



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU FACULDADE DE  
ENGENHARIA MECÂNICA – FEMEC GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA**

**LUCAS GONÇALVES SILVA**

**ESTUDO DE DESVIOS GEOMÉTRICOS CAUSADOS NA FURAÇÃO E  
ALARGAMENTO DO FERRO FUNDIDO VERMICULAR COM DIFERENTES  
VALORES DE SOBREMETAL**

**UBERLÂNDIA**

**MARÇO DE 2018**

**LUCAS GONÇALVES SILVA**

**ESTUDO DE DESVIOS GEOMÉTRICOS CAUSADOS NA FURAÇÃO E  
ALARGAMENTO DO FERRO FUNDIDO VERMICULAR COM DIFERENTES  
VALORES DE SOBREMETAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

**Orientador:** Prof. Dr. Wisley Falco Sales

**UBERLÂNDIA**

**MARÇO DE 2018**

## AGRADECIMENTOS

‘Bem-aventurado o homem que teme ao senhor’. A Deus primeiramente por ter me dado a oportunidade de estudar numa das melhores universidades do Brasil, por ter me abençoado em toda essa caminhada, me levando a conclusão deste trabalho, e ter me dado força para vencer.

A meus pais, por não terem medido esforços, e fazendo com que eu tivesse oportunidades que eles nunca tiveram, por terem sido o suporte ao longo de toda minha vida e ter feito o possível e o impossível durante toda minha educação, e além do mais por serem meus exemplos, ao meu irmão igualmente por ter me ajudado sempre que possível. Uma dedicatória especial ao meu avô “Seu Sebastião”, que hoje aos 95 anos sempre me apoiou a estudar, mesmo ele não tendo essa oportunidade. Um grande homem a quem amo muito.

Aos meus amigos, por me ajudar nos momentos mais difíceis.

À Universidade Federal de Uberlândia, em especial à Faculdade de Engenharia Mecânica, pela oportunidade de realizar este curso. Um agradecimento especial vai à Alcione dos Reis, então na época aluno de mestrado da FEMEC e que me ajudou em todas as etapas, inclusive na execução dos testes.

Devo também agradecer ao CNPq, CAPES e FAPEMIG, pelo apoio financeiro. De maneira especial agradeço ainda o Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – CNPq/UFU, Projeto nº. CNPQ2013-ENG046 pela bolsa concedida a mim. Os técnicos da Oficina Mecânica também merecem os agradecimentos pelo apoio prestado durante a realização dos ensaios de usinagem em geral.

Ao orientador, Professor Wisley por toda orientação passada neste período, além da questão técnica e científica se mostrou alguém muito sensato e humano. Ao LEPU (laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem) e todo o pessoal (Professor Rosemar, Kapa, os colegas de IC e etc.)

.

## RESUMO

A busca por maior competitividade, menos prejuízos e garantia de lucro tem levado a indústria metal mecânica investir mais em pesquisas, métodos para redução de custos e otimização dos processos produtivos, principalmente na fabricação de produtos metálicos. Neste sentido, nos processos de usinagem, mais especificamente na produção de furos, qualquer benefício proporcionado, seja ele no aumento da vida da ferramenta, na melhoria do acabamento, na eficiência de remoção de cavaco, na redução do tempo de usinagem, ou na melhoria da qualidade dimensional e geométrica do furo será de grande importância. Este trabalho visou investigar a qualidade de furos cilíndricos de 10 mm de diâmetro que foram usinados pelo processo de furação com brocas especiais de metal duro. Ensaios de usinagem também foram realizados com alargadores de canal reto de metal duro para verificar a possibilidade de substituição destes na produção de furos com tolerâncias estreitas. O alargamento foi precedido pelo processo de furação com brocas helicoidais inteiriças de metal duro com diâmetro de 9,5 e 9,7mm. O material usinado foi o ferro fundido vermicular FV450. Os ensaios foram realizados a seco e foi adotado o número de furos igual a 25 para parada dos testes. A rugosidade superficial, parâmetro Ra, e o desvio de cilindridade foram utilizados como os parâmetros de saída para avaliar o desempenho das brocas especiais. Os resultados mostraram que o desvio de cilindridade obtido na usinagem com brocas especiais foi ligeiramente maior que aqueles gerados pelos alargadores. Em relação à rugosidade dos furos, os valores foram satisfatórios quando foram empregadas as brocas especiais, indicando que elas podem ser alternativa em relação a alargadores para a produção de furos com tolerâncias mais estreitas nas condições investigadas neste trabalho.

**Palavras chave:** Furação, Alargamento, Brocas especiais, Ferro Fundido Vermicular FV450, , Acabamento.

## ABSTRACT

The seek for greater competitiveness, reduction in losses and better profit guarantee has led the metal work industry to invest more money in research and methods to reduce costs and attempt of increase productivity efficiency, mainly in manufacture of metal components. Into this context, specifically in machining sector for production of holes, any benefit, whether on the increase of tool life, efficiency of chip removal process, reducing the machining time or improvement on dimensional and geometric quality (surface finish) of holes, would be significant achievement. This work aims to investigate the quality 10 mm diameter cylindrical holes performed by drilling process with special designed carbide drills in a compacted graphite cast iron. Machining trials were also carried out with straight flute carbide reamers for comparison in terms of production of tight tolerances holes. For reaming process, holes were previously machined with solid carbide twist drills with diameters of 9.5 and 9.7mm. Rejection criterion was based on the number of 25 holes for conditions investigated. All experimental trials were carried out in dry condition machining. The surface roughness (Ra parameter) and roundness deviation were used as output parameters to evaluate the performance of special designed drills. The results showed that the roundness deviation obtained on machining with special drills was slightly higher than those generate by the reamers. Regarding the roughness values, it is observed that they were satisfactory when machined with special drills, thereby indicating that special drills can be an alternative tool to reamers for the production of holes with tight tolerances under the conditions investigated in this work.

Key words: Drilling, Reaming, Surface Quality, Special drills, Cast Iron FV450.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Broca Helicoidal principais superficies e arestas (MACHADO et.al., 2009).....	5
Figura 3.2: Dados de brocas helicoidais com informações segundo o ângulo de ponta (GUHRING, 2012). .....	9
Figura 3.3: Sistema de ângulos em alargadores (SKF (1987) e GUHRING, (2002)). .....	11
Figura 3.4: Nomenclatura de alargadores (SKF, (1987) apud BORILLE, (2005)).....	12
Figura 3.5: Dispositivo de fixação das sedes de válvulas: a) montado, b) desmontado na mesa do .....	14
Figura 3.6: Detalhes de ponta de broca helicoidal com geometria modificada (Devries and Croscheck, 1988).....	15
Figura 3.7: Diferentes da geometria de broca especial com superfície de folga inclinada (adaptado de Wang e Zang, 2008).....	16
Figura 3.9: Rugosidade média ( $R_a$ ).....	19
Figura 3.10: Rugosidade média $R_z$ (Adaptado de Agostinho 1977).....	19
Figura 3.11: Rugosidade Máxima ( $R_t$ ) (Adaptado de Agostinho 1977). .....	20
Figura 3.12: Representação gráfica da medição do desvio de cilíndricidade medido em uma máquina de medir desvios de forma (circularímetro) modelo Talyrond 131 fabricado pela Taylor Hobson. ....	21
Figura 4.1: Fluxograma das etapas do procedimento experimental. ....	22
Figura 4.2: Fluxograma de variáveis de entrada e saída dos testes. ....	23
Figura 4.3: Matriz perlítica do ferro fundido vermicular 500 vezes de aumento (Junior and Guess 2011). ....	25
Figura 4.4: Matriz perlítica do ferro fundido vermicular 1000 vezes de aumento (Junior and Guess 2011). ....	25
Figura 4.5: Vista em perspectiva do blanque e sentido da sequência de furação .....	26
Figura 4.6: Vistas ortogonais superior e lateral em corte do Blanque.....	26
Figura 4.7: Centro de usinagem vertical CNC que foi utilizado nos testes de furação e alargamento e furação com brocas especiais (REIS A. 2014).....	27
Figura 4.8: Mandril Hidromecânico Sandvik. ....	28
Figura 4.9: Ferramentas de metal duro utilizadas: (a) Broca de $\varnothing 9,5$ mm; (b) Broca de $\varnothing 9,7$ mm; (c) Alargador de $\varnothing 10$ mm; (d) Broca especial de $\varnothing 10$ mm (REIS A. 2014). ....	28
Figura 4.10: Desenho esquemático brocas helicoidais convencionais que foram utilizadas antes .....	29
Figura 4.11: Geometria do alargador cilíndrico de 10 mm de diâmetro: a) vista frontal, b) vista de .....	29
Figura 4.12: Desenho esquemático da broca especial de metal duro (Iscar, 2013).....	30
Figura 4.13: Micrografia das brocas Especiais (Iscar, 2013). ....	30
Figura 4.14: Sistema de Fixação do material na mesa do centro de usinagem (REIS A. 2014).....	31
Figura 4.15: Aparato para medição do batimento das ferramentas (REIS A. 2014). ....	32
Figura 4.16: Suporte para apoio do transdutor-rugosímetro.....	33
Figura 4.17: Máquina de medição a três coordenadas do tipo ponte móvel modelo BR443. ...	35

