

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

DIEGO BORLOT SOARES

**ADAPTAÇÃO DE UMA FURADEIRA DE COLUNA
PARA EXECUTAR ENSAIOS DE PRESSÃO
CONSTANTE**

VITÓRIA
2015

DIEGO BORLOT SOARES

**ADAPTAÇÃO DE UMA FURADEIRA DE COLUNA
PARA EXECUTAR ENSAIOS DE PRESSÃO
CONSTANTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção de grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Profa. Dra. Patrícia Alves Barbosa.

VITÓRIA
2015

DIEGO BORLOT SOARES

**ADAPTAÇÃO DE UMA FURADEIRA DE COLUNA
PARA EXECUTAR ENSAIOS DE PRESSÃO
CONSTANTE**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro Mecânico**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientadora: Profa. Dra. Patrícia Alves Barbosa

VITÓRIA
2015

AGRADECIMENTOS

À Deus por todas as bênçãos alcançadas.

Aos meus pais que me deram apoio e sempre torceram por mim.

À minha esposa pela compreensão e apoio a todo o tempo dedicado na graduação e neste projeto.

À minha avó Nascirema e minha tia Ângela por preparar tantos almoços e por ajudar de várias formas.

À minhas primas Carolina e Flora, minhas tias Angélica e Lourdes por cuidarem do meu filho tantas vezes quantas foram preciso.

Aos técnicos do LabTecMec Luiz e Roger por me ajudarem na confecção do dispositivo.

Ao professor Valter, chefe do LabTecMec, por ter cedido o espaço e ter apoiado todo o projeto.

Ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade de Uberlândia pela doação dos materiais e ferramentas.

E principalmente a professora Patrícia por toda a paciência e dedicação ao me orientar nesse projeto.

RESUMO

A grande variedade de materiais existentes e a quantidade de novos materiais que surgem no mercado fazem com que se torne desejável uma ferramenta que possa comparar a usinabilidade de forma mais barata e rápida. Algumas vezes uma simples adaptação de uma máquina-ferramenta já existente pode ser o suficiente para que se consiga meios de realizar testes de usinabilidade. Sendo assim, o objetivo desse estudo é construir e validar um dispositivo que se adapte a uma furadeira de coluna e que torne possível a realização de ensaios de usinabilidade de curta duração pelo método da pressão constante. Para tanto, após a adaptação da máquina-ferramenta, foram executados ensaios para comparar a usinabilidade de duas classes de ferro fundido, um nodular (FE 45012) e um vermicular (FV 350), variando-se a força de avanço (peso), mantendo a rotação e tempo de usinagem constantes. Os resultados mostraram que o dispositivo atendeu à finalidade para o qual foi projetado, e que o ferro fundido nodular apresentou melhor usinabilidade que o vermicular.

Palavras-chave: furação; usinabilidade; ensaio de pressão constante; ferro fundido nodular; ferro fundido vermicular.

ABSTRACT

The wide variety of existing materials and the amount of new materials appearing on the market make tools that can compare the machinability in a cheaper and faster way desirable. Sometimes a simple adaptation of an existing machine tool can be sufficient to complete machinability tests. The aim of this study is to construct and validate a device that suits a column drill and to make short machinability tests by the method of constant pressure possible. Therefore, after the adjustment of a machine tool, tests were performed to compare the machinability of two classes of cast iron, a ductile iron (FE 45012) and a compacted graphite iron (FV 350), varying the feed force (weight) while maintaining the rotation and machining time constants. The results showed that the device reached the goal for which it was designed and the ductile iron showed better machinability than the compacted graphite iron.

Keywords: drilling process; machinability; constant pressure test; ductile iron; compacted graphite iron.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1– Principais operações de usinagem (TÖNSHOFF <i>et al.</i> , 1994).....	3
Figura 2.2 – Operações de furação: (a) furação em cheio; (b) escareamento; (c) furação escalonada; (d) furação de centros e (d) trepanação (adaptado de SCHROETER; STOETERAU; WEINGAERTNER, 2004).....	5
Figura 2.3 – Furadeiras: (a) de coluna; (b) de bancada; (c) radial; (d) portátil; (e) e (f) em série; e (g) CNC (adaptado de DA SILVA, 2010; SCHROETER; STOETERAU; WEINGAERTNER, 2004; GERLING, 1967).....	7
Figura 2.4 – Partes principais da furadeira de coluna: (a) Base, (b) Coluna, (c) Mecanismo de acionamento do movimento principal, (d) Árvore, (e) Alavanca em cruz, (f) Mesa ajustável (GERLING, 1967).....	8
Figura 2.5 – Extremidade inferior da árvore, encaixe e retirada do mandril. (a) topo da árvore; (b) orifício transversal e (c) haste da broca ou mandril (GERLING, 1967).....	9
Figura 2.6 – Acionamento dos movimentos principal e de avanço. (a) engrenagens do movimento principal de rotação; (b) alavanca de engate; (c) derivação para o movimento de avanço; (d) sistemas para variação do avanço e (e) parafuso sem fim – coroa (GERLING, 1967).....	9
Figura 2.7 – Tipos de Brocas: (a) broca helicoidal, (b) broca de centro, (c) Broca intercambiável, (d) brocas canhão (BARBOSA, 2009).....	10
Figura 2.8 – Tipos de brocas helicoidais N, H e W, evidenciando os ângulos de ponta (σ) e de hélice (δ)(STEMMER, 1995).....	11
Figura 2.9 – Partes de uma broca helicoidal (ABNT NBR 6176, 1977).....	12
Figura 2.10 – Grandezas físicas da operação de furação (STOUTERAU, 2008).....	15
Figura 2.11 – Classificação dos ensaios de usinabilidade.....	16
Figura 2.12 – Esquema de adaptação de furadeira de coluna para ensaios de pressão constante. (a) mandril; (b) polia montada no eixo de avanço da furadeira e (c) pesos suspensos pelo cabo de aço.....	17

Figura 2.13 – Microestrutura do Ferro Fundido Nodular típica do centro(esquerda) e da periferia (direita). (TUPY S.A).....	20
Figura 2.14 – (a) Aspecto da grafita compactada em metalografia óptica, (b) Aspecto da grafita compactada após ataque profundo (MEV) (GUESSER, 2002).....	22
Figura 2.15 – Usinabilidade dos diversos tipos de ferros fundidos. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).....	25
Figura 3.1 – Fluxograma das etapas do projeto do dispositivo de adaptação da furadeira de coluna.....	26
Figura 3.2 – Desenho técnico do projeto do eixo do dispositivo.....	27
Figura 3.3 – Vista 3D do projeto do eixo do dispositivo.....	27
Figura 3.4 – material base para o eixo.....	28
Figura 3.5 – Máquinas-ferramenta: (a) Serra Fita; (b) Torno Revolution RV220; (c) Torno Universal IMOR; (d) Furadeira de coluna; (e) Fresadora Vertical WMW; (f) Torno Universal Mascote MS 205.....	29
Figura 3.6 – Jogo de machos OSG W1/2 (12,7mm) utilizado para abertura das roscas internas para fixação das hastes da alavanca do dispositivo.....	30
Figura 3.7 - Etapas da fabricação do eixo – (a) serramento, (b) furo de centro; (c) usinagem do furo para fixação do eixo por meio de pino elástico; (d) torneamento cônico à 45°; (e) cilindramento do rebaixo para acoplamento da polia; (f) usinagem do furo de 25,4 mm (1").....	30
Figura 3.8 – Suporte e blocos usados como carga.....	33
Figura 3.9– Hastes encaixadas no eixo do dispositivo.....	34
Figura 3.10 – Alavanca em cruz acoplada à furadeira de coluna.....	35
Figura 3.11 - Polia e eixo antes da montagem do dispositivo.....	35
Figura 3.12 – (a) furo do dispositivo e (b) eixo de avanço da furadeira.....	36
Figura 3.13 – Pesos montados no suporte e cabo de aço fixado com o auxílio de um grampo.....	36
Figura 3.14 – Mola de retorno elástico.....	37
Figura 3.15 – Dispositivo para execução de ensaios de usinabilidade de pressão constante montado no eixo de avanço da furadeira de coluna.....	37
Figura 3.16 - Geometria dos corpos de prova. (a) FE45012 e (b) FV 350.....	38

Figura 3.17 - Formato do corpo de prova de FE45012 após serramento, permitindo fixação na morsa.....	39
Figura 3.18 – Configuração e dimensões do corpo de prova de ferro fundido vermicular FV 350 medidas em mm.....	39
Figura 3.19 – Micrografia do FV 350. Ataque nital 3 % (NAVES, 2009).....	41
Figura 3.20 – Micrografias do ferro fundido nodular FE 45012. Ataque nital 3%. (a) núcleo, (b) região intermediária e (c) periferia(DE SOUSA, 2014).....	41
Figura 3.21 – Broca CoroDrill® Delta C-840 (BARBOSA, 2009).....	42
Figura 4.1 – Corpos de prova após a realização dos ensaios.....	44
Figura 4.2 – Resultado do teste de usinabilidade de pressão constante para uma rotação de 1150 rpm e tempo de corte de 20 s.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação do ferro fundido nodular, segundo a ABNT P-EB-585 (CHIAVERINI, 2002).....	20
Tabela 2.2 – Comparação entre propriedades físicas e mecânicas dos ferros fundidos, vermicular, cinzento e nodular (MOCELLIN, 2002; DORÉ, 2007; NAVES, 2009).....	23
Tabela 3.1– quadro resumo das etapas de usinagem realizadas na fabricação do eixo do dispositivo.....	32
Tabela 3.2 – Composição química do ferro fundido vermicular FV 350 (% em peso) (NAVES, 2009).....	40
Tabela 3.3 – Composição química do ferro fundido nodular FE 45012 (% em peso) (TUPY, 2015).....	40
Tabela 3.4 – Dureza Ferro fundido Vermicular (NAVES, 2009).....	40
Tabela 3.5 – Dureza do ferro fundido nodular (DE SOUSA, 2014).....	40
Tabela 3.6 - Caracterização microestrutural do ferro fundido Vermicular FV350 (NAVES, 2009).....	41
Tabela 3.7 – Caracterização microestrutural do ferro fundido nodular FE45012 (DE SOUSA, 2014; TUPY, 2015; CIMM, 2015).....	42
Tabela 3.8 – Condições utilizadas nos testes e ordem que foram realizados.....	43
Tabela 4.1 – Percurso de avanço (Lf) encontrado em cada teste.....	44

SUMÁRIO

I – INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo do Trabalho	2
1.2 Estrutura do Documento	2
II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Usinagem	3
2.2 Furação	4
2.2.1 Variantes da Operação.....	4
2.2.2 Máquina-ferramenta.....	5
2.2.2.1 <i>Furadeira de Coluna</i>	7
2.2.3 Ferramenta de Corte.....	10
2.2.3.1 <i>Geometria das Brocas Helicoidais</i>	10
2.2.4 Grandezas Físicas do Processo de Corte.....	13
2.3 Ensaio de Usinabilidade	15
2.3.1 Tipos de Testes de Usinabilidade.....	15
2.3.2 Teste de Pressão Constante.....	17
2.4 Usinabilidade dos Ferros Fundidos	18
2.4.1 Ferros Fundidos.....	18
2.4.2 Ferro Fundido Nodular.....	19
2.4.3 Ferro Fundido Vermicular.....	22
2.4.4 Fatores que Afetam a Usinabilidade dos Ferros Fundidos.....	23
III – MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1 Projeto do Dispositivo de Adaptação da Furadeira de Coluna	26
3.2 Fabricação do Eixo do Dispositivo	28
3.2.1 Material da Peça de Trabalho.....	28
3.2.2 Máquinas-Ferramenta.....	28
3.2.3 Etapas de Fabricação.....	29
3.3 Fabricação dos Outros Componentes do Dispositivo	33
3.3.1 Fabricação do Suporte Para Carga e Blocos Utilizados como Carga.....	33
3.3.2 Fabricação das Hastes.....	34

3.4 Adaptação da Furadeira de Coluna.....	34
3.5 Validação da Adaptação da Furadeira.....	38
3.5.1 Material da Peça de Trabalho.....	38
3.5.2 Ferramenta.....	42
3.6 Teste de Usinabilidade.....	43
IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
V – CONCLUSÕES.....	47
VII – REFERÊNCIAS.....	48

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Na indústria metal-mecânica há uma crescente demanda pela busca de materiais que sejam mais econômicos e/ou tenham maior eficiência/peso (BARBOSA, et al. 2009). Muitos parâmetros são utilizados para se fazer a escolha desejada, e entre eles está a usinabilidade (KLOCKE et al., 2007), que pode ser definida como a grandeza que indica a facilidade ou a dificuldade de se usinar um material (FERRARESI, 1970; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006; MACHADO et al, 2009). Neste quesito os ferros fundidos são largamente utilizados por apresentarem, na grande maioria dos casos, relativa facilidade de usinagem e baixo custo de produção (FERRARESI, 1970; BARBOSA, 2009).

