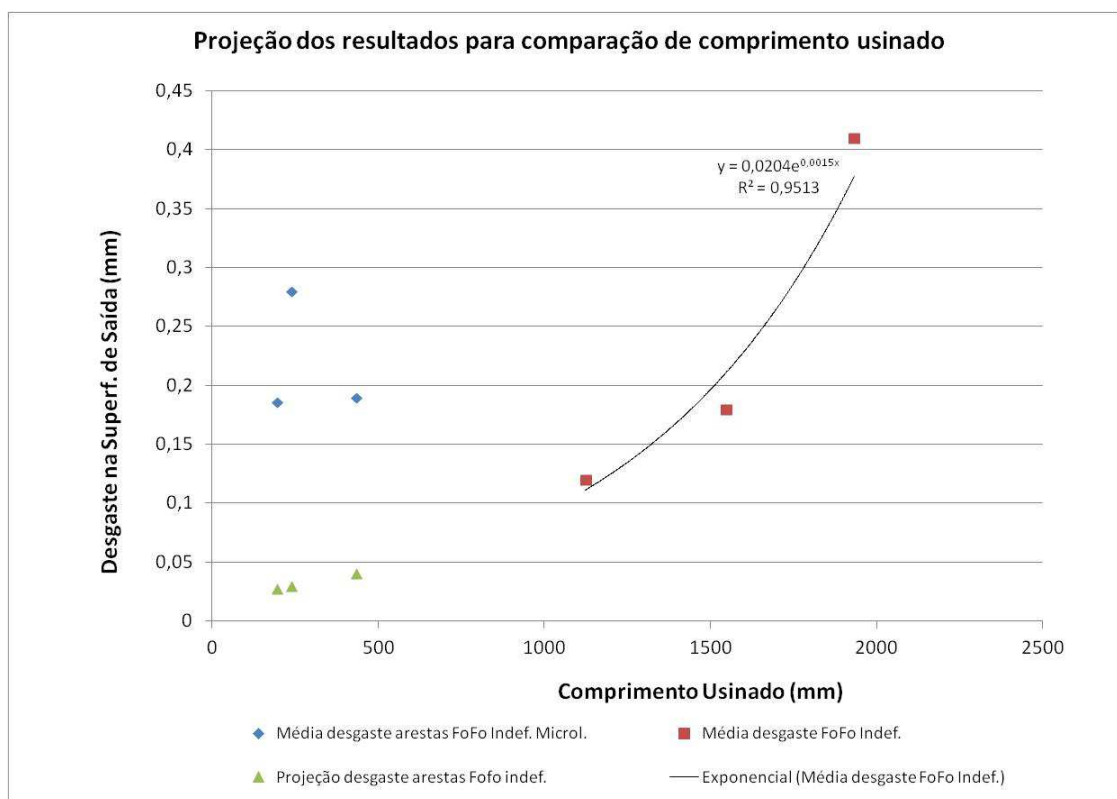
Figura 70 – Superfície usinada do material com lascamentos nas arestas.



Fonte: O Autor.

Com os resultados obtidos foi estabelecido que o ensaio de usinabilidade de ferro fundido indefinido será tomado como o padrão, para que até em futuros estudos com outros materiais desenvolvidos se utilize esse material como referencial inicial. Por isso se plotou a curva da vida de ferramenta na usinagem desse material, como demonstrado na Figura 71 que será utilizada para se extrapolar a avaliação de outros materiais que passarão pelo ensaio apresentado nesse trabalho através da aplicação da regressão expressa na curva da vida da ferramenta.