Figura 5.1: Desvio dimensional dos diâmetros dos furos após processo alargamento cilíndrico (diâmetro de 10 mm) em função do diâmetro deixado pelas brocas de diâmetro 9,5 mm (sobremetal 0,5mm) e diâmetro 9,7mm (sobremetal igual a 0,3mm) e broca especial de diâmetro 10 mm (REIS A. 2014). .....	36
Figura 5.2: Desvio de forma (cilindricidade) dos furos após alargamento em função do diâmetro.....	38
Figura 5.4: Valores de rugosidade superficial Ra dos furos após alargamento em função do diâmetro deixado pelas brocas de diâmetro 9,5 mm (sobremetal 0,5mm) e diâmetro 9,7 mm (sobremetal igual a 0,3mm) e após broca especial.em função do número do furo para as diferentes ferramentas.....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 : Classificação quanto ao ângulo de ponta (Adaptado Senai 2010).....	8
Tabela 4.1: Parâmetros de corte adotados nos testes (REIS A. 2014).....	24
Tabela 4.2: Comparação das propriedades do CGI (Kress, 2002). ....	25
Tabela 4.3: Descrição das características das brocas especiais (Iscar, 2013).....	30
Tabela 4.4: Descrição e especificação das ferramentas de corte utilizadas.....	31
Tabela 4.5 Valores de batimento radial medidos para as ferramentas (REIS A. 2014). ....	32
Tabela 5.1: Avaliação dos Custos de fabricação comparado com a qualidade de trabalho proporcionada (adaptado de REIS A 2014).....	40

## LISTA DE SIMBOLOS

a.C - antes de Cristo

CBN - Nitreto de boro cúbico

CGI – Ferro Fundido Vermicular (sigla do inglês CGI compacted graphite Iron)

GH – Ferro Fundido Cinzento (sigla do inglês)

IT – Intervalo de tolerância de trabalho

m/min – Metros por minutos

mm - milímetros

PCD - Diamante sintético

Ra – Parâmetro de rugosidade

Rpm – rotações por minuto

Rt – Parâmetro de rugosidade

Rz – Parâmetro de rugosidade

Vc – Velocidade de Corte

µm – micrometro

CNC – Comando Numérico Computadorizado

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVOS.....	3
3.	REVISAO BIBLIOGAFICA.....	4
3.1	PROCESSO DE FABRICAÇÃO NA OBTENÇÃO DE FUROS .....	4
3.2	PROCESSO DE FURAÇÃO COM BROCAS HELICOIDAIS .....	4
3.3	PROCESSO DE ALARGAMENTO .....	9
3.4	FURAÇÃO COM BROCAS ESPECIAIS .....	14
3.5	DESVIOS DE FORMA .....	17
3.5.1	RUGOSIDADE .....	18
3.5.2	DESIVO DE CILINDRICIDADE .....	20
4.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	22
4.1	Material da Peça.....	24
4.2	Maquina ferramenta.....	27
4.3	Ferramentas de Corte .....	28
4.4	Medição dos desvios .....	32
4.4.1	Medição da rugosidade.....	32
4.4.2	Medição do desvio de cilindridade e diâmetro .....	34
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
6.	CONCLUSÕES.....	41
7.	REFERÊNCIAS .....	43

## 1. INTRODUÇÃO

A produção acelerada no contexto da metal-mecânica faz crescer o interesse das empresas em tecnologia e modelos de produção que tragam confiança de mercado, o que torna atualmente comum empresas do ramo mostrarem que este ou aquele produto são feitos a partir de materiais novos, este fato é muito comum na indústria automobilística, a cada ano ou mesmo a cada novo modelo empresas vêm divulgando o material (isto é mais evidenciado quando o mesmo é inovador) ou processo afim de transmitir confiança e credibilidade para o cliente. E neste cenário estão inseridos os processos de fabricação, principalmente aqueles de usinagem, em grande parte representados pelos processos de furação.

Ferraresi (2003) afirma que grande parte das peças de qualquer tipo de indústria tem pelo menos um furo, e somente uma parte muito pequena dessas peças já vem com o furo pronto do processo de obtenção da peça bruta (fundição, forjamento, etc.), processos esses que para Chiaverini (1986) na maioria das vezes não conferem a qualidade desejada ao furo, sendo necessárias processos posteriores, sendo os mais comuns os processos de furação e de alargamento.

A produção de veículos leves representa aproximadamente 96,15% da produção total de veículos (Anfavea, 2017)., o bloco de um veículo popular de passeio tem aproximadamente 70 furos, e grande parte é produzida pelos processos de furação. Dado ao elevado número de 10.000 carros produzidos diariamente no Brasil, seriam 3.650.000 blocos produzidos anualmente, se considerar apenas um bloco de motor, seria já conveniente desenvolver estudos que visem a melhoria do processo de obtenção de furos, principalmente aqueles com tolerâncias mais estreitas.

Guessser et al. (2004), já afirmava que o futuro dos motores para carros à passeio passa pelo Ferro Fundido Vermicular, porque a cada dia é necessária uma redução de peso, um aumento da potência do motor, e o CGI leva vantagem sobre o alumínio por exemplo devido à menor resistência mecânica a altas temperaturas. Além disso o CGI é atualmente utilizado para a fabricação de motores de carros de alto rendimento como o BMW V8 e o Audi V8.

Segundo Santos e Sales (2007), devido ao modo de retirada de material da peça que envolve cisalhamento, as peças usinadas apresentam superfícies danificadas. Para as indústrias aeronáutica e automobilística, isso é uma agravante visto que as peças têm particularidades que tornam a fabricação e o dimensionamento difíceis, além de exigir um alto índice de confiabilidade. Sendo assim os principais nomes do mercado de ferramentas de corte, investem pesado em pesquisa e desenvolvimento para melhorar ferramentas, como brocas e alargadores.

Os fabricantes de ferramentas de corte para furação que produzem brocas e alargadores tem buscado a constante melhoria das ferramentas a fim de oferecer soluções para a obtenção de furos cilíndricos com tolerâncias estreitas, sejam promovendo pequenas mudanças de geometria das brocas e/ou alargadores, investigando a aplicação de diversas camadas de revestimento, desenvolvendo modelos numéricos para analisar meios de facilitar a saída do cavaco. Um exemplo é o desenvolvimento de alargadores com 100 mm de diâmetro que até a pouco tempo não era possível.

O ferro fundido vermicular é amplamente utilizado no mundo automobilístico, especificamente em carros de alto desempenho, porém com os avanços e demandas por energias mais limpas, fica a questão se o mesmo continuará sendo utilizado.

Este trabalho foi desenvolvido com base em um projeto do CNPq- Edital MCT/CNPq Nº 014/2011 – intitulado Estudo comparativo sobre produção de furos com elevada exatidão somente por furação e furação seguida de alargamento, que foi coordenado pelo prof. Dr. Rosemar Batista da Silva, quem também foi o orientador em nível de iniciação científica e cujos resultados foram obtidos, CNPq/UFU, Projeto nº. CNPQ2013-ENG046. A metodologia e parte dos resultados apresentados neste de projeto de fim de curso foi também compartilhada da dissertação de Mestrado de Alcione dos Reis (também orientado pelo prof. Rosemar defendida em abril de 2014), intitulada Estudo do emprego de broca especial em substituição ao alargador na produção de furos em ferro fundido vermicular, já que ambos alunos de IC e mestrando trabalharam juntos neste projeto sob a orientação do prof. Rosemar.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo principal foi contextualizar e exemplificar a busca por materiais e processos que visem inovações nos processos de fabricação, por meio de uma revisão bibliográfica e o uso de dados. Além de contextualizar esse relatório teve o intuito de exemplificar essa busca. Para essa finalidade, foram utilizados parte de testes produzidos pelo próprio autor anteriormente, durante o período de dois anos de iniciação científica do autor.

Grandes contribuições foram dadas na revisão bibliográfica, graças o aspecto prático e teórico que foi adquirido pelo aluno durante o intercambio no exterior na área de fabricação no IFMA (Instituto Francês de Mecânica Avançada), o mesmo pôde utilizar de artifícios mais sofisticados de comparação de resultados, para avaliar o desempenho da broca especial em relação ao processo de furação com broca convencional seguida de alargamento na produção de furos cilíndricos. A avaliação do desempenho foi em termos de desvios geométricos (rugosidade e cilíndricidade) dos furos, desvio dimensional e qualidade do furo.

O emprego do ferro fundido vermicular como material de teste, foi visando, dentre outros aspectos, a produção de dados que possam ser aplicados na indústria metal-mecânica, na produção de furos com tolerâncias mais estreitas, visto que este é extensamente usado no mundo automobilístico. Outro aspecto interessante e que pode instigar mais investigações e trabalhos é se o Ferro Fundido Vermicular, conseguirá acompanhar as mudanças no mundo automobilístico.

### **3. REVISAO BIBLIOGRAFICA**

#### **3.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO NA OBTENÇÃO DE FUROS**

Apesar dos grandes avanços tecnológicos nos últimos séculos, obter furos cilíndricos com uma estreita faixa de tolerância é uma tarefa ainda não trivial. Mesmo com a escalada da ciência dos materiais e a grande pesquisa por parte dos fabricantes, o meio mais simples de ser obter economicamente e para efeitos práticos, furos de boa tolerância é aplicação da furação com brocas helicoidais e posteriormente um outro processo como o alargamento se necessário.

#### **3.2 PROCESSO DE FURAÇÃO COM BROCAS HELICOIDAIS**

O processo mecânico de usinagem para obtenção de superfície cilíndrica interna coaxial com eixo de giro do movimento de corte da ferramenta denomina-se furação. A furação é uma das mais antigas operações de usinagem que se tem registro. Há evidências sobre uma broca egípcia do ano de 4.000 a.C. que se constituía de uma haste de madeira e uma ponta de sílex ou outra espécie de pedra dura. Hieróglifos datados de 2700 a.C. apresentam instruções para obtenção de furos (TONSHOLF apud, YAMADA 2010).

A necessidade de superfícies cilíndricas internas fez com que em 1820 Moses Twist Drill and Machine Company inventassem a broca helicoidal (figura 3.1). Mesmo após longo tempo a ferramenta é a mais utilizada na fabricação de furos cilíndricos, a mesma geometria segue se desenvolvendo com tempo, pequenas modificações em sua estrutura básica com o aparecimento de novos materiais e necessidades como, por exemplo, canais internos para lubri-refrigeração.