A usinabilidade é função do sistema ferramenta-peça, e sua medida pode ser influenciada por muitos fatores tais como velocidade de corte, profundidade de corte, avanço, geometria do corte, operação de usinagem, rigidez da máquina-ferramenta, entre outros (FERRARESI, 1970; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006). Levando em consideração a infinidade de combinações possíveis entre os diferentes tipos de material, condições de usinagem, além do ritmo acelerado do desenvolvimento tecnológico e o conseqüente surgimento de novos materiais, torna-se quase que impraticável a publicação dos resultados para todas as associações (FERRARESI, 1970; MACHADO; DA SILVA, 2004). Portanto, é muito importante ter fácil acesso a ferramentas para análise do processo de usinagem.

Para mensurar a usinabilidade de um material são realizados testes que podem ser de longa ou curta duração. Os primeiros demandam bastante tempo e são muito onerosos. E, no esforço de se encontrar uma forma de avaliar a usinabilidade dependendo menos recursos e de forma rápida, foram desenvolvidos vários métodos

visando executar os ensaios em um curto período de tempo, sendo um destes o método de pressão constante (Ff) (FERRARESI, 1970).

Nesse ínterim, no laboratório de Tecnologia Mecânica (LabTecMec) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), foi observada a necessidade de realizar ensaios de usinabilidade através do teste de pressão constante. Para tanto, foi proposto um projeto de adaptação da furadeira de coluna do laboratório, a fim de fornecer mais uma opção de teste de usinabilidade simples e rápido, visando à utilização nas aulas práticas de fundamentos de usinagem, acrescentando mais uma funcionalidade didática e de pesquisa ao local. Além disso, este método de avaliação de usinabilidade considera a operação de furação, uma das mais utilizadas na indústria, possibilitando a ampliação dos bancos de dados sobre o assunto, que na maioria dos casos considera o processo de torneamento.

1.1 Objetivo do Trabalho

O objetivo do trabalho é adaptar uma furadeira de coluna para a realização de ensaios de usinabilidade de pressão constante, através da elaboração do projeto e fabricação de um dispositivo que possibilite a obtenção de uma força de avanço constante no eixo de avanço da máquina-ferramenta. Após a adaptação, serão executados testes de usinabilidade de pressão constante em ferro fundido nodular (FE 45012) e ferro fundido vermicular (FV350), os quais serão comparados com resultados da literatura, para validação do dispositivo.

1.2 Estrutura do Documento

O texto está dividido em cinco capítulos: Introdução, Revisão Bibliográfica, Materiais e Métodos, Resultados e Discussões e Conclusões, finalizando com as Referências Bibliográficas utilizadas na elaboração do texto.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Usinagem

Usinagem é definida como processo de fabricação que consiste em transformar matéria-prima em produto acabado promovendo a remoção de excesso de material na forma de cavaco através do movimento relativo de rotação e translação entre a ferramenta de corte e a peça (FERRARESI, 1970; MACHADO et al, 2009; CIMM, 2014).

Na indústria metal-mecânica, de todas as operações de usinagem convencional que podem ser consideradas como as mais importantes, em termos de tempo de usinagem e número de operações, destacam-se: o torneamento, a furação, e o fresamento, respectivamente, como mostrado na Fig. 2.1.

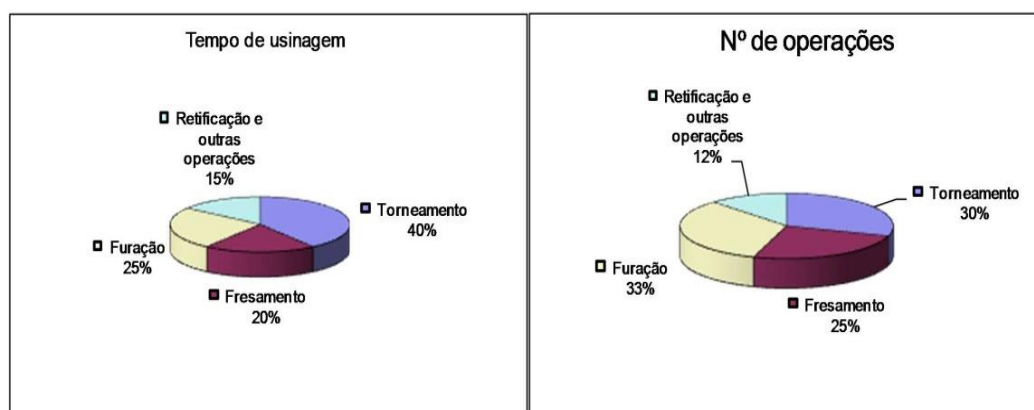


Figura 2.1– Principais operações de usinagem (TÖNSHOFF et al., 1994).

Segundo Ferraresi (1970), pode-se definir resumidamente a principais operações de usinagem da seguinte forma:

- Torneamento: Processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes;
- Fresamento: Processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas multicortantes;
- Furação: Processo de obtenção de furos, geralmente cilíndricos, utilizando ferramentas multicortantes, denominadas brocas.

A grande maioria das peças utilizadas na indústria apresenta pelo menos um furo, tornando os estudos sobre o processo de furação muito importantes. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

2.2 Furação

A furação pode ser definida como processo de usinagem, onde a retirada de cavaco se dá através do movimento relativo entre a ferramenta multicortante (broca) e a peça de trabalho. Nesse sentido, a ferramenta gira e se desloca segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo principal da máquina-ferramenta, enquanto a peça permanece fixa sobre a mesa de trabalho (FERRARESI, 1970).

2.2.1 Variantes da Operação

A furação de acordo com Ferraresi (1970) e Machado *et al.* (2009) subdivide-se nas seguintes operações:

- Furação em cheio (Fig. 2.2 (a)): processo de furação que remove todo o material compreendido no volume final do furo, na forma de cavaco;
- Escareamento (Fig. 2.2 (b)): processo de furação destinado à abertura de um furo cilíndrico em uma peça pré-furada;
- Furação escalonada (Fig. 2.2 (c)) – processo de furação destinado à obtenção de um furo com dois ou mais diâmetros diferentes, simultaneamente;

- Furação de centros (Fig. 2.2 (d)): processo de furação destinado à obtenção de furos de centro para fixação da peça em operações posteriores;
- Trepanação (Fig. 2.2 (e)): processo de furação em que é retirada apenas uma parte do material do volume final do furo na forma de cavaco, compreendido à circunferência que delimita o furo, permanecendo um núcleo maciço.

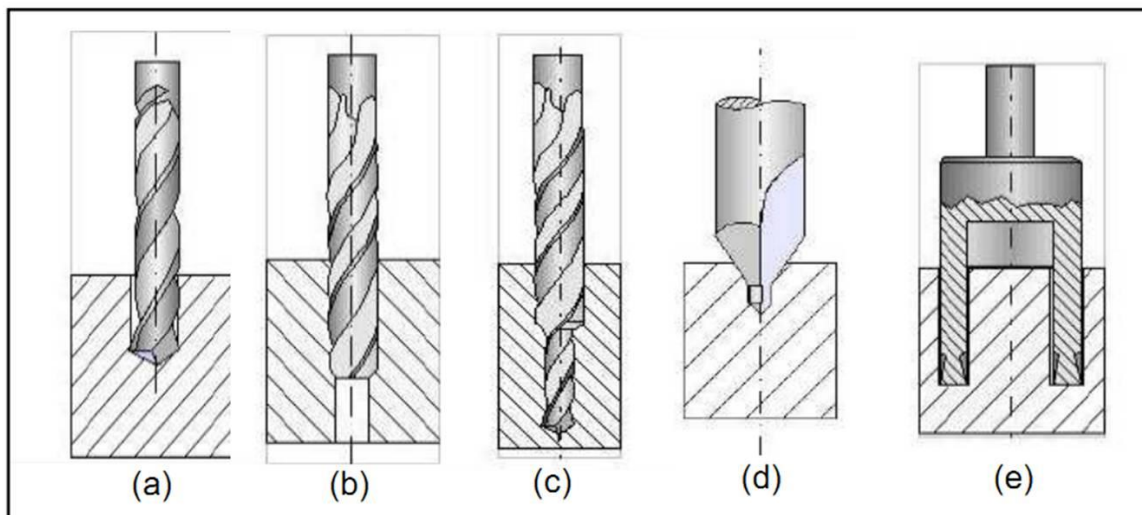


Figura 2.2 – Operações de furação: (a) furação em cheio; (b) escareamento; (c) furação escalonada; (d) furação de centros e (e) trepanação (adaptado de SCHROETER; STOETERAU; WEINGAERTNER, 2004).

2.2.2 Máquina-ferramenta

Na usinagem a operação de corte é classificada de acordo com a máquina-ferramenta utilizada, nesse contexto a furação é uma operação de usinagem executada em máquinas-ferramentas denominadas furadeiras. De acordo com Gerling (1967), Freire (1976) e da Silva (2010) existem diversas formas de classificar as furadeiras.

Em relação ao tipo de máquina são classificadas como: furadeira de coluna, de bancada, radial, horizontal, múltipla e portátil. Devido a sua versatilidade a furadeira de coluna pode ser encontrada em maior volume nas oficinas e na indústria em geral (FREIRE, 1976). As furadeiras de bancada são usadas para pequenos serviços, já as furadeiras radiais são robustas e fazem serviços que demandam maior potência. Pode-

se também classificar as furadeiras quanto ao sistema de avanço como manuais ou automáticas.

As Furadeiras em série (múltiplas) são utilizadas em linhas de produção, fazendo várias operações simultaneamente ou ainda uma sequência de operações, como furar, alargar e escarear, de forma a minimizar o tempo necessário para usinagem. Para esta categoria de máquina-ferramenta existem dois tipos principais de acionamento, a saber: furadeiras onde as diversas árvores existentes compartilham o mesmo motor, ou aquelas em que cada árvore tem seu próprio motor (GERLING, 1967; FREIRE, 1976).

Existem ainda furadeiras CNC mais sofisticadas que apresentam um sistema que recebe dados, codifica e transforma em comando para a máquina, permitindo a realização de sequências programadas sem a intervenção do operador (DA SILVA, 2010).

Os diversos tipos de furadeiras são mostrados na Fig. 2.3.

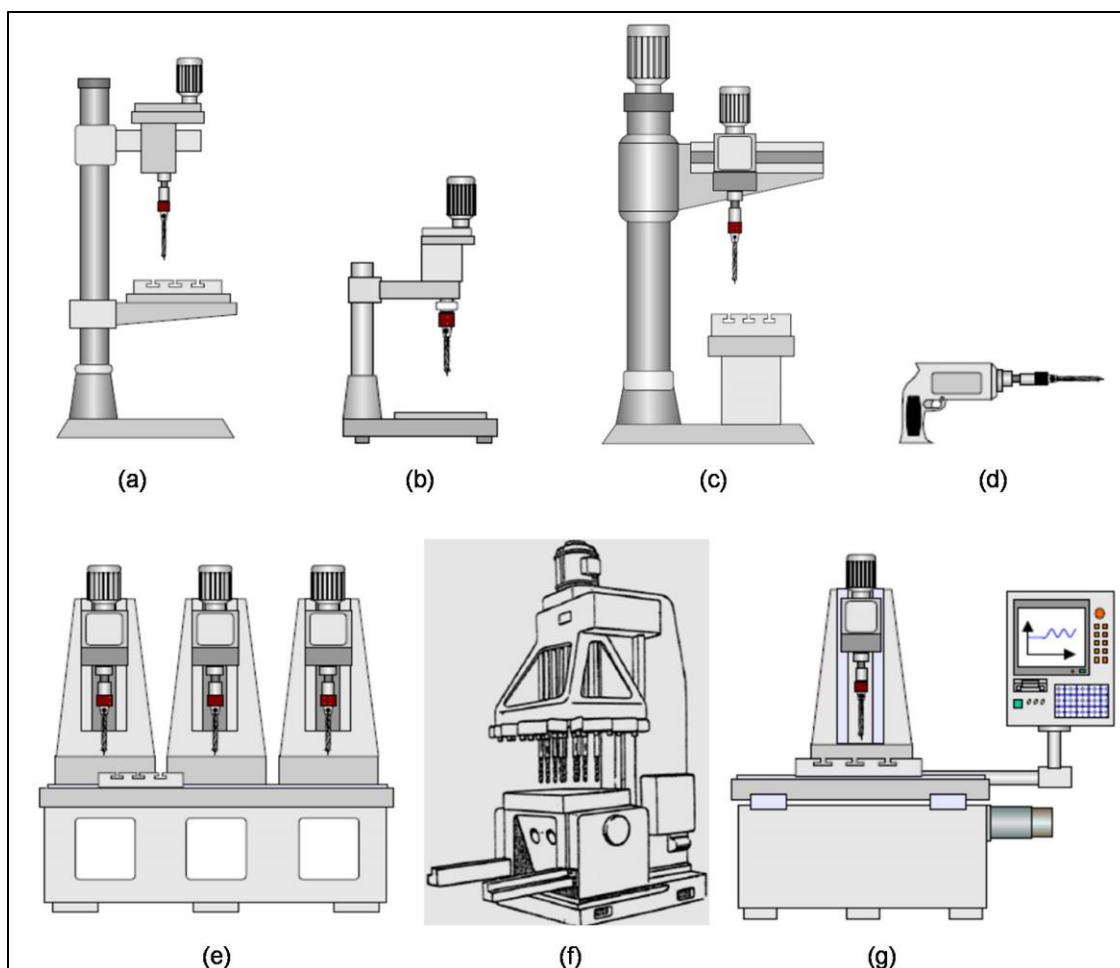


Figura 2.3 – Furadeiras: (a) de coluna; (b) de bancada; (c) radial; (d) portátil; (e) e (f) em série; e (g) CNC (adaptado de DA SILVA, 2010; SCHOETER; STOETERAU; WEINGAERTNER, 2004; GERLING, 1967).