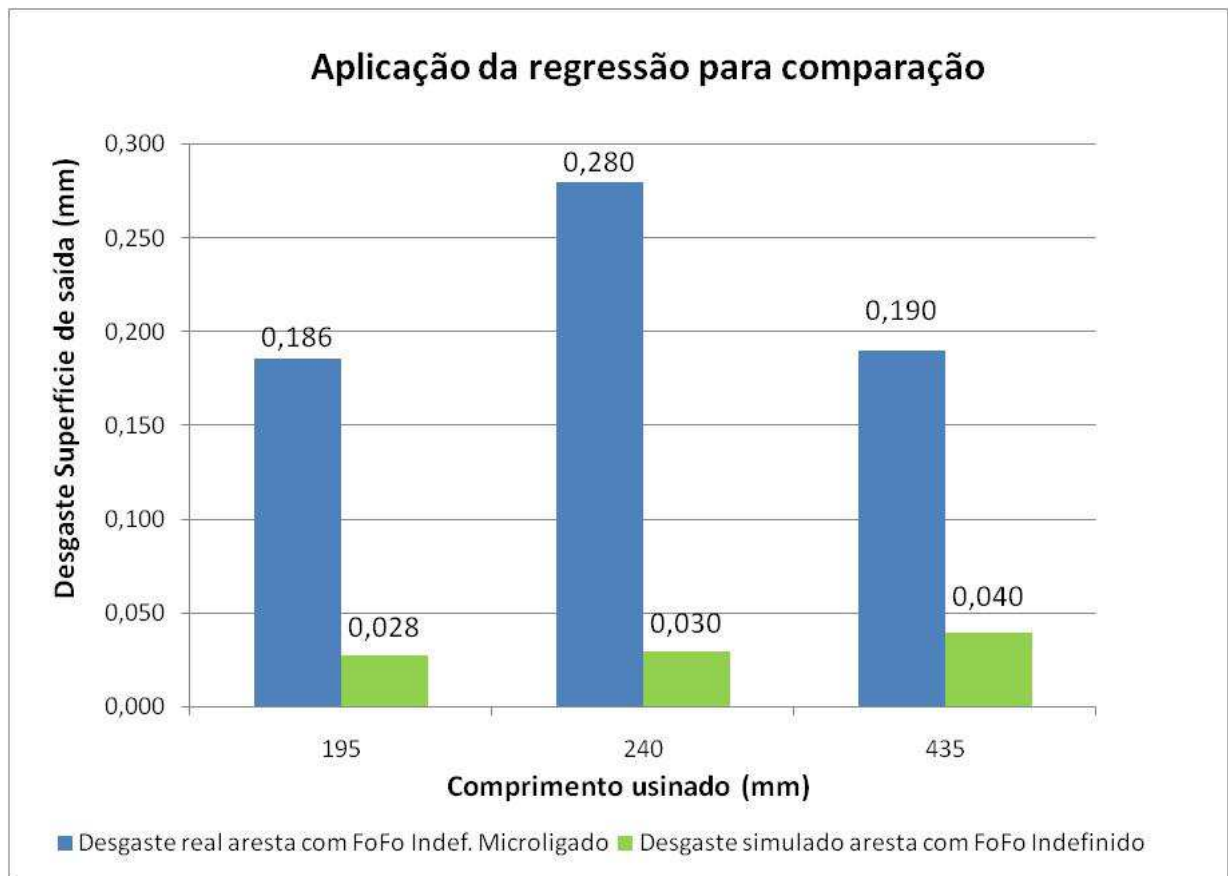
Figura 71 – Vida da ferramenta para usinagem de FoFo indefinido.



Fonte: O Autor.

Na Figura 72 é comparada a vida da ferramenta após a aplicação da regressão para se simular o desgaste que se obteria na usinagem do ferro fundido indefinido com o mesmo comprimento de fim de vida do inserto que se obteve na usinagem do ferro fundido indefinido microligado.

Figura 72 – Comparação de vida após aplicação de regressão.



Fonte: O Autor.

5 – CONCLUSÕES

A caracterização da usinabilidade pode ser obtida através de um ensaio de usinabilidade que variou somente o material usinado e que manteve os mesmos parâmetros.

O ensaio de usinabilidade realizado em laboratório em um centro de usinagem por fresamento apesar de não corresponder à mesma condição de processo do chão de fábrica, o torneamento longitudinal em máquinas convencionais (sem Comando Numérico Computadorizado), demonstrou ser um método capaz de avaliar a usinabilidade dos materiais estudados com custos menores e representatividade significativa.

O principal mecanismo de desgaste das arestas de corte no presente trabalho foi o desgaste abrasivo, pois os carbonetos de alta dureza, quando atitam com a superfície de aresta sob alta pressão causam danos que modificaram a geometrias das mesmas levando até a quebra.

O ferro fundido indefinido microligado se mostrou com pior usinabilidade que o ferro fundido indefinido, pois os ensaios resultaram em uma diminuição da vida da ferramenta na ordem de cinco vezes.

A adição de elementos formadores de carbonetos do tipo MC, como o V, Nb, o W e o Ti, piorou a usinabilidade do material, pois esse tipo de carboneto apresenta a maior dureza de todos. A fração de carbonetos do Ferro Fundido Indefinido Microligado com 4,3% nos primeiros 5 mm de camada abaixo da superfície interferiram diretamente no processo de usinagem.

REFERÊNCIAS

AMORIM, H. J. de. Estudo da relação entre a velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro. 114f. Dissertação (Mestrado em Mecânica dos sólidos) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

ARAGUNDE, H. et al. Nueva Generacion de Cilindros Centrifugados para Cajas Terminadoras de Trenes de Chapa em Caliente. 15th IAS Rolling Conference. San Nicolas: 2004.

BAPTISTA, A. L. de B. Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços.. REM: Rev. Esc. Minas vol.55 no.2. Ouro Preto: 2002.

BARROS, V. A. Cálculo de ações sobre a tensão aplicada à tira em face a distúrbios na espessura de entrada de uma cadeira de laminação. Vitória: 2006.

BELZUNCE, F. J., ZIADI. A., RODRIGUEZ, C. Structural integrity of hot strip mill rolling rolls. Engineering Failure Analysis 11. p789–797, 2004.

BRANDNER, M., NYLÉN, T., PAAR, A. Indefinite chill cast iron rolls and future possibilities. Contribuição técnica ao 50º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos. Ouro Preto: 2013.

CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 5ª Ed. Editora LTC, São Paulo: 2002.

CHIAVERINI, V. Tecnologia Mecânica - Processos de Fabricação e Tratamento – Vol.II – 2ª Ed. Editora McGraw-Hill Ltda. São Paulo: 1978.

CHOI, J. W, DONGGYU, K. Mechanisms Hot of Surface Strip Rolling. The Iron and Steel Institute of Japan International, Vol. 39, No. 8, pp. 823-828, Japão: 1999.

CIMM. Centro de Informação Metal Mecânica , 2014. Ensino - Material Didático – Conformação – Trabalho a Quente. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6472-trabalho-a-quente>. Acesso em: 14 mai. 2014.

CONSALTER, L. A. ; GUEDES, L. C. ; PUREY, J. A. Usinabilidade de ferros fundidos. Fundição e Matérias Primas,v. 9, p. 39-45. 1987

CORNÉLIO, G. T., et al – Correlação entre a resistência ao desgaste abrasivo e a microestrutura de materiais fundidos empregados em cilindros laminadores. 59º Congresso Anual da ABM; São Paulo: 2004.

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

DINIZ, A. E., MARCONDES, C. M., COPPINI, N. L. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. 4ª Ed. Editora Artliber. São Paulo: 2003.

INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014. Números de Mercado - Estatísticas. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/numeros/estatisticas.asp>>. Acesso em: 16 abr. 2014.

FERRARESI, D. Fundamentos da usinagem dos metais. Editora Edgard Blucher. São Paulo: 1977.

GUESSER, W. L. Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos – 1ª Ed. Editora Edgard Blucher. São Paulo: 2009.

KIMINAMI, C. S., et al. Introdução aos Processos de Fabricação de Produtos Metálicos 1ª Ed. Editora Edgard Blucher. São Paulo: 2013.

MAALEKIAN M., The Effects of Alloying Elements on Steels (I). Technische Universität Graz, Graz: 2007.

MALÉRE, E. P., Análise Comparativa de ferramentas cerâmicas na usinagem de ferros fundidos e aços endurecidos. 153f. Dissertação (Mestrado em Projetos e Materiais) – Faculdade Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá: 2006.

MARINOV, V. Experimental study on the abrasive wear in metal cutting, Wear 197, 242–247, 1996.

MARTINY, F.; SINNAEVE, M. - Improved roughing work rolls for the hot rolling of low carbon and stainless steel. In: 43rd MECHANICAL WORKING AND STEEL PROCESSING. Conference proceedings P.683-692.Charlotte: 2001.

MATSUMOTO, M. M., et al. Cilindros de trabalho para desbaste de tiras a quente. Contribuição técnica ao 50º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos. Ouro Preto: 2013.

MICHELS, E. P. et al. Determinação da Curva de Vida de Ferramentas em Usinagem. Semana Internacional das Engenharias da FAHOR. Horizontina: 2011.

MITSUBISHI MATERIALS, 2014. Informações Técnicas- Materiais das Ferramentas de Corte. Disponível em: <http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/cutting_tool.html>. Acesso em: 02 out. 2014.

OLIVEIRA, M. S., et al, Aplicação e desenvolvimento de cilindros de ferro fundido indefinido microligado. Contribuição técnica ao 50º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos. Ouro Preto: 2013.

PEREIRA, A. A., BOEHS, L., GUESSER, W.L. The influence of sulfur on the machinability of gray cast iron FC25. *Journal of Materials Processing Technology* 179 (2006) 165–171. Florianópolis: 2006.

RIZZO, E. M. da S., *Processos de laminação a quente de produtos planos de aço*. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. São Paulo: 2011.

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

SANDVIK. Sandvik Coromant. *Manual Técnico de Usinagem*. Suécia:2005.

SECO. Seco Tools. *Manual Técnico de Usinagem*. Suécia: 2012.

SERANTONI, C. R.; SINATORA A. *Mecanismos de Solicitação e Degradação de Cilindros*. Gerdau. Pindamonhangaba: 2010

SERANTONI, C. R.; MATSUMOTO M. M. *Ensaio de Micrografia e Ataque Ácido*. Gerdau. Pindamonhangaba: 2010

SANTOS, A.B S. de, e CASTELLO BRANCO, C. H. *Metalurgia dos ferros fundidos e nodulares*. IPT. São Paulo: 1991.

SILVA, C. R. S., Fadiga térmica de ferros fundidos brancos multicomponentes. 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo: 2003.

SOUZA, J. V. C. Desenvolvimento de pastilhas cerâmicas à base de Si₃N₄ para aplicações tribológicas. 2005. 134f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá: 2005.

TRENT, E. M., WRIGHT, P. K., "Metal Cutting", Butterworth/Heinemann, 446 pages, Oxford: 2000.

ZYBILL, C. et al. New High-Performance Roll Materials for Hot Rolling of Steel. AISTech 2014 Proceedings. Indianapolis: 2014.