Furos podem ser obtidos por processos de conformação (chapas finas), por fundição ou forjamento ou ainda pelos processos usinagem (furação, alargamento e até mesmo furação com fresa). Aqueles gerados por conformação e fundição em geral são de baixa qualidade, ou seja, são furos que na maioria das vezes não apresentam estreitas faixas de desvios, seja este de forma ou desvio geométrico; já os furos produzidos por processos de usinagem apresentam

características dimensionais e geométricas de melhor qualidade, desde que ocorra um controle rigoroso do processo.

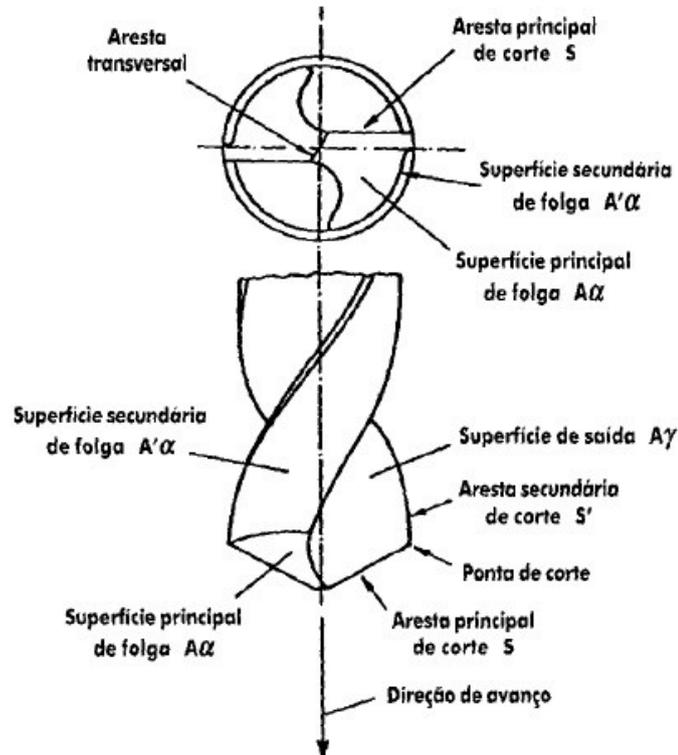


Figura 3.1: Broca Helicoidal principais superfícies e arestas (MACHADO et.al., 2009).

Apesar de sua longa existência e importância, tal processo recebeu poucos avanços até alguns anos atrás. As ferramentas de outros tipos de processo, como torneamento e fresamento, progrediram rapidamente com a introdução de novos materiais, como o metal duro, cerâmicas, nitreto de boro cúbico (CBN) e diamante sintético (PCD). Na furação, no entanto, a ferramenta ainda mais utilizada é a broca helicoidal de aço-rápido (Adaptado de Diniz et al., 2010).

Esse aparente "atraso" deve-se a muitos fatores, o principal é o diâmetro dos furos, por exemplo, Machado et al, (2009) citam que uma broca de 10mm de diâmetro (que é um diâmetro bem comum na indústria), para ser utilizada de modo adequado com velocidades compatíveis com o metal duro exigiria uma  $V_c$  em torno de 200m/min, o que implica em uma rotação de aproximadamente 6400rpm, valor este muito alto para boa parte das máquinas ferramentas de uso comum na indústria. O escoamento do cavaco também é um percalço para o processo, pois o contato do mesmo com a ferramenta depois de desagregado da peça causa geração de calor e compromete a qualidade do furo.

O processo de furação apresenta vários agravantes como já citados, e dentre eles merecem ser citados: a velocidade com que a ferramenta atinge a peça (numa trajetória retilínea e coincidente) ou vice-versa (peça atinge ferramenta), varia do máximo na quina (no caso de uma broca helicoidal) a zero no eixo da ferramenta, de forma que na região central o material não é usinado, mas sim conformado ou extrudado pela aresta transversal de corte. E estes agravantes levam fabricantes de ferramentas a investigarem e proporem soluções. Um exemplo é broca com microestruturas diferentes no centro e na periferia da broca para atender melhor as diferentes condições que as mesmas partes sofrem durante a operação de usinagem (Sandvik, 2010). Além disso, na maioria dos casos o processo de furação é executado sem o devido controle, pela falta de capacitação adequada.

Machado et al, (2009) citam que por ser interno, o processo de furação apresenta dificuldades maiores inerentes, principalmente com relação à formação do cavaco, geração de calor e qualidade da superfície usinada. A saída mais conveniente para estes é o uso de fluidos de corte, mas com a crescente preocupação ambiental sobre o descarte dos fluidos de corte; aumenta ainda mais a exigência de que ferramentas de corte no presente caso brocas tenham elevado rendimento, ou ainda técnicas que minimizem a utilização dos fluidos de corte.

Uma técnica que tem sido encorajadora neste sentido é a Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), que utiliza pequenos volumes de fluidos, normalmente entre 10 a 200 ml/h, em comparação a técnica convencional de aplicação de fluido em jorro que emprega fluidos em vazões entre 5 e 15 l/min (300.000 a 900.000 ml/h). Braga et al, (2002), ao empregar brocas de metal duro classe k10 na furação de liga de Alumínio-Silício hipoeutética (7,11% Silício) com a técnica MQL, obtiveram bons resultados em relação aos esforços de corte e à qualidade dos furos.

Os furos produzidos pelo processo de furação apresentam características dimensionais geralmente com qualidade de trabalho IT10-IT12, desde que ocorra um controle rigoroso do processo, e quando as exigências são maiores o processo de alargamento é necessário para obter furos com qualidade de trabalho variando entre IT7 e IT10. De acordo com o Metals Handbook (1889), o processo de furação permite obter furos, na pior das hipóteses, com qualidade de trabalho IT14, enquanto que o fabricante de ferramentas OSG (2010) dispõe comercialmente de brocas que produzem furos com qualidade de trabalho IT9-IT10, quando obedecidas as recomendações de uso.

A busca por redução de custos e tempo de produção, o desenvolvimento da usinagem, das máquinas-ferramenta e das ferramentas de corte é inevitável, com isso novas tecnologias surgiram e surgirão para que o processo obtenha o maior rendimento possível, a seguir são apresentados os tipos de brocas disponíveis e mais comuns na usinagem na indústria, segundo Sandvik (2012).

Apesar dos vários tipos de brocas para diferentes aplicações em engenharia, a broca mais utilizada ainda é a do tipo helicoidal. A geometria bem definida da ferramenta faz com que ela acompanhe a evolução do processo, mesmo que a geometria continue aproximadamente a mesma. Além disso, a evolução e descoberta de novos materiais para ferramentas de corte vem aumentando o rendimento desta classe de brocas, para este trabalho todas as brocas utilizadas foram brocas helicoidais.

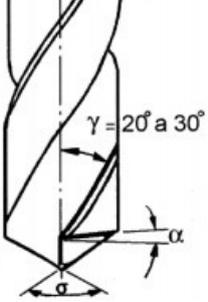
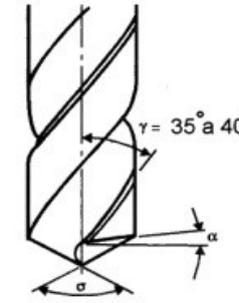
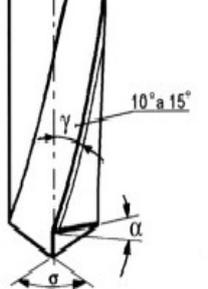
Uma das desvantagens da furação com brocas helicoidais é a sua imprecisão, a tolerância geométrica deste processo é sofrível e a dimensional normalmente é da ordem de IT11, (mas há relatos na literatura de casos especiais de IT8) e o comprimento do furo é limitado não podendo superar a relação  $L/D=3$ , sob o risco de ocorrer excentricidade. Portanto, quando é necessária a confecção de furos com tolerâncias mais estreitas, normalmente se emprega operações posteriores como o alargamento, brochamento, torneamento interno, mandrilamento, retificação interna; para furos com diâmetro até 20 mm o mais adequado é o alargamento (Diniz 2010).

As brocas helicoidais de forma geral possuem a mesma geometria, variando alguns parâmetros como quantidade de canais, tamanho da haste entre outros, número de entradas, ângulo de ponta, forma de afiação, aresta transversal, com ou sem canal de passagem de fluido. Uma atenção especial é voltada para a classificação das brocas quanto ao ângulo de ponta, pois é um relevante quesito na seleção da melhor broca a ser utilizada no processo de furação, os mesmos variam de  $118^\circ$  a  $140^\circ$ . Mas brocas com ângulos entre  $90^\circ$  e  $118^\circ$  também são comuns. Para Stemmer (1995), ângulos menores que  $118^\circ$  as arestas tornam-se convexas, produzindo vibrações na usinagem, a tabela 3.1 a seguir mostra a classificação quanto ao ângulo de ponta e os materiais mais indicados para serem usinados pelas mesmas.

A classificação das brocas de acordo com o ângulo de ponta é comum, na Figura 3.2 a imagem de um catálogo traz informação do ângulo de ponta, além disso o fabricante informa

sentido de corte, tolerância do diâmetro nominal da broca, material e outros parâmetros característicos da ferramenta, que geralmente são apresentados por outros fabricantes também.

Tabela 3.1 : Classificação quanto ao ângulo de ponta (Adaptado Senai 2010).

<p>Broca tipo N</p> <p>características (ângulo/aplicação).</p>		<p>130°</p> <p>118°</p>	<p>Aço de alto carbono.</p> <p>Aço macio, ferro fundido, latão e níquel.</p>
<p>Broca tipo W</p> <p>características (ângulo/aplicação).</p>		<p>130°</p>	<p>Alumínio, zinco, cobre, madeira, plástico.</p>
<p>Broca tipo H</p> <p>características (ângulo/aplicação).</p>		<p>80°</p> <p>118°</p> <p>140°</p>	<p>Materiais prensados, ebonite, náilon, PVC, mármore, granito.</p> <p>Ferro fundido duro, latão, bronze, celeron, baquelite.</p> <p>Aço de alta liga.</p>

Nr. do artigo	205	206	207	208	209	210
	Norma	DIN 338				
Material de corte	HSS					
Superfície						
Tipo	N	H	W	N	H	W
Sentido de corte	à direita	à direita	à direita	à esquerda	à esquerda	à esquerda
Tolerância do diâmetro	h8	h8	h8	h8	h8	h8
Grupo de desconto	130	134	134	134	134	138
Informações sobre produtos na página	144	144	144	144	144	145

Figura 3.2: Dados de brocas helicoidais com informações segundo o ângulo de ponta (GUHRING, 2012).