2.2.2.1 Furadeira de Coluna

Gerling (1967) e Freire (1976) descrevem os principais componentes de uma furadeira de coluna da seguinte forma:

- Base (Fig. 2.4 (a)): parte da máquina-ferramenta onde é fixada a coluna (Fig. 2.4 (b)) que é o suporte da mesa e todos os outros componentes acima dela;
- Árvore (Fig. 2.4 (d)): possui movimento de rotação com velocidades variadas, podendo deslizar segundo seu eixo. As diferentes velocidades são determinadas

por meio de um mecanismo de acionamento do movimento principal de rotação composto por um cone de polias e um redutor (Fig. 2.4 (c)). A extremidade inferior da árvore possui um orifício cônico no qual encaixa-se a haste da broca ou do mandril e um orifício transversal que auxilia no momento da retirada dos mesmos, como mostrado em detalhe na Fig. 2.5;

- Alavanca em cruz (Fig. 2.4 (e)): responsável pelo movimento de avanço da árvore na direção vertical, que é feita manualmente pelo operador da furadeira de coluna;
- Mesa (Fig. 2.4 (f)): componente onde se prende a peça a ser furada. Ela possui ranhuras para facilitar a fixação da peça; um canal coletor para recolher o líquido utilizado para lubri-refrigeração; um mecanismo de cremalheira e pinhão acionados por uma manivela responsável pelo movimento vertical da mesa; alavancas utilizadas para fixar a mesa na posição, tanto no sentido vertical quanto no sentido de giro ao redor da coluna de acordo com a necessidade.

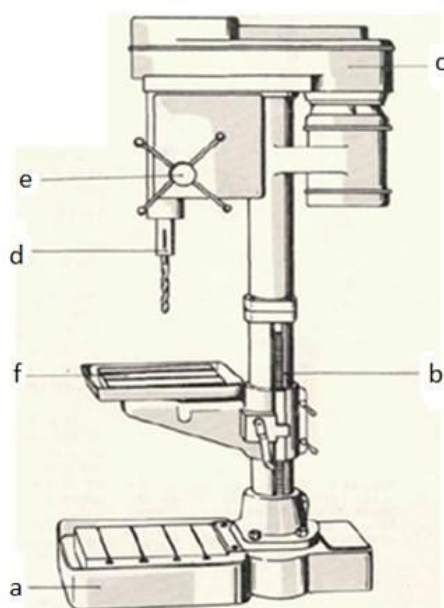


Figura 2.4 – Partes principais da furadeira de coluna: (a) Base; (b) Coluna; (c) Mecanismo de acionamento do movimento principal; (d) Árvore; (e) Alavanca em cruz e (f) Mesa ajustável (GERLING, 1967).

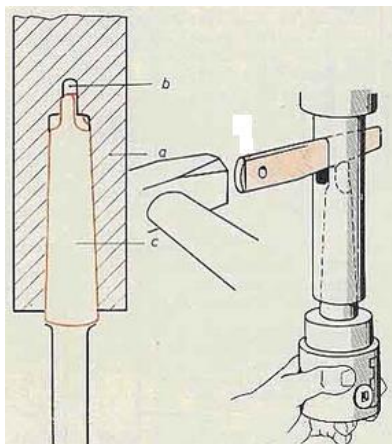


Figura 2.5 – Extremidade inferior da árvore, encaixe e retirada do mandril. (a) topo da árvore; (b) orifício transversal e (c) haste da broca ou mandril (GERLING, 1967).

O mecanismo de acionamento do movimento principal de rotação e avanço é mostrado detalhadamente na Fig. 2.6.

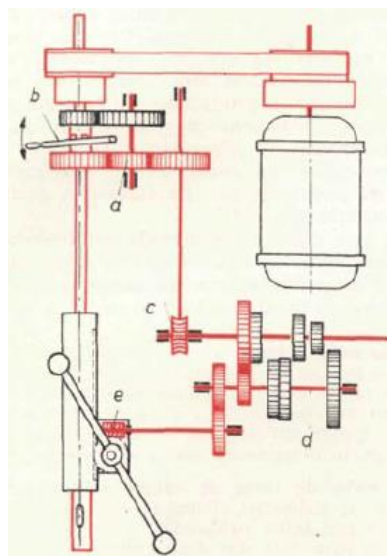


Figura 2.6 – Acionamento dos movimentos principal e de avanço. (a) engrenagens do movimento principal de rotação; (b) alavanca de engate; (c) derivação para o movimento de avanço; (d) sistemas para variação do avanço e (e) parafuso sem fim – coroa (GERLING, 1967).

2.2.3 Ferramenta de Corte

Na furação dos ferros fundidos são utilizadas brocas helicoidais de aço rápido e de metal duro na grande maioria das vezes, apesar de existirem outros materiais e geometrias diferentes de broca para casos especiais. A figura 2.6 mostra estes tipos de brocas.

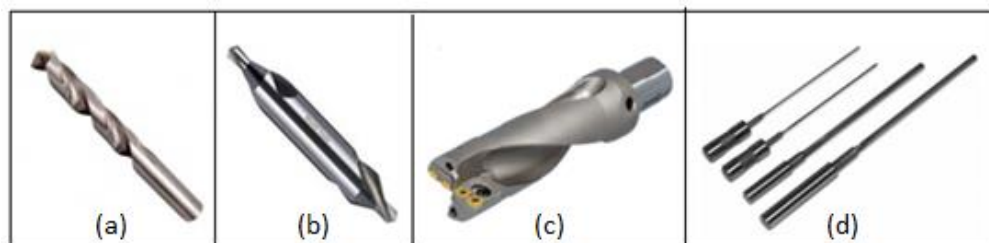


Figura 2.7 – Tipos de Brocas: (a) broca helicoidal, (b) broca de centro, (c) Broca intercambiável, (d) brocas canhão (BARBOSA, 2009)

2.2.3.1 Geometria das brocas helicoidais

A broca helicoidal é a mais utilizada e a mais importante no processo de furação. A norma ABNT NBR 6176 (1977) descreve as principais partes de uma broca helicoidal conforme a Fig. 2.9, e de acordo com Diniz; Marcondes; Coppini (2006) podem ser definidas da seguinte forma:

- Haste: destinada a fixação da broca na máquina. Em brocas com diâmetros até 15 mm, em geral, usam-se haste cilíndrica e a fixação à máquina se dá por intermédio mandris. Para brocas com diâmetros maiores é preferível fixar a ferramenta a um cone morse, que é preso à máquina, possibilitando dessa maneira maior força de fixação;
- Diâmetro (D): é medido entre as duas guias da broca e, normalmente, tem tolerância h8;
- Núcleo: parte interna da broca de diâmetro igual a 0,16 D. Confere rigidez à broca;

- Guias: duas regiões (uma em cada aresta de corte) na superfície externa da broca, com o diâmetro maior do que o das paredes da ferramenta, que tem como finalidades básicas: evitar o atrito entre as paredes do furo e da ferramenta e guiar a broca dentro do furo;
- Canais helicoidais: são as superfícies de saída da ferramenta. Os ângulos de hélice (δ) e de ponta (σ) mostrados na Fig. 2.8 são determinados de acordo com o material a ser usinado (STEMMER, 1995). As brocas de aplicação geral, destinadas à usinagem de aços ligados e não ligados, ferro fundido maleável, níquel e ligas de alumínio de cavaco curto são, de acordo com Stemmer (1995) classificadas como brocas tipo N, apresentando ângulo de hélice e ângulo de ponta aproximadamente de 30° e 115° , respectivamente, como mostrado na Fig. 2.8. Para a furação de materiais que tendem a formar cavacos curtos como ferros fundidos com dureza superior a 240 Brinell, latão, ligas de magnésio, borracha dura e baquelite são usadas brocas do tipo H com δ de 15° e σ de 130° . E para a usinagem de materiais mais macios como cobre, alumínio e suas ligas de cavaco longo, ligas de zinco, metal branco e PVC são utilizadas brocas do tipo W, com ângulo de hélice de 40° e ângulo de ponta de cerca de 120° . O comprimento do canal helicoidal pode variar de acordo com o diâmetro da broca e o comprimento do furo que se deseja usinar (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006);

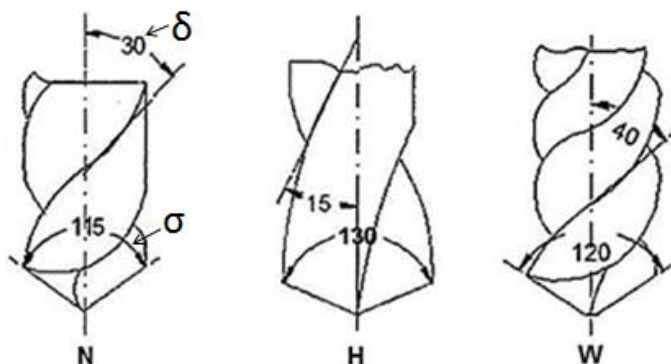


Figura 2.8 – Tipos de brocas helicoidais N, H e W, evidenciando os ângulos de ponta (σ) e de hélice (δ) (STEMMER, 1995).

- Arestas de corte: em brocas helicoidais existem duas arestas principais de corte e uma terceira ligando essas duas denominada aresta transversal de corte. O ângulo formado entre as arestas principais é chamado de ângulo de ponta (σ). Esse ângulo varia de acordo com a aplicação da broca, como mostrado anteriormente.

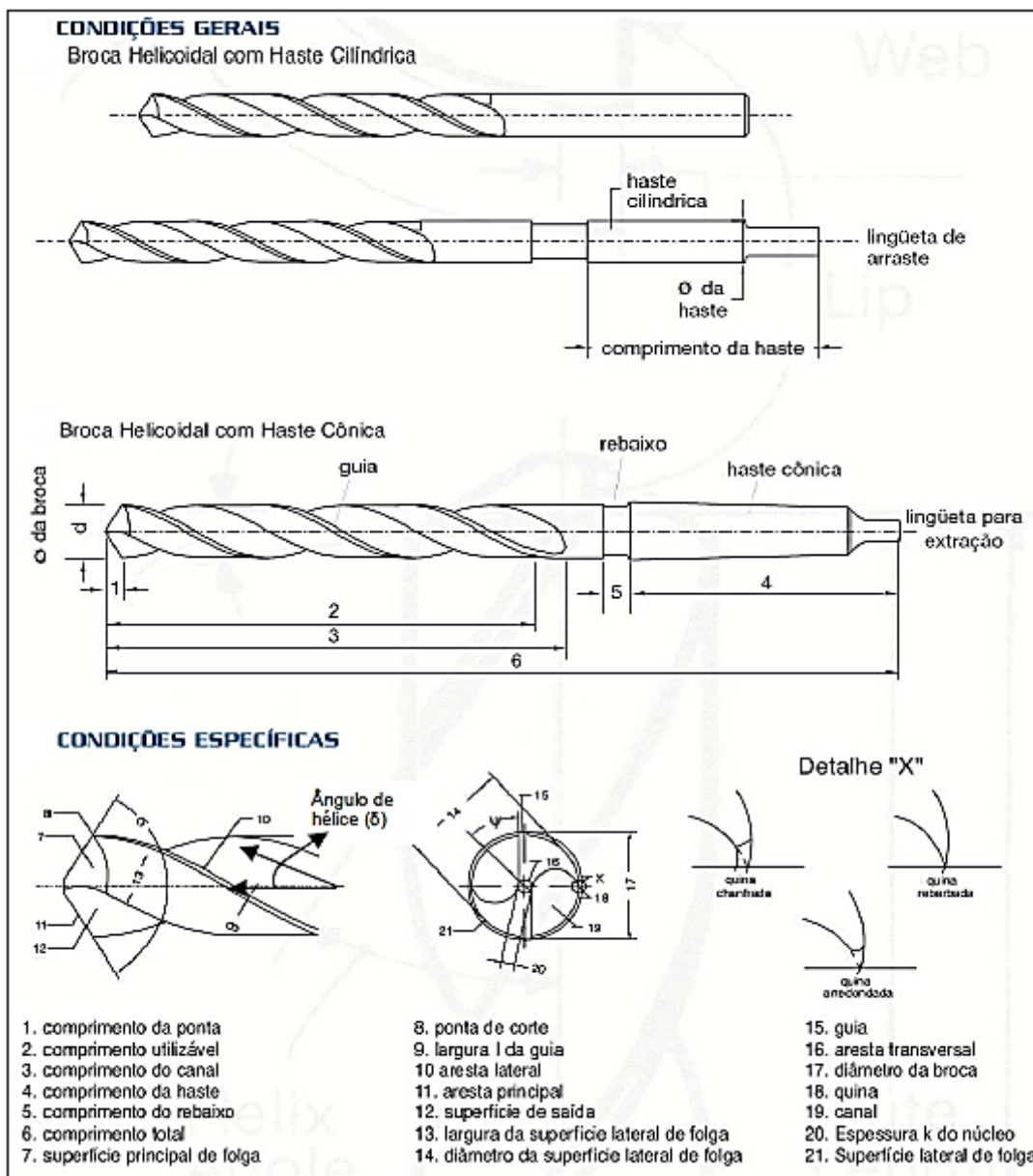


Figura 2.9 – Partes de uma broca helicoidal (ABNT NBR 6176, 1977)