### 3.3 PROCESSO DE ALARGAMENTO

O processo de furação com brocas helicoidais na maioria dos casos não possibilita a fabricação de furos com estreitas faixas de desvios sejam geométricos e/ou dimensionais, de forma que processos posteriores, como o alargamento são empregados.

O sistema de tolerâncias para peças mecânicas é regulamentado pela norma ABNT/ISO (NBR 6158) e são indicadas pelas letras "I" e "T"; a primeira letra da sigla deriva de ISO, a segunda de tolerância, o que em essência indica a qualidade da peça usinada verificando se a mesma está apta a desempenhar o que especificado em projeto.

O processo de furação atualmente é capaz de produzir furos com qualidade IT8, mas dependerá da geometria da broca, das condições de corte e do tipo de máquina e da fixação da peça. O processo de alargamento é geralmente empregado na produção de furos de pequenos diâmetros (menores que 20 mm) quando se desejam tolerâncias mais estreitas, na faixa de IT7 (Diniz, 2010). Mas recentemente foram disponibilizados para comércio alargadores com 100 mm de diâmetro (OSG, 2010).

O processo de alargamento é definido como um tipo de furação que utiliza uma ferramenta de alargar para produzir pequenas espessuras de cavacos e criar superfícies internas com alta qualidade dimensional e de forma (DIN 8589 apud WEINERT et al, 1998).

O resultado deste processo depende de vários fatores de extrema importância, quando da determinação e da construção da ferramenta: aplicação manual ou mecânica, profundidade e qualidade do furo, furo passante ou não passante, espessura da parede da peça, furo interrompido, estado do furo pré-trabalhado, acabamento da superfície, dimensões e tolerâncias do furo, resistência mecânica e usinabilidade do material (GABOR, 1983).

A cinemática do processo de alargamento é bem parecida com o processo de furação, o que mais diferencia são os esforços na usinagem, enquanto temos na furação um processo essencialmente de desbaste, o alargamento é usado como processo de acabamento, gerando esforços de menores amplitudes e intensidades, isto para garantir que todas as dimensões sejam melhores que o processo de furação. Pauksch et al, (2008) afirmam que o processo de alargamento tem o objetivo principal de incrementar qualidade e precisão do pré-furo realizado com o processo de furação.

As ferramentas de alargar com múltiplas arestas de corte, contém um único conjunto de dentes em contato com a peça durante a usinagem. Esse tipo de alargador é composto pelas arestas principais de corte e as arestas laterais, as últimas arestas citadas são responsáveis pelo alisamento do furo, nas quais se apoiam contra a parede do furo.

A aresta lateral ou secundária conforme mostra a figura 3.3 deve conter duas particularidades: ser afiada com um maior ângulo de folga, e ter uma superfície larga para guiar o alargador. Esta relação pode restringir e reduzir as velocidades de corte dos alargadores com várias arestas de corte (Weinert et al, 1998).

Os alargadores são geralmente de forma cilíndrica ou cônica, que por meio de movimento rotativo de corte e de avanço axial usinam os furos deixando-os mais precisos. Os alargadores convencionais (com múltiplas arestas de corte) apresentam arestas paralelas, com hélice à direita ou à esquerda, também de forma helicoidal (Ferraresi, 2003).

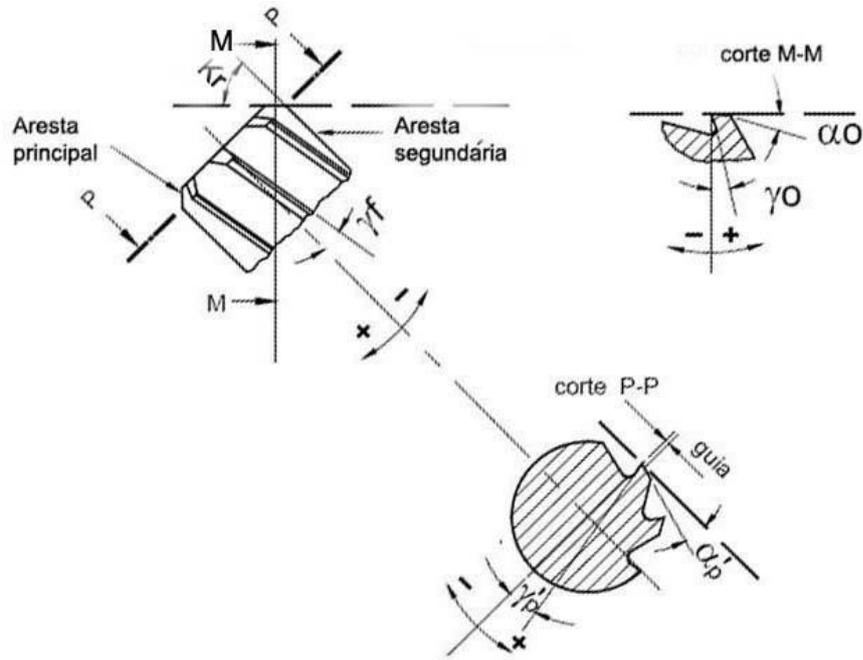


Figura 3.3: Sistema de ângulos em alargadores (SKF (1987) e GUHRING, (2002)).

Segundo Chiaverini (1986), alargadores são brocas que tem por objetivo acabar os furos, nas dimensões e acabamentos finais, e os mesmo não "fazem", ou seja, abrem o furo original.

A qualidade dos resultados do processo é notória e Dos Santos (2004) conseguiu valores de rugosidade  $R_a$  até  $0,58 \mu\text{m}$ , de desvio de circularidade até  $0,30 \mu\text{m}$  e de desvio de cilindridade até  $1,1 \mu\text{m}$  no alargamento de uma liga AISI. Bezerra et al, (2001) também encontraram bons resultados para os desvios de circularidade e cilindridade no processo de alargamento de alumínio.

Os alargadores se diferem em monocortante e multicortante, sendo que o número das múltiplas arestas de corte é normalmente par, e os dentes não são simétricos em algumas posições a fim de evitar vibrações. Já quanto à finalidade, eles se dividem em alargadores de desbaste e alargadores de acabamento (Ferraresi, 2003). Eles podem também ser classificados também em função da geometria das suas hastes. A seguir são mostrados alguns exemplos de classificação de alargadores.

- Alargadores de desbaste: Os furos obtidos com brocas, ou furos obtidos por fundição, são alargados com alargadores de desbaste, com a finalidade de melhorar a tolerância do furo, quanto a sua forma, dimensões ou permitir uma perpendicularidade do furo em relação a parede, melhor acabamento, ou mais, permitir a combinação de todos esses fatores.
- Alargadores de acabamento: Enquanto os alargadores de desbastes apresentam de 3 a 4 arestas cortantes, os alargadores de acabamento apresentam um número maior de arestas de corte, o qual varia com o diâmetro, tipo de alargador e material da peça de trabalho. O motivo do número maior de arestas de corte é diminuir as forças nas mesmas melhorando assim o acabamento do furo.
- Alargadores de haste cônica (figura 3.4) são os mais utilizados, os mesmos são padronizados pela ABNT – PB 297 (DIN344), em diâmetros que variam de 5 a 30 mm.

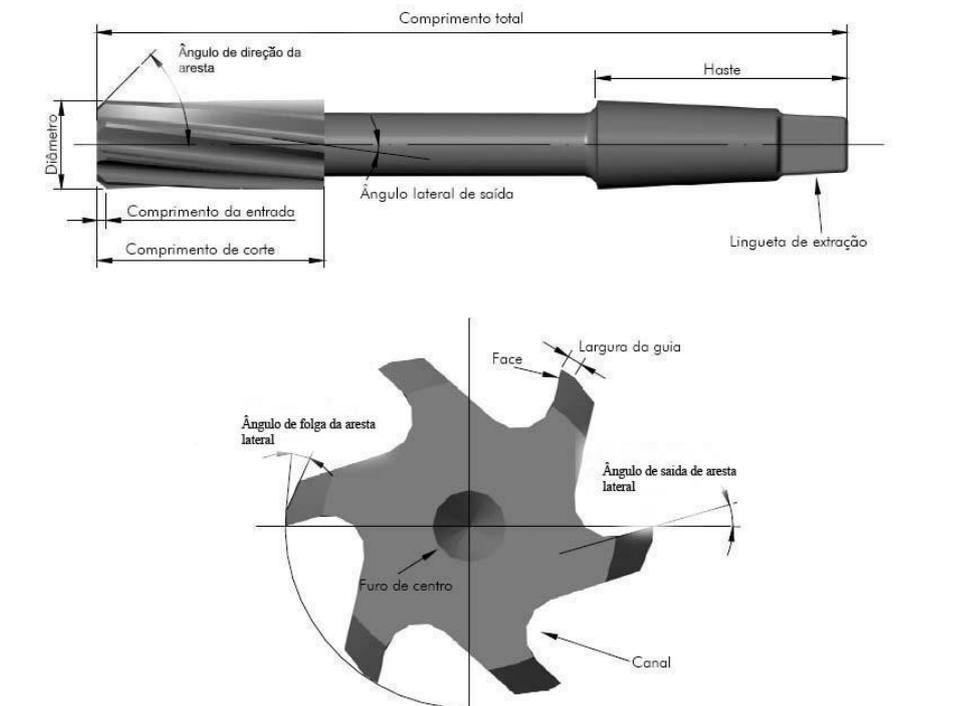


Figura 3.4: Nomenclatura de alargadores (SKF, (1987) apud BORILLE, (2005))

As arestas dos alargadores multicortantes desenvolvem papel fundamental na usinagem, um número maior das mesmas representa maior distribuição de tensões e forças, na contramão o aumento exacerbado dificulta a saída do cavaco, fazendo assim que ocorra um racionamento do número de arestas levando em consideração este último fato.

A usinagem é dividida em corte nas arestas principais e alisamento nas arestas secundárias ou guias, ou seja, as guias são as maiores responsáveis pelo acabamento superficial dos furos.

Segundo Weinert et al, (1998), alguns cuidados devem ser tomados para obter resultados satisfatórios no alargamento:

- o primeiro contato da ferramenta com o pré-furo deve ser igual entre todas as arestas de corte;
- desalinhamento do eixo da ferramenta de pré-furação;
- erro de batimento do alargador;
- irregularidades na aresta de corte;
- desvios de forma no pré-furo;
- problemas na fixação do alargador no fuso da máquina-ferramenta.

Assim como nas brocas, o aço rápido e o metal duro são normalmente os materiais mais utilizados na fabricação de alargadores para a usinagem de aços e ferros fundidos. Machado et. al. (2009) afirmam que o primeiro grande avanço na usinagem se deu no final do século XIX quando Taylor e White desenvolveram o primeiro aço rápido (HSS); as velocidades de corte subiram da ordem de 3 a 5 pra 30-35 m/min, o segundo quando Schroter desenvolveu na Alemanha o primeiro metal duro (MD), onde as velocidades atingiram 250-300 m/min.

Sabe-se que é ampla a aplicação do alargamento na indústria manufatureira, Yamada (2010) cita a aplicação do alargamento em válvulas hidráulicas utilizadas no trem de pouso de uma aeronave, furos estes com tolerância H7, algumas aplicações são comumente encontradas como: cabeçote de moto de combustão interna, sede de válvula (figura 3.5), tucho hidráulico, biela e bomba de óleo, linha da árvore do virabrequim.

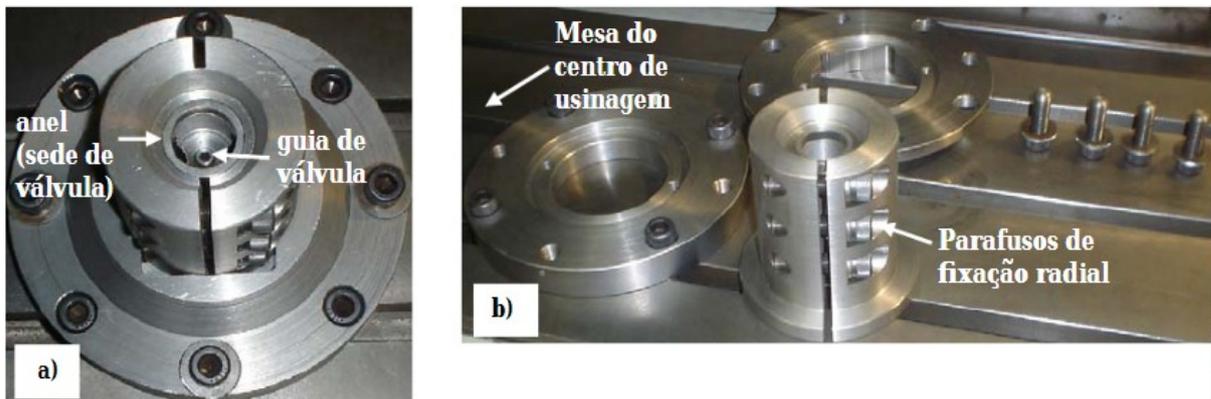


Figura 3.5: Dispositivo de fixação das sedes de válvulas: a) montado, b) desmontado na mesa do Centro de Usinagem (Siqueira et al. 2007)

Quando se deseja furos de elevada exatidão, devem-se tomar os seguintes cuidados e/ou verificar se as seguintes condições podem ser atendidas (Metals Handbook, 1989).

- Material a ser usinado;
- Estado do Material (dureza, análise metalográfica);
- Material da ferramenta de corte;
- Afinidade química ferramenta/peça;
- Profundidade do furo;
- Furo cego ou passante;
- Tolerância desejada;
- Tipo de fixação da ferramenta;
- Tipo de fixação da peça;
- Condição de lubri-refrigeração;
- Máquina Ferramenta (atende ou não com a potência desejada).

### 3.4 FURAÇÃO COM BROCAS ESPECIAIS

Diante da necessidade de melhorias e diminuição de custos foram surgindo variações do processo de furação, que incluem principalmente alterações na geometria das brocas. E por isso são chamadas usualmente de furação especial e de furação com brocas especiais. A furação especial é compreendida como a realizada sob condições especiais, como altas velocidades, grandes avanços e até mesmo grandes profundidades. Silveira (2013) afirma que quando a relação  $L/D$  é maior que 5, o processo pode ser considerado como furação especial, neste caso

precisando de cuidados adicionais e máquinas robustas. Já a furação com brocas especiais é quando a broca helicoidal convencional sofre alguma variação na geometria. DeVries e Croscheck (1988) afirmam que toda alteração feita na geometria das brocas helicoidais (figura 3.6) tem o intuito de melhorias no processo e que na maioria dos casos a intenção principal é a redução dos esforços com a finalidade de garantir furos com qualidade de trabalho melhor. A figura 3.7 ilustra a geometria de broca especial.

Abele and Fujara (2010) mostraram que para furação com brocas especiais é possível, através de testes experimentais e simulações computacionais, chegar a resultados melhores que os conhecidos com brocas helicoidais convencionais. Cheol-Soo et al, (2012) apresentam um sistema de otimização da furação com ajuda de um CAD/CAM para furação de um bloco de motor náutico, que mostra que além da qualidade das superfícies usinadas, busca-se também expressivas melhorias nos processos com a finalidade de maximizar produção e subtrair custos através principalmente da diminuição do tempo.

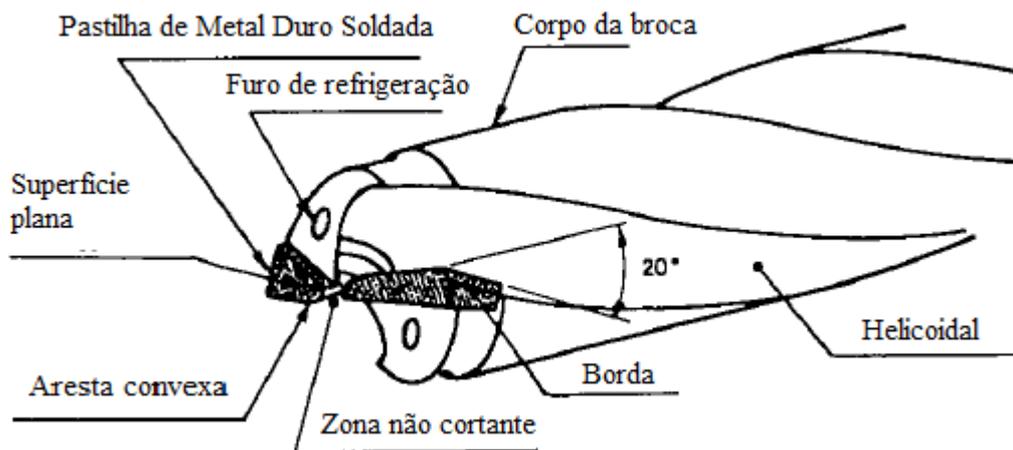


Figura 3.6: Detalhes de ponta de broca helicoidal com geometria modificada (Devries and Croscheck, 1988).

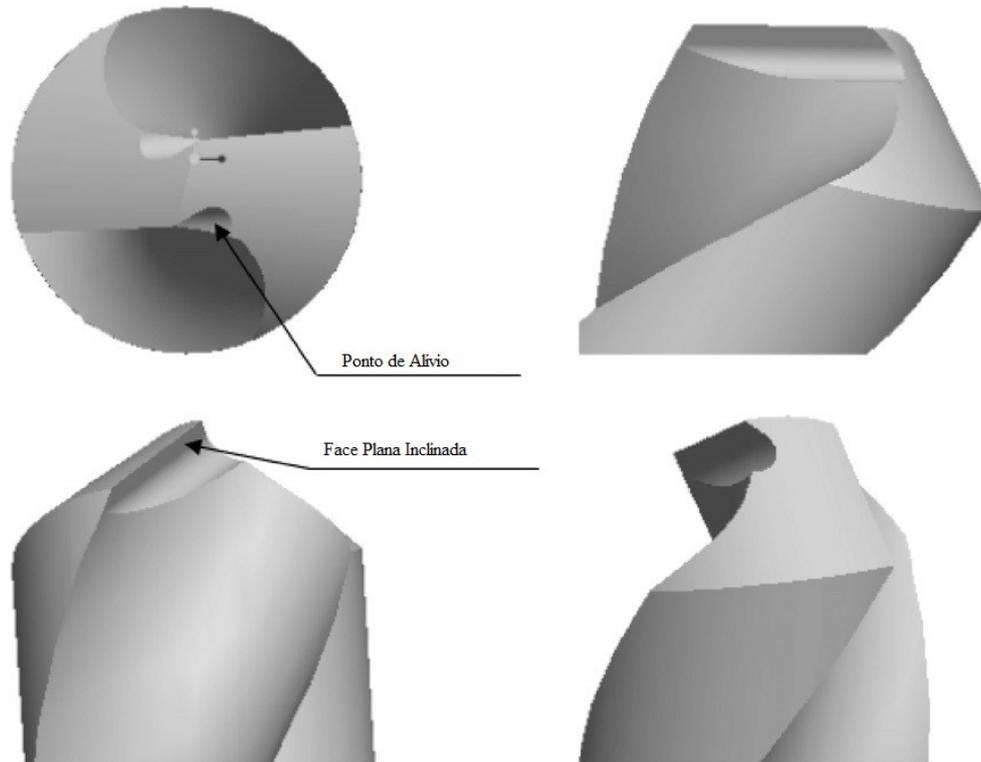


Figura 3.7: Diferentes da geometria de broca especial com superfície de folga inclinada (adaptado de Wang e Zang, 2008).