2.2.4 Grandezas físicas do processo de corte

Vários conceitos sobre as grandezas do processo de corte devem ser seguidos por técnicos e engenheiros que se dedicam ao estudo da usinagem. Estes conceitos são definidos por vários autores (FERRARESI, 1970; MACHADO *et al.*, 2009; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006), e alguns destes conceitos são descritos a seguir:

- Movimento de corte: movimento realizado entre a peça e a aresta de corte da ferramenta, que promove uma única remoção de cavaco durante uma rotação, na ausência de movimento de avanço;
- Movimento de avanço: movimento entre a peça e a ferramenta, que juntamente com o movimento de corte, possibilita a retirada contínua de cavaco;
- Movimento efetivo: Soma vetorial dos movimentos de corte e avanço;

As direções, sentidos e velocidades estão associados para cada movimento. Por exemplo, direção de corte, sentido de corte e velocidade de corte estão associados com o movimento de corte. Nesse contexto definem-se (MACHADO *et al.*, 2009):

- Velocidade de corte (v_c): velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e sentido de corte. Para as operações onde há movimento de rotação da ferramenta de corte, como na furação, a velocidade de corte é calculada através da eq. (2.1);

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad [\text{m/min}] \quad (2.1)$$

Onde:

d = diâmetro da broca (mm)

n = número de rotações por minuto (rpm)

- Velocidade de avanço (v_f): velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante na direção e sentido de avanço, representada pelo produto do avanço pela rotação, calculada pela eq. (2.2);

$$v_f = f \cdot n \quad [\text{mm/min}] \quad (2.2)$$

Onde:

f = avanço (mm/volta)

- Velocidade efetiva (v_e): é a soma vetorial das velocidades de corte (v_c) e de avanço (v_f);
- Avanço (f): percurso de avanço em cada volta (mm/volta);
- Profundidade de corte (a_p): profundidade ou largura de penetração da ferramenta na peça de trabalho, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. Para a furação, segundo Ferraresi (1970), o a_p equivale à metade do diâmetro da broca (ou o raio da broca);
- Percurso de avanço (L_f): distância percorrida pelo ponto de referência da aresta de corte sobre a peça, na direção de avanço.

Os conceitos definidos acima, podem ser melhor visualizados na Fig. 2.10.

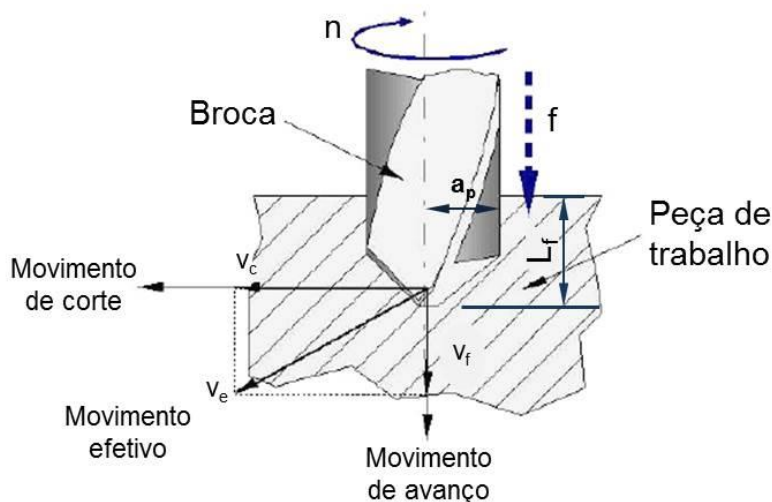


Figura 2.10 – Grandezas físicas da operação de furação (adaptado de SCHROETER; STOETERAU; WEINGAERTNER, 2004)

2.3 Ensaios de Usinabilidade

Ferraresi (1970) define a usinabilidade de um metal como sendo uma grandeza tecnológica, que expressa por meio de índice comparativo, um conjunto de propriedades de usinagem do metal em relação a outro tomado como padrão, ou seja, indica o grau de dificuldade de se usinar um material. A usinabilidade é função das condições do processo empregado, embora dependa também da dureza, composição química, operações anteriores e grau de encruamento (DINIZ, MARCONDES; COPPINI, 2006). Portanto, Trent e Wright (2000) apud Machado e da Silva (2004), sugerem que a usinabilidade não é uma propriedade do material, mas o "modo" como o material se comporta durante o corte.

A usinabilidade tem um papel de muito interesse na indústria, já que afeta diretamente a sua produtividade e o custo da usinagem, e conseqüentemente se reflete nos lucros. Por esse motivo foram desenvolvidos vários tipos de ensaios com o intuito de se estabelecer métodos de avaliação comparativa da usinabilidade dos metais.

2.3.1 Tipos de Testes de Usinabilidade

Segundo Machado e da Silva (2004), os testes de usinabilidade podem ser classificados em dois grupos: os que requerem e os que não requerem usinagem (apenas análises de características e propriedades); e dois sub-grupos: os Ranking Testes e os Testes Absolutos.

A Figura 2.11 apresenta um fluxograma ilustrativo da classificação geral dos testes de usinabilidade.

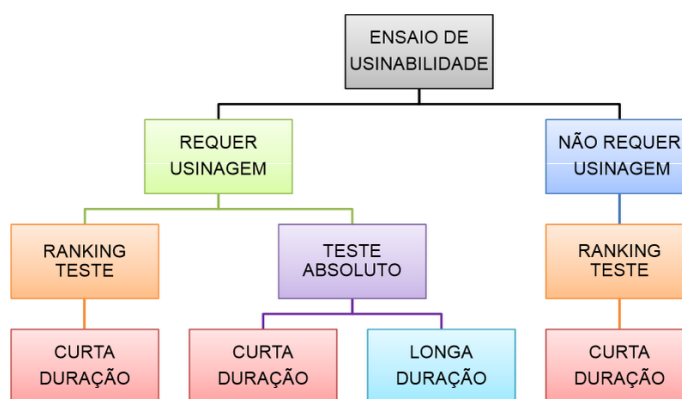


Figura 2.11 – Classificação dos ensaios de usinabilidade.

Os Ranking Testes (testes classificatórios) indicam meramente a usinabilidade relativa de duas ou mais combinações de pares de ferramenta-peça, para uma determinada condição de corte. Nestes testes não há indicação da magnitude da diferença entre os materiais testados. O objetivo deste sub-grupo é comparar a usinabilidade de materiais da peça para uma determinada condição de corte, não sendo garantido que os resultados permaneçam constantes com a alteração das condições de corte. Os ranking testes podem se enquadrar em ambos os grupos, ou seja, dos que requerem ou não usinagem, sendo sempre de curta duração.

Os Testes Absolutos, por sua vez, indicam os méritos referentes a duas ou mais combinações de pares de ferramenta-peça para uma faixa prática de variação de condições de corte, podendo em alguns casos, levar em consideração mudanças no material e geometria da ferramenta, aplicação de fluidos de corte, entre outros. Todos

os testes absolutos são classificados no grupo dos que requerem usinagem, podendo estes ser de curta ou longa duração.

2.3.2 Teste de Pressão Constante (F_f)

O teste de pressão constante ou força de avanço constante (F_f) é classificado como ranking teste, ou seja, de curta duração, que pode ser usado tanto na furação como no torneamento (DE SOUZA, 2014), embora seja mais empregado para furação. Este método consiste em aplicar uma força de avanço constante (F_f) e medir o tempo para furar uma chapa de espessura conhecida ou fixar um tempo e medir o percurso de avanço (L_f) usinado, que serão os indicadores de usinabilidade. A força de avanço constante pode ser facilmente obtida em uma furadeira de coluna por meio de pesos suspensos por um cabo de aço em uma polia adaptada no eixo de avanço da máquina-ferramenta (FERRARESI, 1970; MACHADO; DA SILVA, 2004; BARBOSA, 2009; DE SOUZA, 2014).

A Figura 2.12 mostra um esquema da adaptação de uma furadeira de coluna para realização de testes de pressão constante.

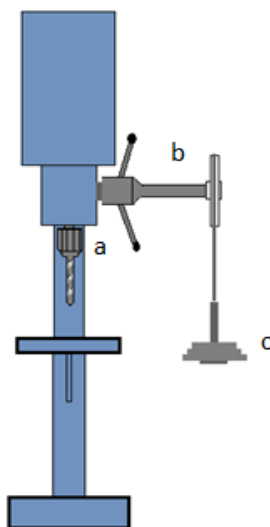


Figura 2.12 – Esquema de adaptação de furadeira de coluna para ensaios de pressão constante. (a) mandril; (b) polia montada no eixo de avanço da furadeira e (c) pesos suspensos pelo cabo de aço.

2.4 Usinabilidade dos Ferros Fundidos

2.4.1 Ferros Fundidos

Ferro fundido corresponde a uma liga ternária de ferro-carbono-silício, com teores de carbono acima de 2%, que aparece livre na forma de veios ou lamelas de grafita, ou ainda combinada (CHIAVERINI, 2002).

Diniz, Marcondes e Coppini (2006) afirmam que nos ferros fundidos o carbono está presente como carboneto (principalmente na forma de cementita (Fe_3C)) e como carbono livre (grafita). Os outros elementos contidos na liga influenciam bastante a forma como o carbono se apresenta. Um alto teor de silício no ferro fundido faz com que o carbono se apresente mais livre e quase não ocorra a formação da cementita.

A cementita mecanicamente é muito dura e frágil, e sendo ela um composto meta-estável que sob algumas circunstâncias pode ser dissociada em ferrita e grafita formando uma fase extremamente macia e de baixa resistência mecânica (COMINELI, 2010).

As principais razões para seu uso em larga escala na engenharia são: o baixo custo do processo de fundição e a economia na usinagem, devido às baixas taxas de desgaste das ferramentas, altas taxas de remoção de material, força de usinagem e potencia de corte relativamente baixas, e de seus cavacos serem geralmente pequenos e fragmentados (TRENT; WRIGHT, 2000).

De acordo com sua composição química, microestrutura, existência e forma da grafita, os ferros fundidos podem ser classificados em ferros fundidos cinzentos, brancos, maleáveis, nodulares, mesclados e vermiculares. A caracterização da microestrutura de cada um é feita da seguinte forma (CHIAVERINI, 2002; COMINELI, 2010):

- Ferro Fundido Cinzento: estrutura constituída de carbono na forma de grafita lamelar e cementita (Fe_3C), caracterizado por possuir boa usinabilidade relativa aos demais ferros fundidos;

- Ferro Fundido Branco: quase todo carbono da estrutura esta na forma de (Fe_3C), e devido ao menor teor de silício (Si) este tipo de ferro fundido possui elevada dureza, resistência, e, conseqüentemente, difícil usinabilidade;
- Ferro Fundido Maleável: obtido a partir do ferro fundido branco recozido, apresenta praticamente todo (Fe_3C) transformado em grafita na forma de nódulos;
- Ferro Fundido Nodular: apresenta estrutura constituída de carbono livre na forma esferoidal, conferindo ao material boa ductilidade e usinabilidade;
- Ferro Fundido de Grafita Compactada (Vermicular) : apresenta estrutura morfológica da grafita na forma de escamas (plaquetas ou estrias) ou vermiculos, possuindo propriedades intermediárias entre o ferro fundido cinzento e o ferro fundido nodular, fundibilidade similar ao dos ferros fundidos cinzentos, mas com melhor resistência e ductilidade.

2.4.2 Ferro Fundido Nodular

O ferro fundido nodular é obtido pela adição controlada de pequena quantidade de magnésio ou cério no ferro fundido de alto carbono em estado líquido para contrabalancear o efeito de elementos que interferem no processo de nodularização como titânio, chumbo, bismuto e arsênio de modo a produzir a forma desejada da grafita (CHIAVERINI, 2002).

O ferro fundido nodular apresenta composição química semelhante a do ferro fundido cinzento. A composição química básica do ferro fundido nodular é apresentada na Tab.2.1.

Tabela 2.1 – Classificação do ferro fundido nodular, segundo a ABNT P-EB-585 (CHIAVERINI, 2002)

Tipo	%C	%Si	%Mn	%S	%Ni	%Cu	%Cr	%Mo	%Sn	Estrutura
1	4,0 máx	1,7/2,8	0,25 - 0,5	0,01 máx	1,0/3,0	1,5	0,3	0,3	0,1	Perlítica
2	4,0 máx	1,6/2,8	0,3	0,01 máx	0,5	0,15	0,1	0,01	0,02	Ferrítico-Perlítica
3	4,0 máx	2,5 máx	0,2	0,01 máx	0,8					Ferrítica
4	4,0 máx	2,1 máx	0,10 máx	0,01 máx						Ferrítica

O ferro fundido nodular recebe essa denominação graças a disposição da grafita em forma de nódulos em uma matriz ferrítica/perlítica, e são conhecidos também como ferros fundidos dúcteis pois, apesar de apresentarem elevada resistência, possuem ductilidade moderada, além de boa usinabilidade. No entanto a principal característica do ferro fundido nodular quando comparado aos outros ferros fundidos e aos aços-carbono comuns é o seu elevado limite de escoamento. A grafita na forma esferoidal não interrompe a continuidade da matriz e confere ao material melhores ductilidade e tenacidade. A Figura 2.13 mostra a microestrutura típica de um ferro fundido nodular que em seu estado fundido bruto é constituída de uma matriz perlítica, podendo apresentar ferrita ou cementita livre (CIMM, 2014; BARBOSA, 2009, CHIAVERINI, 2002).