É cada vez maior a necessidade do emprego de brocas especiais, pois é preciso na maioria dos casos a redução do tempo de operação sem perda da qualidade a fim de aumentar a produtividade, diminuir custos e garantir competitividade. Yamada (2010) cita que para válvulas hidráulicas do trem de pouso de uma determinada aeronave são realizadas quatro operações, sendo duas de furação e duas de alargamento, aplicadas na seguinte seqüência: realização de um pré-furo com  $\varnothing$  6,0 mm, logo em seguida uma broca de  $\varnothing$  6,8 mm é utilizada. Posteriormente é realizado um pré-alargamento para o diâmetro de 7,063 mm, e finalmente, para obtenção do diâmetro final do furo utiliza-se um alargador de diâmetro de 7,142 mm, para que no final se obtenha um furo diâmetro de 7,142 mm com rugosidade de 1,6  $\mu$ m e com desvios de circularidade e cilindricidade de 0,019 mm. Neste exemplo, para a produção de um furo com tolerância mais estreita foram necessárias quatro ferramentas, que implicam em tempo morto, pré-setting de ferramentas, aumento no número de linhas do programa e maior tempo de execução. Além disso, o processo de alargamento é mais lento e de difícil domínio em relação a furação. Metals Handbook (1989) afirma que os alargadores se danificam mais facilmente que as brocas helicoidais e recomenda que se use 2/3 da velocidade aplicada no processo de furação. Desta forma, aplicações como estas tendem a serem otimizadas com a implementação de ferramentas capazes de oferecer menores desvios em uma única operação, pois em diâmetros

pequenos e médios como este, a complexidade do processo pode ser reduzida, pois realizar um furo de 50mm de diâmetro é exponencialmente mais complicado do que um furo com 10mm de diâmetro e relação L/D que não sejam exacerbadas

Durante a fabricação dos furos mesmo quando há um controle rigoroso, surgem imperfeições e desvios, para Novaski (1996), podem ser classificados como segue:

- Desvios de forma: denominados de desvios de forma onde define um elemento geométrico em relação à sua forma teórica. Eles também são conhecidos como desvios geométricos e se sub-dividem em desvios geométricos e desvios microgeométricos. Os desvios microgeométricos são as imperfeições superficiais e são popularmente conhecidos como rugosidade da superfícies que podem ser avaliados por diferentes parâmetros, como Ra, Rt, Rz, dentre outros.
- Desvios dimensionais: são o desvios que relaciona a medida nominal de uma peça indicada com relação ao estabelecido no desenho;
- Desvios de posição: são desvios de um elemento geométrico (linha, ponto, superfície, etc.), em relação a outro elemento geométrico referencial;

Na sessão a seguir serão abordados os desvios de forma ou geométricos que foram analisados neste trabalho.

### **3.5 DESVIOS DE FORMA**

Por mais rigoroso e exato que seja o processo de fabricação, existem em absolutamente todas as peças irregularidades decorrentes do processo, a essas irregularidades são atribuídos valores e nomenclaturas com a finalidade de estabelecer uma intercambiabilidade e uma comunicação entre fabricantes de diversos tipos de peças.

Os desvios de forma se classificam em macrogeométricos (retitude, planeza, circularidade, circularidade etc.) e em microgeométricos (rugosidade superficial). A seguir serão comentados dois destes erros ou desvios de forma ou geométricos mais comumente verificados em furos, rugosidade e desvio de cilindridade.

### 3.5.1 RUGOSIDADE

A importância do estudo do acabamento superficial aumenta na medida em que cresce a precisão de ajuste entre as peças a serem acopladas, onde somente a precisão dimensional, de forma e de posição não é suficiente para garantir a funcionalidade do par acoplado e garantir intercambiabilidade entre as peças, assim a especificação do acabamento das superfícies através da rugosidade superficial é fundamental para peças que estarão sujeitas a condições de operação variadas (Rosa apud Agostinho 1977).

As superfícies de peças apresentam irregularidades quando observadas em detalhes. Estas irregularidades são provocadas por sulcos ou marcas deixadas pela ferramenta que atuou sobre a superfície da peça, e alguns parâmetros de rugosidade são definidos pela NBR ISO 4287/2002 como segue.

- Rugosidade Média ( $R_a$ ): é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dos afastamentos dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média, dentro do percurso de medição  $l_m$ , conforme mostra a figura 3.9.

$R_a$  pode ser calculada pela Equação (1):

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx = \frac{A}{L} \quad (1)$$

ou aproximadamente pela Equação (2):

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y| \quad (2)$$

Onde:

$n$  = número de divisões do percurso de medição.

$y$  = é o valor absoluto da ordenada.

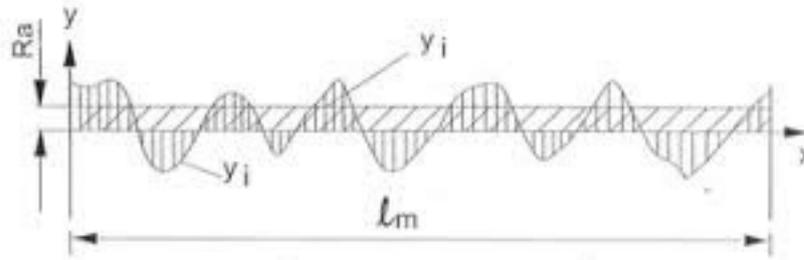


Figura 3.8: Rugosidade média ( $R_a$ ).

- **Rugosidade Média ( $R_z$ ):** é a média aritmética dos  $n$  valores da rugosidade parcial  $Z_i$ . A rugosidade parcial  $Z_i$  é definida como a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maiores afastamentos (acima e abaixo da linha média) existentes dentro de um comprimento de amostragem  $l_e$ . Graficamente, este valor representa a altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil, dentro do comprimento de amostragem  $l_e$  figura 3.10 e pode ser calculado pela Equação (3).

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5} \quad (3)$$

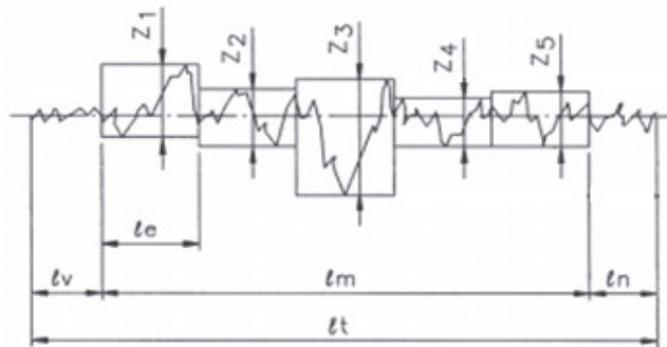


Figura 3.9: Rugosidade média  $R_z$  (Adaptado de Agostinho 1977).

- **Rugosidade máxima ( $R_t$ ):** é definido como o maior valor das rugosidades parciais ( $Z_i$ ) que se apresenta no percurso de medição ( $l_m$ ). Por exemplo, da figura 3.11, o maior valor parcial é o  $Z_3$ , que está localizado rugosidade máxima ( $R_t$ ) no 3º cut off, e que corresponde ao parâmetro de rugosidade  $R_t$ .

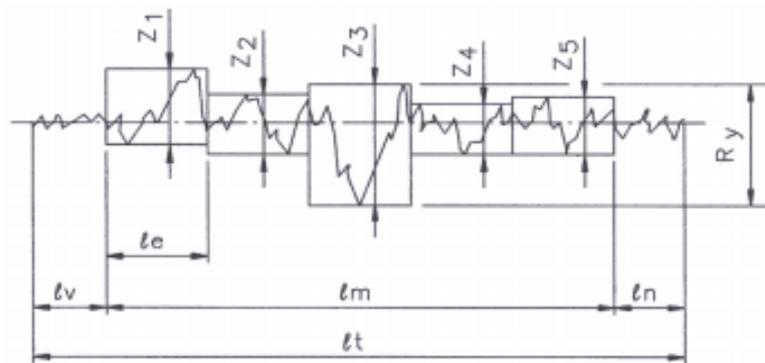


Figura 3.10: Rugosidade Máxima (Rt) (Adaptado de Agostinho 1977).

Na maioria dos casos e trabalhos científicos, o parâmetro de rugosidade  $R_a$  é o mais utilizado por ser também o mais representativo do relevo da superfície analisada.

### 3.5.2 DESVIO DE CILINDRICIDADE

O desvio de forma, ou erro de forma, conhecido como cilindricidade é calculado com base na variação da superfície usinada (real) com uma superfície teórica que a define, neste caso um cilindro. Este parâmetro é o que fornece maiores informações sobre a superfície do furo usinado; este engloba o desvio de circularidade e retinealidade do furo. O desvio de cilindricidade verifica a diferença entre os eixos dos cilindros traçados e a compara com um cilindro ideal, teórico. A figura 3.12 ilustra um gráfico resultante de medição do desvio de cilindricidade de um furo por um software do sistema de medição de máquina de medir desvios de forma (circularímetro). São vários os trabalhos que utilizam este parâmetro para avaliar qualidade de furos produzidos por furação e alargamento. Dentre eles podem ser citados os trabalhos de Dos Santos (2004) e Almeida (2008).