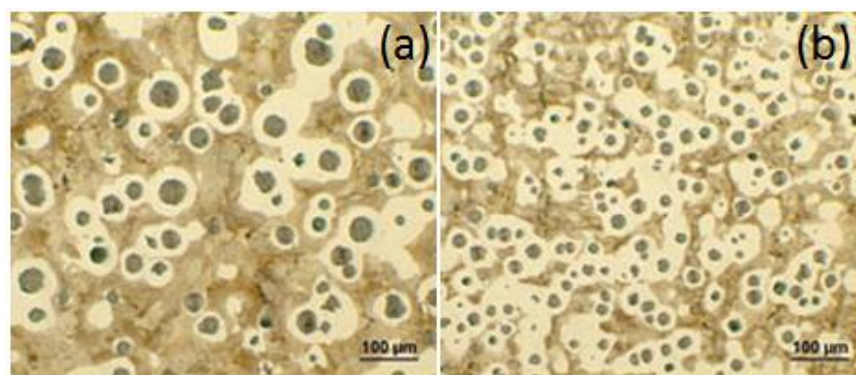


Figura 2.13 – Microestrutura do Ferro Fundido Nodular típica. (a) centro e (b) periferia (direita). (TUPY S.A, 2015)

Desde a sua introdução em 1948, o ferro fundido nodular ganhou espaço em muitos campos da indústria a medida que a compreensão sobre o material e os desenvolvimentos foram ocorrendo (BARBOSA, 2009). O grande destaque para as aplicações do ferro fundido nodular está na indústria automotiva. Devido a suas vantagens como boa usinabilidade (que resulta em uma economia na usinagem), baixo custo e processo de fundição capacidade de amortecimento, propriedades mecânicas (ductilidade, tenacidade e resistência) e usinabilidade apropriada eles tem sido usados em muitas aplicações estruturais. Cames, virabrequins, carcaças de bombas, válvulas e articulações de direção, bielas, rodas para locomotivas e vagões, acoplamentos de sapatas de freio, equipamentos de terraplanagem, ferramentas para movimentação de terra como pontas de escavadeira, cilindros, correntes transportadoras são exemplos das aplicações do ferro fundido nodular (BARBOSA, 2009; TUPY, 2015).

A quantidade e o tipo de nódulos na matriz influencia muito as propriedades mecânicas dos ferros fundidos nodulares. Por exemplo, nos ferros fundidos nodulares perlíticos, a presença de uma grande quantidade de nódulos representa aumento no limite de resistência à tração; já no caso dos ferros fundidos nodulares ferríticos, possuir elevado número de nódulos aumenta o alongamento (DE SOUSA, 2014).

Dentre os fatores que podem influenciar diretamente as propriedades mecânicas dos ferros fundidos nodulares pode-se citar:

- A presença de carbonetos, quantidade de ferrita, quantidade de perlita, quantidade e tamanho dos nódulos, formas dos nódulos, porosidades e a presença de sulfetos, entre outros (DE SOUSA, 2014).

De forma geral, os ferros fundidos nodulares apresentam boa usinabilidade, tendo propriedades muito parecidas com as do aço (COMINELI, 2010) e recentemente tem substituído muitas aplicações dos ferros fundidos cinzentos por possuírem melhores propriedades mecânicas (TRENT; WRIGHT, 2000).

2.4.3 Ferro Fundido Vermicular

No ferro fundido vermicular, a grafita é disposta em forma de vermículos e se apresenta de forma interconectada e com extremidades arredondadas, tornando a nucleação e propagação de trincas muito mais difícil que no caso dos ferros com grafita lamelar, o que lhe confere maior resistência mecânica quando comparado como ferro fundido cinzento (DINIZ, MARCONDES; COPPINI, 2006). A Figura 2.14 mostra a microestrutura do ferro fundido vermicular.

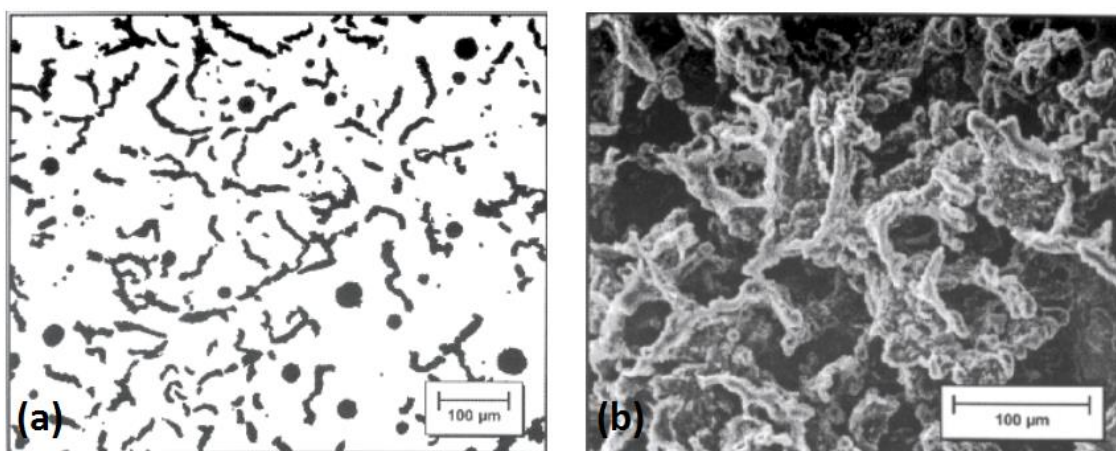


Figura 2.14 – (a) Aspecto da grafita compactada em metalografia óptica, (b) Aspecto da grafita compactada após ataque profundo (MEV) (GUESSER, 2002).

Comparando-se os ferros fundidos vermiculares com os cinzentos pode-se encontrar incrementos de 75% no limite de resistência, 35% a 40% no módulo de elasticidade e o dobro de resistência a fadiga (GUESSER, 2002).

Um exemplo de aplicação são os blocos de motores a diesel, que eram tradicionalmente fabricados com ferro fundido cinzento, que com o passar do tempo foi substituído pelo ferro fundido vermicular que apresenta propriedades mecânicas superiores devido a necessidade de suportar maiores temperaturas e pressões sem aumentar o tamanho dos componentes, possibilitando economia de combustível, redução da emissão de poluentes e diminuição do ruído (GUESSER, 2002).

Comparado ao ferro fundido nodular, o ferro fundido vermicular possui maior capacidade de amortecimento, condutividade térmica mais elevada e melhor

usinabilidade, além de permitir uma taxa maior de transferência de calor e dissipação de vibrações devido a interconectividade da grafita (CHIAVERINI, 2005).

Possuem propriedades intermediárias entre o ferro fundido cinzento (alta condutividade térmica, baixa resistência e alongamento) e o ferro fundido nodular (baixa condutividade térmica, alta resistência e alto alongamento), como mostrado na Tab. 2.2. (NAVES, 2009)

Tabela 2.2 – Comparação entre propriedades físicas e mecânicas dos ferros fundidos, vermicular, cinzento e nodular (MOCELLIN, 2002; DORÉ, 2007; NAVES, 2009)

Propriedade	Cinzento	Vermicular	Nodular
Resistência à tração [MPa]	235	500	650
Módulo de Elasticidade [GPa]	110	140	165
Resistência à Fadiga [MPa]	100	205	265
Condutividade Térmica [W/(mK)]	48	35	28
Dureza [HB]	200	225	270

O ferro fundido vermicular possui matriz perlítica ou ferrítica/perlítica que pode variar de acordo com as aplicações. Por exemplo, quando se deseja estabilidade dimensional por se trabalhar em altas temperaturas poderá ser escolhido um material com matriz acima de 95% de ferrita, como é o caso de um coletor de escape. Já para componentes que precisem de resistência e rigidez se opta por matrizes contendo essencialmente perlita, como para fabricação de blocos e motores e cabeçotes (GUESSER, 2002).

2.4.4 Fatores que afetam a usinabilidade dos Ferros fundidos

Embora seja comum pensar que a usinabilidade é função da dureza e da resistência mecânica, muitos outros fatores influenciam de forma significativa a usinabilidade de um material. A quantidade de inclusões ou aditivos pode facilitar a

usinagem, por outro lado, a quantidade de partículas duras, a microestrutura, a tendência ao empastamento do cavaco na superfície de saída da ferramenta, encruamento do material, entre outros pode dificultar o corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2006) e Machado e da Silva (2004), a usinabilidade dos ferros fundidos varia drasticamente, de acordo com a composição química e microestrutura, como pode ser observado na Fig. 2.15. Além da porcentagem de carbono, outros elementos de liga podem influenciar a usinabilidade da seguinte forma (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006):

- Cromo, cobalto, manganês, molibdênio e vanádio: formadores de carbonetos duros e abrasivos prejudicando a usinabilidade;
- Silício, níquel, alumínio e cobre: elementos grafitizantes que auxiliam melhorando a usinabilidade.

A forma da grafita e sua distribuição também influenciam a usinabilidade, como no caso dos ferros fundidos nodulares que possuem grafitas mais esferoidais dispersas na matriz, aumentando a resistência mecânica e ductilidade do metal influenciando na formação de cavacos longos dificultando o corte (MACHADO; DA SILVA, 2004; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006). No caso dos ferros fundidos vermiculares a mudança de um formato lamelar para a forma vermicular com extremidades interconectadas e arredondadas também aumentam a resistência e a dureza e dificultam a usinagem (GUESSER, 2002)

Para a usinagem de ferros fundidos é recomendada a utilização de ferramentas de corte classe K, ainda que as cerâmicas à base de alumina e SIALONS tem sido utilizadas com sucesso (MACHADO; DA SILVA, 2004).

Através da Fig. 2.15 pode-se observar de uma forma geral a usinabilidade relativa entre os ferros fundidos.

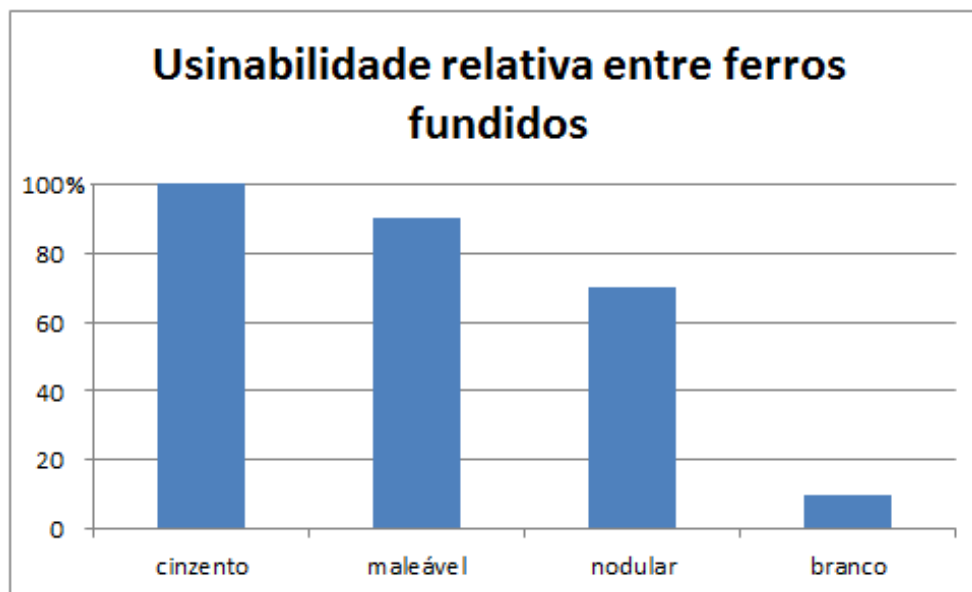


Figura 2.15 – Usinabilidade dos diversos tipos de ferros fundidos. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006)

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve com detalhes todas as etapas necessárias para que se tornasse possível a realização de testes de pressão constante, iniciando pelo projeto, fabricação e montagem do dispositivo para adaptação da furadeira de coluna para realização dos ensaios de usinabilidade, finalizando com a validação do sistema com a execução de ensaios em ferros fundidos. A Figura 3.1 mostra um fluxograma com a sequência cronológica das etapas desenvolvidas neste trabalho.

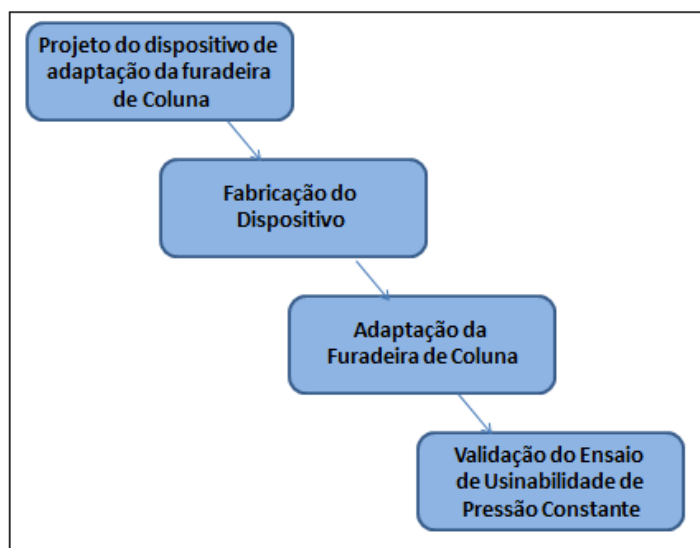


Figura 3.1 – Fluxograma das etapas do projeto do dispositivo de adaptação da furadeira de coluna.