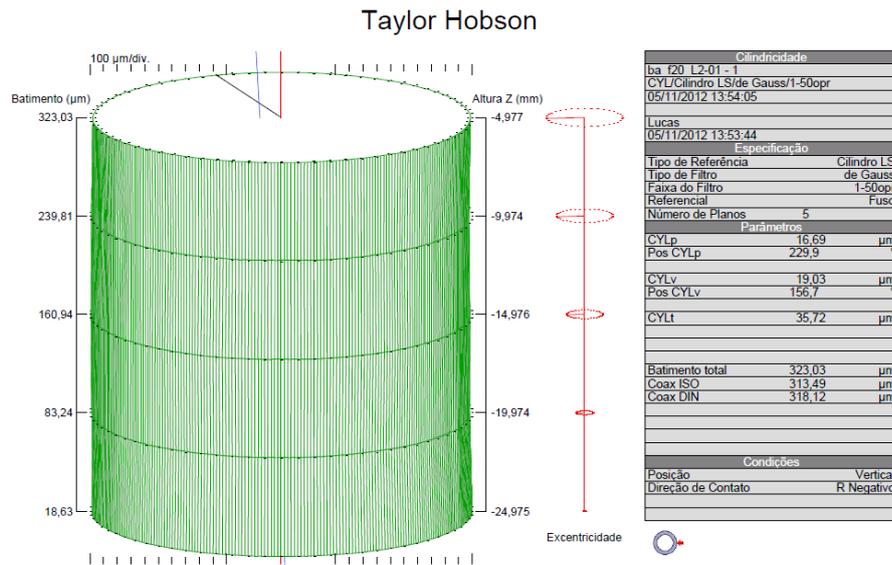


Figura 3.11: Representação gráfica da medição do desvio de cilindridade medido em uma máquina de medir desvios de forma (circularímetro) modelo Talyrond 131 fabricado pela Taylor Hobson.

#### 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada durante os testes realizados neste trabalho.

Inicialmente, como previsto, foram realizados testes preliminares para adequação e ajustes dos parâmetros de corte e então o desenvolvimento das atividades previstas para o processo de furação e alargamento e furação com brocas especiais, como mostra o fluxograma da figura 4.1.



Figura 4.1: Fluxograma das etapas do procedimento experimental.

As variáveis de saída utilizadas para determinar o desempenho das operações de furação/alargamento e furação com broca especial foram a rugosidade da superfície interna do furo ( $R_a$  e  $R_t$ ), desvio dimensional do diâmetro do furo e o desvio de cilindridade, como mostra a figura 4.2.

Para cada teste foram usinados 25 furos, seguidos por uma réplica e uma tréplica, ou seja, cada teste teve 75 furos no total (25 + 25 + 25). Cada teste teve por finalidade obter furos com diâmetro de 10 mm e 30 mm de profundidade, e as situações foram as seguintes:

1º ⇒ Furação / Alargamento com sobremetal de 0,5 mm.

2º ⇒ Furação / Alargamento com sobremetal de 0,3 mm.

3º ⇒ Furação direta com broca especial.

Para as operações de alargamento com sobremetal de 0,3 e 0,5 mm, a profundidade da operação de alargamento foi de 25 mm, devido ao ângulo deixado no furo pela ponta da broca helicoidal, no entanto as operações de furação com brocas de  $\phi$  9,5 e 97 mm, foram realizadas com profundidade de 30 mm, assim como a furação com brocas especiais de  $\phi$  10 mm.

Há uma ressalva a se fazer, é que, como pode-se perceber nas figuras 4.6, 4.7 e 4.17 existe 26 furos, o 26º furo foi realizado para auxiliar a medição de desgaste e força de usinagem, que foram utilizados por um aluno de mestrado.

Após os pré-testes e a extensa revisão bibliográfica realizada, assim como informações de catálogos de fabricantes, chegou-se aos parâmetros finais de corte apresentados na tabela 4.1.

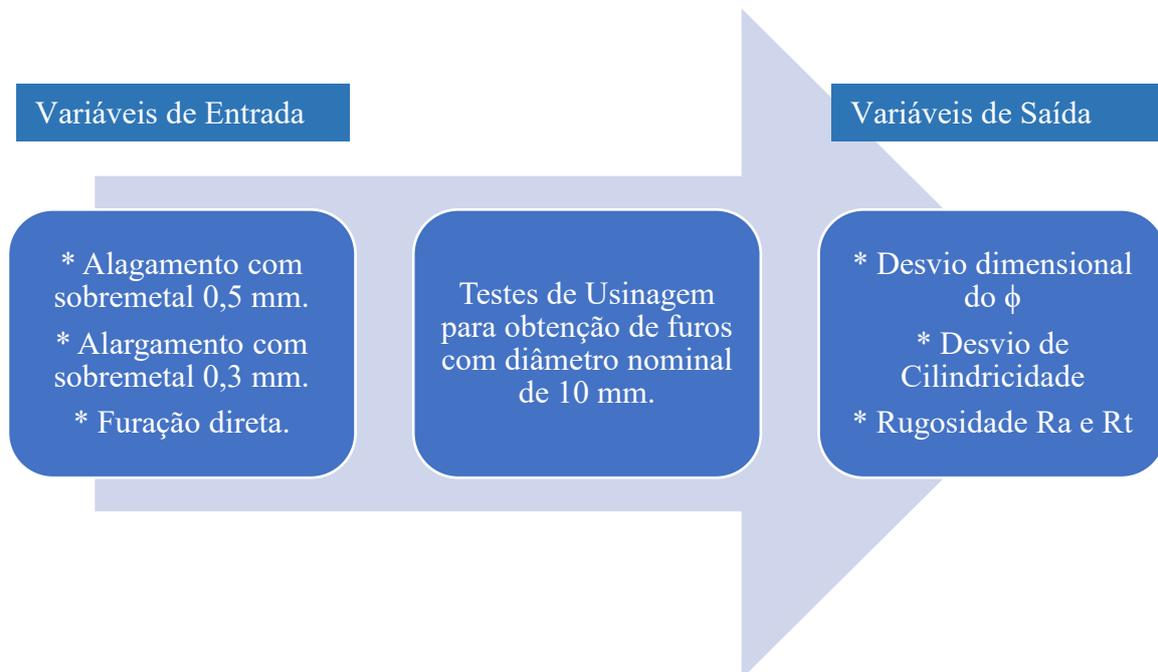


Figura 4.2: Fluxograma de variáveis de entrada e saída dos testes.

Tabela 4.1: Parâmetros de corte adotados nos testes (REIS A. 2014).

<b>Processo</b>	<b>Velocidade de corte – Vc (m/min)</b>	<b>Avanço – f (mm/rot)</b>	<b>Profundidade do furo (mm)</b>
Pré-furação com brocas helicoidais	70	0,25	30
Alargamento	15	0,10	25
Furação com Brocas Especiais	70	0,20	30

#### 4.1 Material da Peça

O material de trabalho foi o fundido vermicular, FV450, na forma de barras fornecidas pela Fundição Tupy (figura 4.5). O ferro fundido vermicular, também conhecido como Compacted Graphite Iron (CGI) tem apresentado uma crescente aceitação na indústria automobilística, demonstrando possibilidades de utilização em diversas peças, que atualmente são fabricadas em cinzento, tais como discos de freio, coletores de escapamento, cabeçotes de motor e, principalmente, blocos de motores à diesel (Boehs et al, 2002).

Guessser et al. 2004, já afirmava que o futuro dos motores para carros à passeio passava pelo Ferro Fundido Vermicular, porque a cada dia são necessários: redução de peso e aumento da potência do motor, e o CGI leva vantagem sobre o alumínio por exemplo devido à queda da resistência mecânica a altas temperaturas.

Em relação microestrutura e propriedades, a forma e a disposição da grafita, que são as diferenças fundamentais do ferro fundido vermicular em relação ao ferro fundido cinzento (figuras 4.4 e 4.5), conferem ao vermicular um ganho substancial de propriedades mecânicas, destacando-se as resistências mecânica e à fadiga. A grafita nessas ligas de ferro possui forma de verme (ou vermicular), daí o nome. Em certo sentido, essa microestrutura é intermediária entre aquelas exibidas pelo ferro fundido cinzento e o ferro dúctil (nodular) e de fato uma parte da grafita (menos de 20%) pode estar na forma de nódulos (Callister, 2008). As principais propriedades mecânicas do ferro fundido vermicular estão mostradas na tabela 4.2.

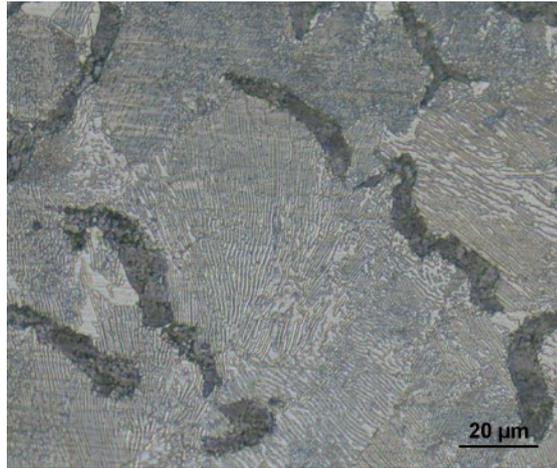


Figura 4.3: Matriz perlítica do ferro fundido vermicular 500 vezes de aumento (Junior and Guess 2011).

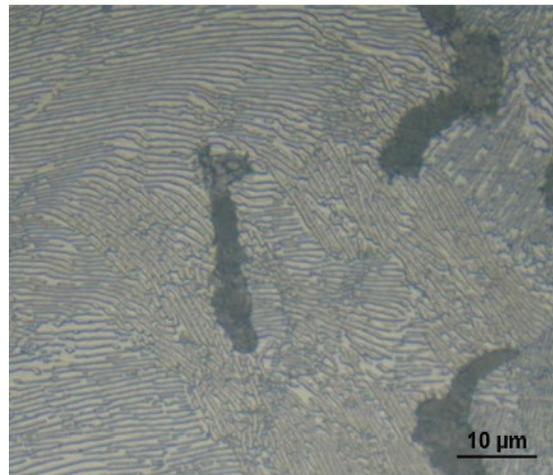


Figura 4.4: Matriz perlítica do ferro fundido vermicular 1000 vezes de aumento (Junior and Guess 2011).