3.1 Projeto do dispositivo de Adaptação da furadeira de Coluna

O projeto do dispositivo foi efetuado com o objetivo de adaptar a furadeira de coluna do Laboratório de Tecnologia Mecânica (LabTecMec) para possibilitar a

realização de ensaios de usinabilidade de curta duração através de testes de pressão constante; além de manter a funcionalidade da máquina-ferramenta, sem a retirada do dispositivo, através de uma alavanca solidária ao eixo do dispositivo. Dessa forma, foi idealizado um dispositivo composto por um eixo, polia, cabo de aço e suporte para pesos, para ser acoplado ao eixo de avanço manual da furadeira, visando a aplicação de uma força de avanço constante, considerando ainda locais para fixação de hastes para que o eixo também possa ser utilizado como alavanca de avanço manual.

Dentre os componentes do dispositivo, foi necessário a fabricação apenas do eixo conforme projeto apresentado na Fig. 3.2 destacando o desenho técnico, e a vista 3D é apresentada na figura 3.3. A polia, o cabo de aço e o suporte para pesos foram cedidos pela Divisão de Patrimônio da UFES.

Desenho (medidas em mm)

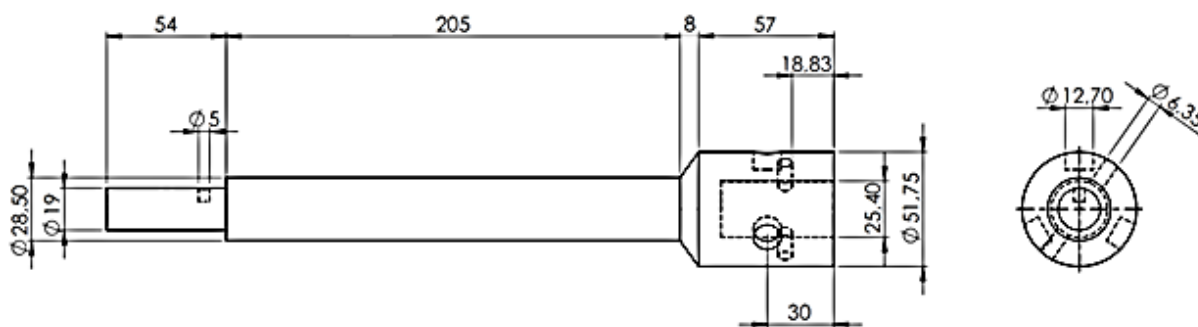


Figura 3.2 – Desenho técnico do projeto do eixo do dispositivo.



Figura 3.3 – Vista 3D do projeto do eixo do dispositivo.

3.2 Fabricação do eixo dispositivo

3.2.1 Material da Peça de Trabalho

Foi utilizada uma barra de aço ABNT 1050 com 520 mm de comprimento total, sendo que 450 mm deste comprimento com diâmetro 29 mm e 70 mm de com uma parte escalonada com vários diâmetros diferentes e o restante com 52 mm de diâmetro, disponível no LabTecMec, como material de base para a fabricação do eixo do dispositivo. A Figura 3.4 apresenta a barra utilizada.



Figura 3.4 – material base para o eixo

3.2.2 Máquinas-Ferramentas

A fabricação do eixo do dispositivo foi realizada em etapas executadas em diferentes máquinas-ferramentas, todas pertencentes ao Laboratório de Tecnologia Mecânica (LabTecMec) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFES, conforme as especificações descritas a seguir:

- Serra Fita horizontal Ergop: 0,5 HP de potência e rotação máxima de 1700 rpm;
- Torno Revolution RV 220, série Gold, Diplomat 300, Nardini: 8 kW de potência e rotação máxima de 2500 rpm;
- Torno Universal IMOR: 3 HP de potência e rotação máxima de 2500 rpm;

- Furadeira de Coluna KONE KM 32: 2 CV de potência e rotação máxima de 1760 rpm;
- Fresadora Vertical WMW: 3,5 kW de potência e rotação máxima de 2700rpm;
- Torno Mascote MS 205 Nardini: 4,8 kW de potência e rotação máxima de 2500 rpm;

A Figura 3.5 dá uma visão geral das máquinas-ferramentas utilizadas nesta etapa do trabalho.



Figura 3.5 – Máquinas-ferramenta: (a) Serra Fita; (b) Torno Revolution RV220; (c) Torno Universal IMOR; (d) Furadeira de coluna; (e) Fresadora Vertical WMW; (f) Torno Universal Mascote MS 205.

3.2.3 Etapas de Fabricação

Na Serra Fita foi efetuado o corte para reduzir o comprimento do eixo na extremidade de menor diâmetro em 190 mm, tomando o cuidado para deixar sobremetal para a operação subsequente de faceamento.

No torno universal Imor foram realizadas as etapas de faceamento da seção transversal das extremidades do eixo e abertura de um furo de centro para fixação da barra entre pontas para realização das próximas etapas de fabricação do eixo. Esta máquina-ferramenta foi de grande importância, uma vez que possui uma placa com abertura suficiente para introduzir a peça em seu diâmetro maior, de forma que a peça ficou bem fixada reduzindo vibrações durante a usinagem.

No torno Revolution RV 220, foi realizada a etapa de abertura de um furo de 25,4 mm de diâmetro e 51 mm de profundidade no centro da extremidade de maior diâmetro (51,75 mm) do eixo. Este furo será utilizado para fixação do eixo do dispositivo no eixo de avanço da furadeira de coluna. Devido à grande dimensão do furo, esta etapa foi realizada em três estágios, utilizando-se, para tanto, três brocas nos diâmetros de 10 mm, 17 mm e 25,4 mm (1"), respectivamente.

No torno Mascote foram executadas as etapas de cilindramento externo para redução do diâmetro do eixo (rebaixo) para o encaixe da polia até o diâmetro de 19 mm e comprimento de 54 mm, além do desbaste do eixo através de operações de cilindramento externo e torneamento cônico.

A furadeira de coluna foi usada para efetuar um furo de 5 mm de diâmetro e 5mm de profundidade na extremidade rebaixada do eixo, ou seja, na extremidade com menor diâmetro (19 mm) como pode ser observado no projeto apresentado na Fig 3.2).

Na fresadora foram usinados os furos de 12,70 mm de diâmetro na extremidade de maior diâmetro do eixo como mostrado na Fig. 3.7 (c). Estes foram usinados para a fixação das hastes da alavanca, sendo estes defasados de 120°. Também foi executado um furo passante de 6,35 mm de diâmetro para fixação do eixo do dispositivo no eixo de avanço da furadeira por meio de um pino elástico.

As roscas internas dos três furos para fixação das hastes da alavanca foram abertas manualmente utilizando-se um jogo de machos OSG W1/2 (12,7mm) apresentado na Fig. 3.6.



Figura 3.6 – Jogo de machos OSG W1/2(12,7mm) utilizado para abertura das roscas internas para fixação das hastes da alavanca do dispositivo.

Na Fig. 3.7 são exibidas fotos de alguns procedimentos de usinagem realizados nas máquinas-ferramenta e na Tab. 3.1 é apresentado um quadro com resumo das etapas citadas acima considerando a máquina-ferramenta utilizada e as condições de corte empregadas.

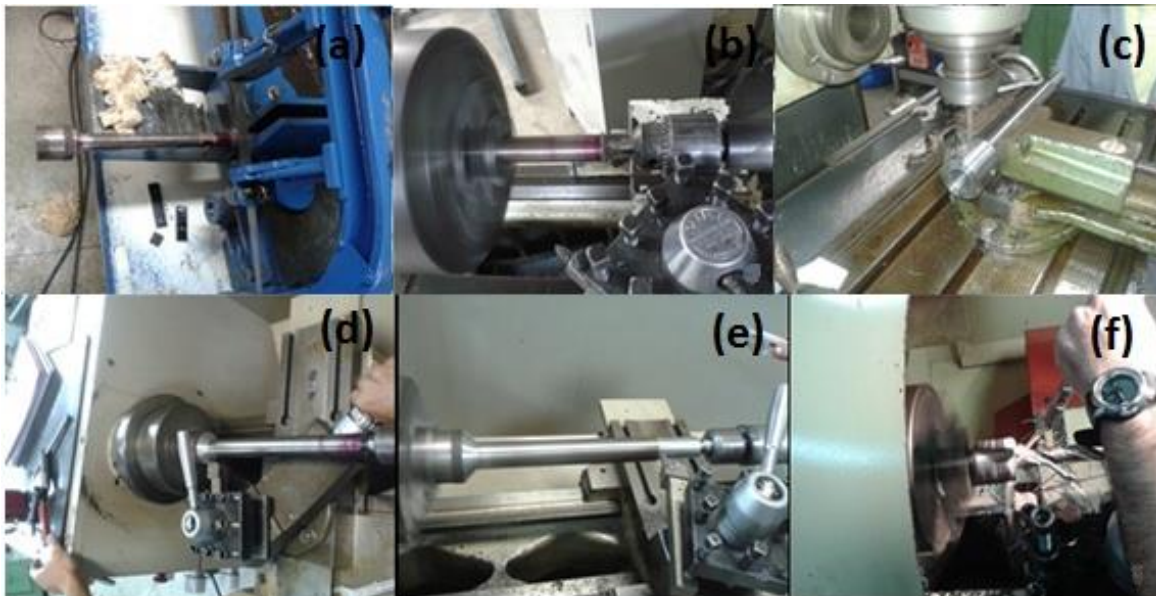


Figura 3.7 - Etapas da fabricação do eixo – (a) serramento, (b) furo de centro; (c) usinagem do furo para fixação do eixo por meio de pino elástico; (d) torneamento cônico à 45°; (e) cilindramento do rebaixo para acoplamento da polia; (f) usinagem do furo de 25,4 mm (1”).

Tabela 3.1 – quadro resumo das etapas de usinagem realizadas na fabricação do eixo do dispositivo.

Etapas	Máquina	Condições de corte
Serramento	Serra de Fita horizontal ERGOP,	1000 rpm, avanço automático
Faceamento das extremidades do eixo	Torno Universal IMOR	390 rpm, avanço manual
Furos de Centro		400 rpm, avanço manual
Torneamento cônico à 45°	Torno Universal Mascote MS 205 Nardini	400 rpm, avanço manual
Rebaixo e Desbastes (Cilindramento externo)		400 rpm; $f = 0,116$ mm/volta; $ap = 0,75$ mm
Furos com 120° de defasagem	Fresadora Vertical WMW	670 rpm; avanço manual
Furo passante para encaixe do pino elástico		670 rpm; avanço manual
Furo de fixação do eixo do dispositivo no eixo de avanço da furadeira ($\Phi = 25,4$ mm (1"))	Torno Revolution RV 220 série Gold, Diplomat 3001 Nardini	1° furo (broca de 10 mm): 700 rpm; $f = 0,1$ mm/volta; $L_f = 56$ mm 2° furo (broca de 17 mm): 450 rpm; $f = 0,1$ mm/volta; $L_f = 56$ mm 3° furo (broca de 25,4 mm): 300 rpm; $f = 0,1$ mm/volta; $L_f = 56$ mm
Furo localizado no rebaixo de 19 mm de diâmetro	Furadeira de Coluna KONE KM 32	840 rpm; avanço manual; $L_f = 5$ mm
Abertura das roscas	*	*

* efetuadas manualmente e utilizados jogo de machos W1/2.

3.3 Fabricação dos Outros Componentes do dispositivo

Como citado anteriormente o dispositivo é composto do eixo, de hastes para operação manual, roldana, cabo de aço e suporte para pesos, além dos próprios pesos. A construção do eixo foi detalhada anteriormente, e este item contemplará a fabricação do suporte para a carga, assim como as cargas e também as hastes, já que a polia e o cabo de aço não precisaram ser fabricados.

3.3.1 Fabricação do Suporte para Carga e Blocos Utilizados como Carga

Foram utilizados três blocos como carga, a saber, 4,179 kg; 3,583 kg e 2,917 kg, que foram fabricados a partir do serramento de um bloco maior, cedido pela Divisão de Patrimônio da UFES.

Um cilindro, também cedido pela Divisão de Patrimônio da UFES, com 51 mm de diâmetro por 200 mm de comprimento foi faceado, furado com broca de centro e torneado de modo que 182 mm de seu comprimento ficassem com 20,6 mm de diâmetro.

Na extremidade de menor diâmetro do suporte foi efetuado um furo passante na direção radial de 5,7 mm de diâmetro permitindo a passagem de um cabo de aço. A peça gerada, com 0,774 kg foi utilizada como suporte para encaixe dos blocos.

A Figura 3.8 mostra os blocos usados como carga e o suporte.



Figura 3.8 – Suporte e blocos usados como carga

3.3.2 Fabricação das Hastes

As hastes foram fabricadas a partir de material encontrado na sucata, de forma muito simples. Apenas foram cortadas na serra fita em dimensões aproximadamente iguais (diâmetro 14 mm e 195 mm de comprimento) torneadas manualmente no torno Mascote MS 205.

Por último a usinagem das roscas (tipo whitworth 55° e 12 fios por polegada) foi realizada no torno Mascote MS 205. A Figura 3.9 mostra duas das extremidades roscadas encaixadas no eixo do dispositivo e as roscas do furo e da haste à mostra.



Figura 3.9– Hastes encaixadas no eixo do dispositivo

3.4 Adaptação da Furadeira de Coluna

Para realizar a adaptação, e substituição da alavanca em cruz pelo dispositivo foi necessária seguiu o procedimento abaixo:

Retirada da alavanca em cruz da furadeira de coluna, fixação das hastes e da polia ao eixo, fixação do eixo do dispositivo no eixo de avanço da furadeira de coluna, seleção dos blocos que seriam utilizados como carga e acoplamento dos mesmos no suporte de carga e por último a fixação de um cabo de aço ligando a polia e o suporte de carga.

A alavanca em cruz precisou ser retirada e substituída pelo dispositivo. A Figura 3.10 mostra a alavanca antes de ser retirada.



Figura 3.10 – Alavanca em cruz acoplada à furadeira de coluna

A fixação das hastes foi feita por torque manual, a polia foi encaixada na extremidade rebaxada do eixo através de um parafuso que passava através da polia e adentrava o furo de 5 mm de diâmetro por 5 mm de profundidade situado na extremidade do rebaixo como mostrado na Fig. 3.11.



Figura 3.11 - Polia e eixo antes da montagem do dispositivo

O eixo do dispositivo após montagem das hastes e polia foi acoplado no eixo de avanço através do furo de 25,4 mm e de um pino elástico. A Figura 3.12 mostra o detalhe do furo do eixo do dispositivo e a extremidade do eixo de avanço.

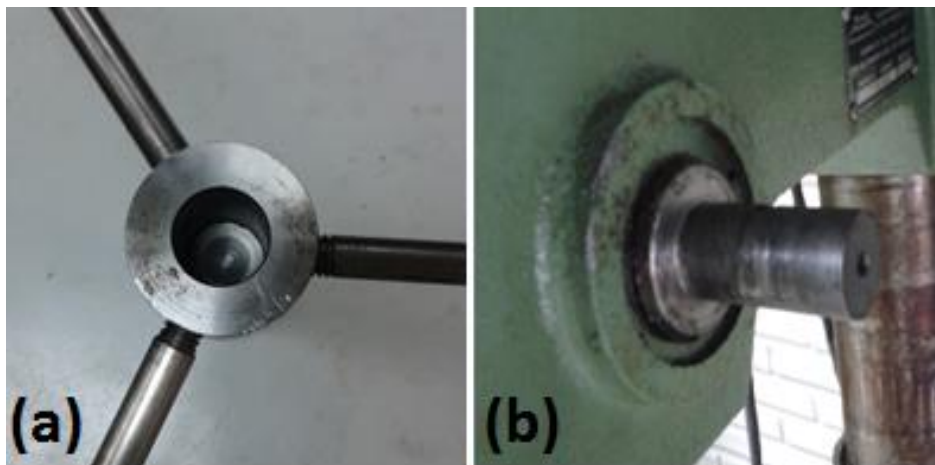


Figura 3.12 – (a) furo do dispositivo e (b) eixo de avanço da furadeira

Após a escolha da carga foi realizada a montagem dos blocos no suporte e a passagem do cabo de aço através do furo, um grampo foi utilizado para prender as extremidades soltas do cabo de aço. A Fig. 3.13 mostra o suporte montado como descrito.



Figura 3.13 – Pesos montados no suporte e cabo de aço fixado com o auxílio de um grampo.

A fixação do cabo de aço na polia foi realizada através de um orifício que se encontrava próximo a borda da polia como mostrado na parte superior da Fig. 3.11.

Para que a interferência externa fosse mínima, foi necessário retirar a mola de retorno elástico, pois esta conferia atrito adicional ao sistema interferindo bastante a realização dos ensaios. A Fig. 3.14 mostra a mola de retorno elástico retirada.



Figura 3.14 – Mola de retorno elástico

O mecanismo completamente montado está mostrado na Fig. 3.15.



Figura 3.15 – Dispositivo para execução de ensaios de usinabilidade de pressão constante montado no eixo de avanço da furadeira de coluna.

3.5 Validação da Adaptação da Furadeira

Para validar o dispositivo fabricado e a adaptação da furadeira para realização de ensaios de usinabilidade de pressão constante foi proposto a execução de testes visando a comparação da usinabilidade de dois tipos de ferros fundidos como detalhado a seguir.

3.5.1 Material da peça de Trabalho

Como objeto de estudo foram utilizados duas classes distintas de ferro fundido: o ferro fundido nodular, designação Tupy FE45012 e ferro fundido vermicular, designação Tupy FV350, que foram doados pelo Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

A Figura 3.16 mostra a geometria dos corpos de prova das diferentes classes de ferro fundido.

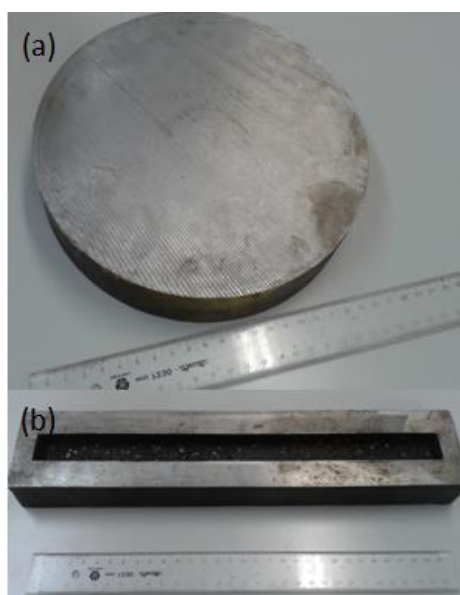


Figura 3.16 - Geometria dos corpos de prova. (a) FE45012 e (b) FV 350.

O ferro fundido nodular FE45012 foi fornecido na forma de bolacha com diâmetro nominal de 203 mm e espessura nominal de 40 mm. No entanto, para fixar este material à mesa da furadeira, por meio de uma morsa, foi necessário serrar esse

corpo de prova, de forma que ficou com 78 mm de largura conforme mostrado na Fig. 3.17.



Figura 3.17 - Formato do corpo de prova de FE45012 após serramento, permitindo fixação na morsa.

O ferro fundido vermicular FV 350, por sua vez, foi fornecido na forma mostrada na Fig. 3.18 com dimensão nominal de 355 (comprimento) x 72 (largura) x 37 (altura) mm apresentando um rasgo na parte central de 20 mm de largura, comprimento 324 mm e 18 mm de profundidade.

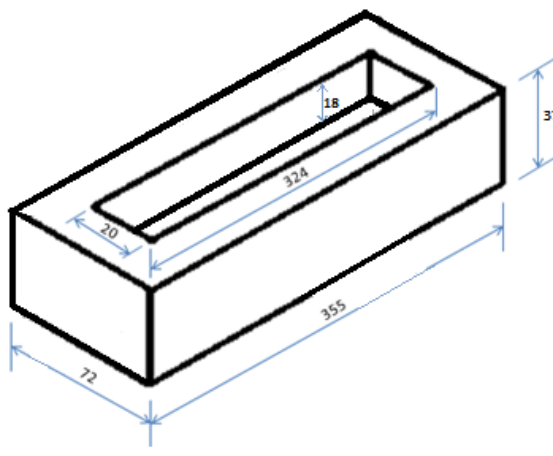


Figura 3.18 – Configuração e dimensões do corpo de prova de ferro fundido vermicular FV 350 medidas em mm.

A composição química, dureza, micrografias e a análise da microestrutura dos materiais são mostradas nas Tabs. 3.2 e 3.3, Tab. 3.4 e 3.5, Figs.3.20 e 3.21 e Tabs. 3.5 e 3.6, respectivamente. Essas informações foram retiradas de trabalhos anteriores.

Tabela 3.2 – Composição química do ferro fundido vermicular FV 350 (% em peso) (NAVES, 2009).

Elemento	C	Si	Mn	S	Cu	Sn	Ti
%	3,5	2,3	0,25	0,006	0,19	0,024	0,01

Tabela 3.3 – Composição química do ferro fundido nodular FE 45012 (% em peso) (TUPY, 2015).

Elemento	C	Si	Mn	S	P	Mg
%	3,30 – 3,80	2,60 – 3,00	0,20 – 0,65.	0,02 máx.	0,10 máx.	0,04 – 0,07

Tabela 3.4 – Dureza Ferro fundido Vermicular (NAVES, 2009).

Material	Dureza (HB)
FV 350	174,9

Tabela 3.5 – Dureza do ferro fundido nodular (DE SOUSA, 2014).

Material	Região	Dureza Média (HB)
FE 45012	Periferia	166,6
	Zona Intermediária	180,0
	Núcleo	181,0

O ferro fundido vermicular FV 350 apresenta uma matriz ferrítica-perlítica, com grafitas encurtadas com extremidades arredondadas e orientadas aleatoriamente como mostrado na Fig. 3.19 (NAVES, 2009).

As diversas formas que a grafita pode apresentar são classificadas de acordo com a norma ASTM 247, e o grau de nodularização indica o quanto da grafita está na forma esferoidal.

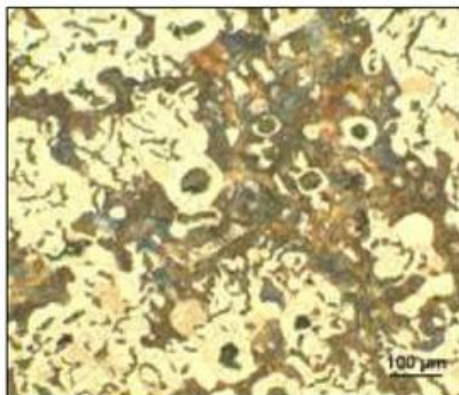


Figura 3.19 – Micrografia do FV 350. Ataque nital 3 % (NAVES, 2009).

O ferro fundido nodular FE 45012 possui uma matriz totalmente ferrítica/perlítica com grafita esferoidal como mostrado na Fig. 3.20 (TUPY, 2014; CIMM, 2015).

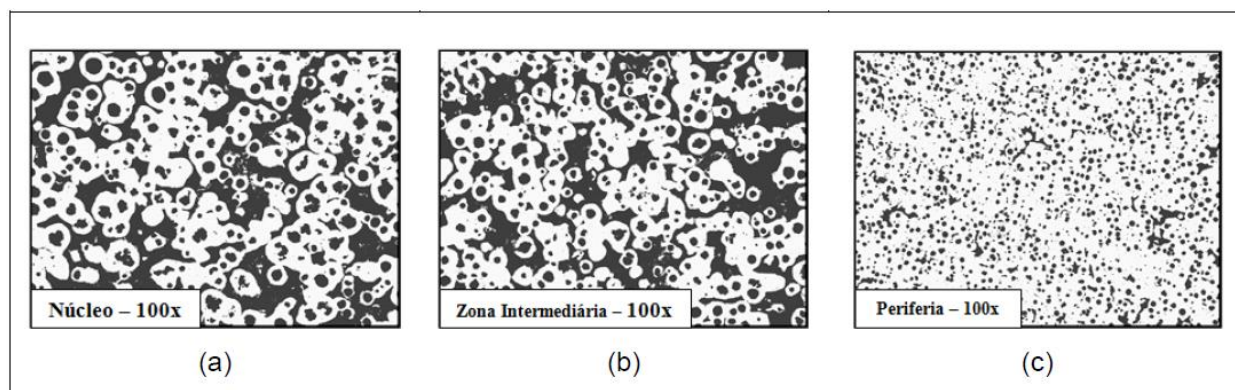


Figura 3.20 – Micrografias do ferro fundido nodular FE 45012. Ataque nital 3%. (a) núcleo, (b) região intermediária e (c) periferia (DE SOUSA, 2014).

Tabela 3.6 - Caracterização microestrutural do ferro fundido Vermicular FV350 (NAVES, 2009).

Material	Matriz	Grafita	
		Forma	Nodularização
FV 350	Perlita com 44% de ferrita	III e VI	15%

Tabela 3.7 – Caracterização microestrutural do ferro fundido nodular FE45012 (DE SOUSA, 2014; TUPY, 2015; CIMM, 2015).

Material	Região	Matriz	Grafita	
			Forma	Nodularização(%)
FE 45012	Periferia	Ferrítica/Perlítica com 4,4% de perlita	I e II	97,8
	Zona Intermediária	Ferrítica/Perlítica com 17,5% de perlita		98,4
	Núcleo	Ferrítica/Perlítica com 21,3% de perlita		96,8

3.5.2 Ferramenta

A ferramenta de corte utilizada nos testes foi doada pelo LEPU, sendo esta uma broca helicoidal de metal duro, K20, com revestimento multicamadas TiN/TiAlN e $\varnothing = 10$ mm, especificação CoroDrill® Delta C-840, fabricada pela Sandvik Coromant. A Figura 3.21 apresenta a geometria da ferramenta utilizada.

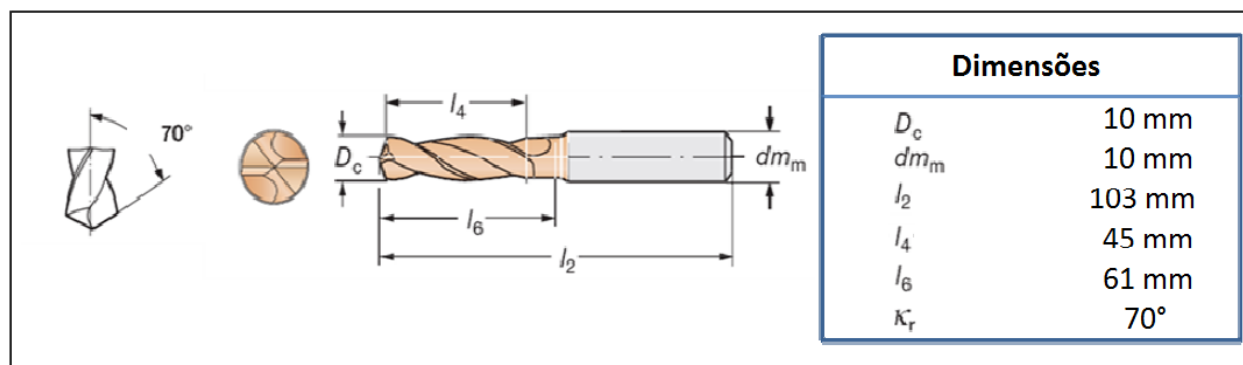


Figura 3.21 – Broca CoroDrill® Delta C-840 (BARBOSA, 2009)

3.6 Teste de Usinabilidade

Para a comparação da usinabilidade das duas classes de ferros fundidos, foram realizados testes de usinabilidade de Pressão Constante (F_f), que consistiram basicamente, em furar a seco, o corpo de prova de cada material avaliado durante um tempo fixo pré-definido de 20 segundos, mantendo a rotação constante em 1150 rpm. Foi considerado como medida de usinabilidade o percurso de avanço (ou profundidade de penetração da broca), L_f , atingido ao fim do período de tempo de 20 s, sendo medido com por meio de um paquímetro com resolução de 0,02 mm. Foi utilizada uma broca nova para cada ensaio, considerando que cada ensaio foi replicado duas vezes, ou seja, empregou-se uma ferramenta nova para cada três furos. A Tabela 3.8 mostra as condições utilizadas nos testes, variando-se o material da peça de trabalho e o peso (força de avanço).

Tabela 3.8 – Condições utilizadas nos testes e ordem que foram realizados.

Ensaio	Material	F_f [kgf]
1	FV 350 (vermicular)	7,274
2	FE 45012 (nodular)	7,274
3	FE 45012 (nodular)	11,453
4	FV 350 (vermicular)	11,453

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A realização dos ensaios ocorreu de forma satisfatória, tomando-se o cuidado de assinalar com uma marcação os furos de forma organizada como mostra a Fig. 4.1.



Figura 4.1 – Corpos de prova após a realização dos ensaios

Os resultados dos ensaios realizados são mostrados na Tab.4.1 e no gráfico da Fig. 4.2.

Tabela 4.1 – Percurso de avanço (L_f) encontrado em cada teste.

Material	Ff [kgf]	L_f [mm]
FV 350 (vermicular)	7,274	7,51 ± 0,44
FE 45012 (nodular)	7,274	11,13 ± 0,12
FE 45012 (nodular)	11,453	17,82 ± 1,65
FV 350 (vermicular)	11,453	14,21 ± 0,53

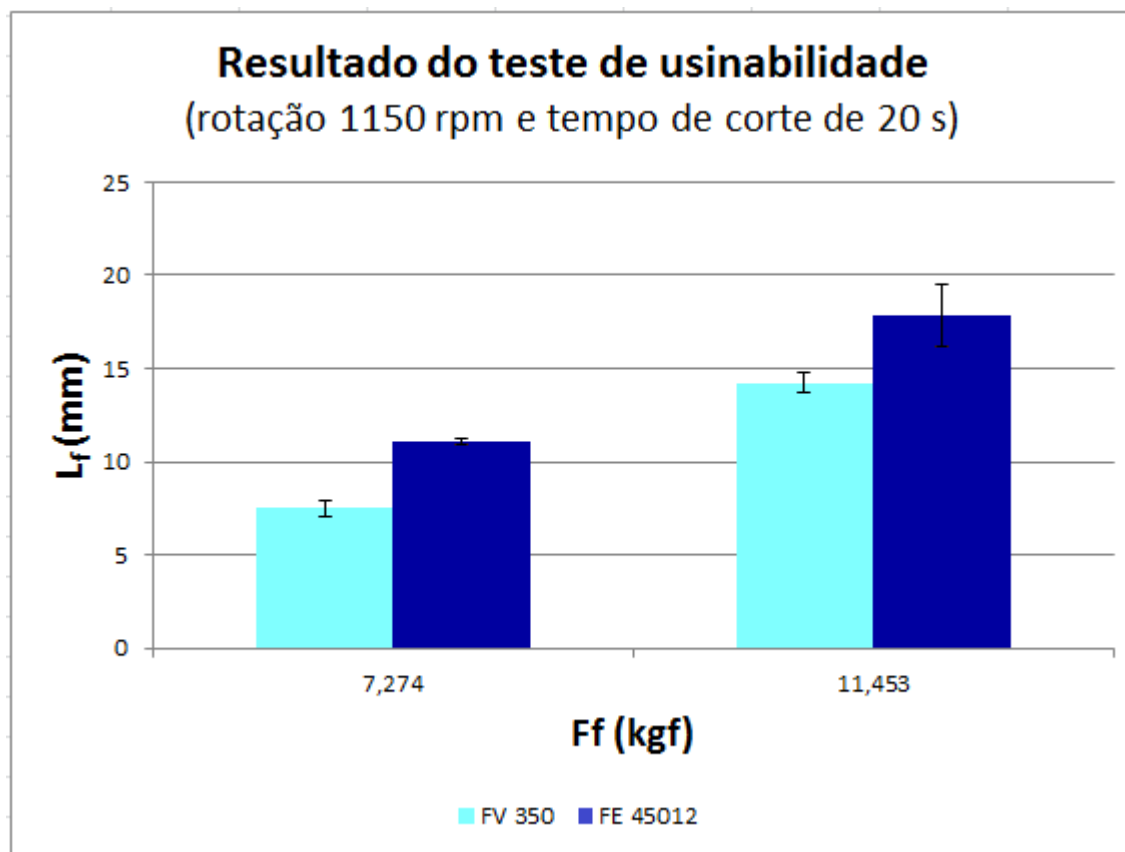


Figura 4.2 – Resultado do teste de usinabilidade de pressão constante para uma rotação de 1150 rpm e tempo de corte de 20 s.

De acordo com a Fig. 2.15, apresentada no capítulo 2 de revisão bibliográfica, esperava-se que o FV 350 apresentasse melhor usinabilidade (maior percurso de avanço) do que o FE 45012, pois como dito anteriormente, o ferro fundido vermicular possui uma usinabilidade intermediária entre o ferro fundido cinzento e o ferro fundido nodular (CHIAVERINI, 2002; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006; COMINELI, 2010). Comparativamente a dureza do FV 350 (174,9 HB) (NAVES, 2009) é levemente menor que a dureza do FE 45012 (com dureza aproximada de 180 HB) (DE SOUZA, 2014), além da forma da grafita (vermiculos) que tendem a contribuir como concentradores de tensão, facilitando a propagação da trinca, durante a formação do cavaco, mais rapidamente que uma grafita esferoidal, que no caso impediria a propagação da trinca,

umentando a resistência mecânica e ductilidade do material dificultando a usinagem (MACHADO; DA SILVA, 2004; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

Uma possível razão para essa inversão do resultado pode estar no fato de que a ferramenta cedida para a realização dos ensaios foi especificada para ser utilizada na usinagem de ferro fundido nodular, com dureza superior a 240 HB, ou seja, uma broca tipo H, (STEMMER, 1995; MOCELLIN, 2002; DORÉ, 2007; NAVES, 2009; BARBOSA, 2009) e para a usinagem de ferro fundido vermicular talvez o ideal devesse ser uma brocas tipo N, apresentando ângulo de hélice e ângulo de ponta de aproximadamente de 30° e 115°, respectivamente (STEMMER, 1995). Esse fato, portanto, pode ter conduzido a uma melhor usinabilidade do FE 45012 em comparação com o FV 350.

Os resultados de percurso de avanço do ferro fundido nodular FE 45012 se mostraram coerentes com os resultados encontrados por de Souza (2014), que obteve valores de L_f variando de 11 a 16 mm dependendo da região onde a furação foi executada (núcleo ou região intermediária) para um F_f de 10 kgf e rotação de 944 rpm. No entanto, houve uma discrepância com os resultados encontrados por Barbosa, 2009, que encontrou L_f de 4,9 mm para ensaios realizados com força de avanço de 7,426 kgf e N de 1107 rpm, podendo esse desvio de resultados estar relacionado às diferentes classes de ferros fundidos nodulares avaliadas. No trabalho de Barbosa (2009), foi avaliada a usinabilidade de um ferro fundido nodular perlítico (FE 70003) com dureza média de 264 HB, enquanto que no trabalho apresentado o FE 45015 apresenta uma dureza de aproximadamente 180 HB.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

A partir do projeto para fabricação de dispositivo para adaptação da furadeira para execução de ensaios de pressão constante e testes para validação do dispositivo, todos os objetivos deste trabalho foram alcançados, de forma que:

O dispositivo foi fabricado e adaptado na furadeira de coluna com êxito;

Os ensaios de teste de pressão constante executados em diferentes classes de ferros fundidos mostraram que o dispositivo atendeu à finalidade para o qual foi projetado.

O ferro fundido nodular (FE 45012) apresentou melhor usinabilidade que o ferro fundido vermicular (FV 350).

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS

ABNT, 1977, **NBR 6176. Brocas Helicoidais**.

CHIAVERINI, 2002, V. **“Aços e Ferros Fundidos”**, 7ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 599 p.

CIMM, <www.cimm.com.br> (acessado em 15/10/2014).

COMINELI, O. G., 2010, **“Fundamentos Tecnológicos da Fabricação do Aço”**, Livro-texto para aulas, 108 p.

DE SOUZA, J. A. G., 2014, **“Influência da Microestrutura na Usinabilidade do Ferro Fundido Nodular FE45012 em Diferentes Bitolas, Obtidos por Fundição Contínua”**, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 203 p

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L., 2006 **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 5. ed. São Paulo: Artliber Editora, 255 p.

DORÉ, C., 2007, **“Influência da Variação da Nodularidade na Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular”**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 112 p.

FERRARESI, D., 1970, **“Fundamentos da Usinagem dos Metais”**. Vol. 1, ed. Edgard Blücher, São Paulo, 751p.

FREIRE, J. M., 1976, **“Tecnologia mecânica: Máquinas de serrar e Furar”**, Vol.2, Ed. LTC S/A, Rio de Janeiro , 234 p.

GERLING, H., 1967, **“A Volta da Máquina Ferramenta”**, Vol. 3, Ed. Livro Ibero-Americano, Rio de Janeiro, 232 p.

GUESSER, W. L., 2002 **“Ferro Fundido com Grafita Compactada: Tecnologias Limpas Permitem o Desenvolvimento de Motores a Diesel com Melhor Desempenho”**. <www.tupy.com.br> (acessado em 12/04/2015).

DA SILVA, H. A., 2010, **“Influência do Ciclo de Furação na Usinabilidade do Ferro Fundido Cinzento GH190”**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 314 p.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B., 2009, **“Teoria da Usinagem dos Materiais”**, Editora Edgar Blucher, São Paulo – SP, 371 p.

MACHADO, Á. R.; DA SILVA, M. B., 2004 **Usinagem dos Metais**. Uberlândia: Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem - LEPUS - UFU. 257p. Apostila de Usinagem. 8º versão.

MOCELLIN, F., 2002, **“Avaliação da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular em Ensaios de Furação”**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 112 p.

NAVES, V. T. G., 2009, **“Estudo da Usinabilidade dos Ferros Fundidos Cinzentos Ligados (CrCuSn e CrCuSnMo) e Vermicular Classe 350 no Fresamento Frontal em HSM”**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

SANDVIK COROMANT, Catálogo 2008. **High Security in Aerospace and HRSA with CoroDrill® Delta-C**.

STEMMER, C. E., 1995, **“Ferramentas de Corte II”**, 2.ed. Florianópolis-SC: UFSC. 314 p.

SCHROETER, R. B.; STOETERAU, R. L.; WEINGAERTNER, W. L., 2004, **“Processos de Usinagem: Fabricação por Remoção de Material”**. (Apostila) Florianópolis. 180p.

Acesso em 20/05/2015. Disponível em:
<<https://solidboxprojectss.files.wordpress.com/2013/01/usinagem-apostila-toda-ilustrada-ufsc.pdf>>

TÖNSHOF, H. K.; SPINTIG, W.; KÖNIG, W.; NEISES, A., 1994, **Machining of Holes – Developments in Drilling Technology**. Annals of the CIRP. v. 43, pp. 551-561.

TRENT, E. M., WRIGHT, P. K., 2000, “**Metal Cutting**”, Butterworths, England, v 4, p 446.

TUPY S.A. <www.tupy.com.br> (Acessado em 25/03/2015).