Tabela 4.2: Comparação das propriedades do CGI (Kress, 2002).

Propriedades	Ferro Cinzento	FerroVermicular	Ferro Nodular
Resistência à Tração [Mpa]	250	450	750
Módulo de Elasticidade [Gpa]	105	145	160
Resistência à Fadiga [Mpa]	110	200	250
Condutividade Térmica W/m <sup>2</sup> k	47	37	28

Como citado anteriormente, foram usados 25 furos com cada ferramenta e em seguida duas réplicas para cada teste, ou seja, foram realizados na verdade 75 furos no total. A

distribuição dos furos está conforme figura 4.5. A figura 4.6 mostra também as demais vistas ortogonais necessárias para identificar claramente o aspecto da peça já usinada.

Para o estudo técnico/econômico da broca especial em substituição ao alargador na produção de furos em ferro fundido vermicular, foram realizados 25 furos com diâmetro igual a 10 mm, com 30 mm de profundidade final, para cada condição investigada neste estudo, sendo feitas duas (2) réplicas para cada experimento. Vale ressaltar que foi adotado em paralelo ao critério de 25 furos, um valor de desgaste VBBmax 0,1mm como critério de parada dos ensaios, tanto para os ensaios de furação (com brocas convencionais e com broca especial) como para os de alargamento. Com isso, foi excluída a influência de desgaste ocorrido em todas as ferramentas.

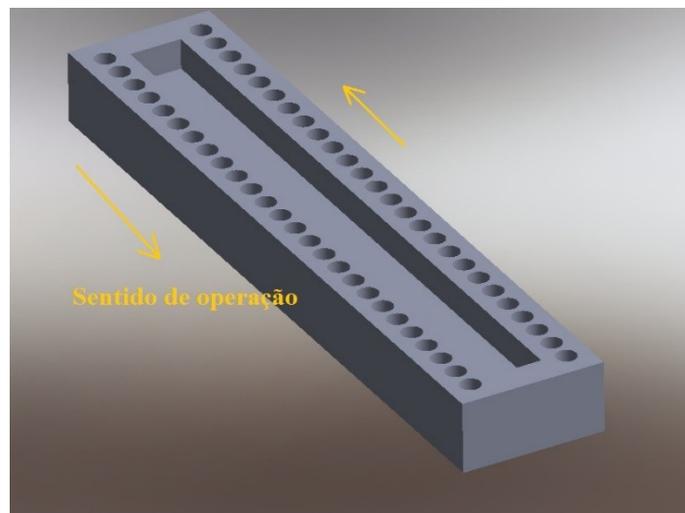


Figura 4.5: Vista em perspectiva do blanque e sentido da sequência de furação

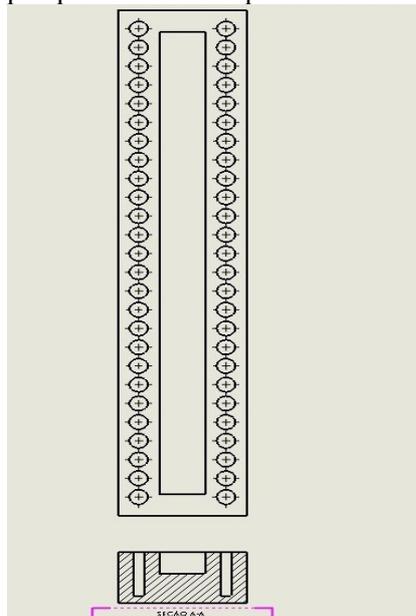


Figura 4.6: Vistas ortogonais superior e lateral em corte do Blanque.

A usinabilidade dos ferros fundidos de um modo geral é dependente da resistência e ductilidade, ou seja, de sua fragilidade, uma vez que os ferros fundidos são em sua maioria ferríticos ou perlíticos. A aresta postiça de corte (APC) se forma em baixas velocidades de corte e ela persiste a velocidades de corte maiores que quando comparados na usinagem dos aços de corte da ferramenta, isto faz com que assim velocidade de corte máxima se torne limitada pela deformação plástica (Machado; Da Silva 2004).

## 4.2 Máquina ferramenta

A máquina-ferramenta utilizada para os ensaios de furação e alargamento foi o Centro de Usinagem Vertical CNC, linha Discovery modelo 760 do fabricante ROMI com potência do motor principal de 9 KW, rotação máxima de 10.000 rpm, e com magazine com capacidade para 22 ferramentas (Figura 4.7), que pertence ao LEPU.



Figura 4.7: Centro de usinagem vertical CNC que foi utilizado nos testes de furação e alargamento e furação com brocas especiais (REIS A. 2014).

Segundo o que é observado na literatura, para obter furos com tolerâncias estreitas, é importante a garantia de uma rígida fixação entre ferramenta e máquina a fim de reduzir o desvio de batimento na realização dos processos de furação e alargamento. Neste sentido, as ferramentas foram acopladas à máquina através de um mandril hidromecânico de alta precisão (Figura 4.8), fabricado pela Sandvik Coromant® 2012.



Figura 4.8: Mandril Hidromecânico Sandvik.

### 4.3 Ferramentas de Corte

Para assegurar que o material da ferramenta não afetasse os resultados dos ensaios todas as ferramentas foram produzidas pelo mesmo fornecedor, ISCAR. Para o processo de furação, pré-furo do processo de alargamento, foram empregadas brocas de duas entradas, inteiriças de metal duro, revestidas de nitreto de titânio alumínio (TiAlN), sem refrigeração com geometria normal com os diâmetros 9,5 e de 9,7 mm. Para a operação de alargamento cilíndrico foram utilizados alargadores inteiriços de metal duro, com 10 mm de diâmetro. Para o processo de furação com broca especial, foram empregadas brocas também inteiriças de metal duro com duas entradas, com diâmetro igual a 10 mm. Todas estas ferramentas estão ilustradas na figura 4.9.



Figura 4.9: Ferramentas de metal duro utilizadas: (a) Broca de  $\varnothing$  9,5 mm; (b) Broca de  $\varnothing$  9,7 mm; (c) Alargador de  $\varnothing$  10 mm; (d) Broca especial de  $\varnothing$  10 mm (REIS A. 2014).

Os detalhes das ferramentas e as suas características estão descritas a seguir com figuras e propriedades fornecidas pelo fabricante.

Brocas inteiriças standard com 2 entradas, tipo N, com diâmetros de 9,5 e 9,7 mm, revestidas de nitreto de titânio e alumínio (TiAlN), classe ISO K-10, utilizadas para a etapa de pré – furação (figura 4.10).

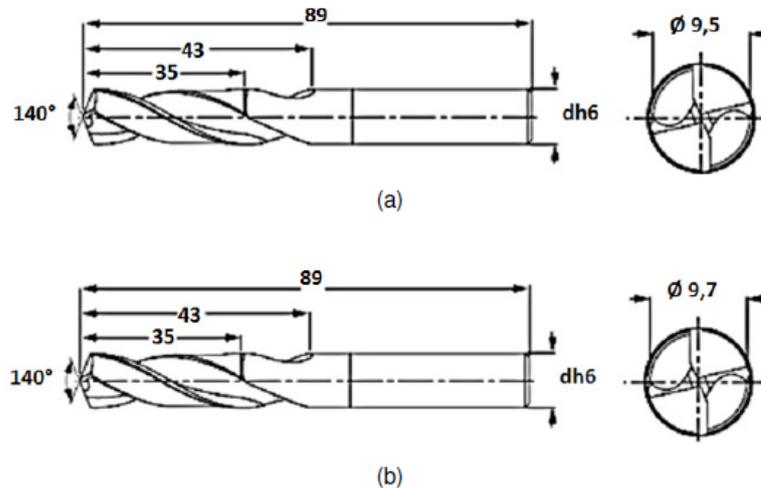


Figura 4.10: Desenho esquemático brocas helicoidais convencionais que foram utilizadas antes do processo de alargamento (utilizadas para abrir pré-furo); (a)  $\varnothing 9,7$  mm, (b)  $\varnothing 9,5$  mm (Iscar do Brasil, 2013).

Alargadores cilíndricos de metal duro, classe ISO K-10, sem revestimento de diâmetro igual a 10 mm, com 6 canais do tipo reto e 0,5 mm de espessura da guia cilíndrica (figura 4.11).

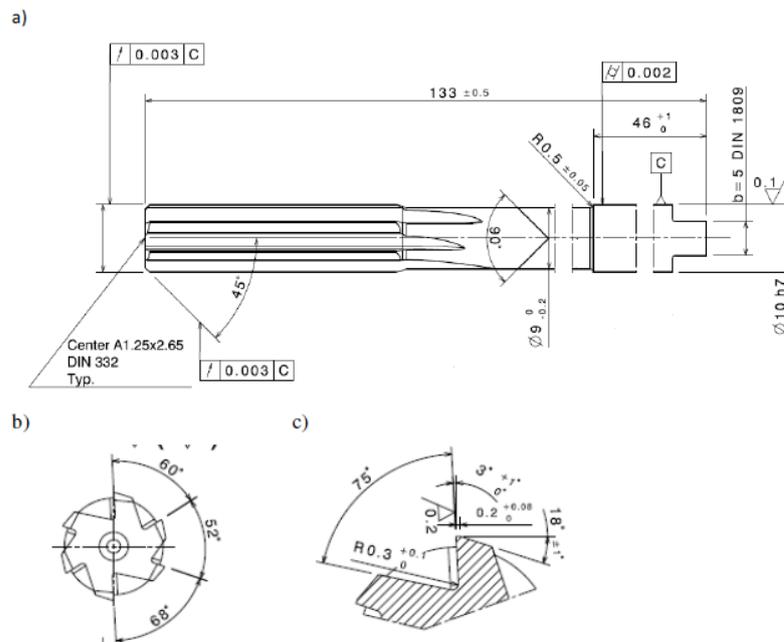


Figura 4.11: Geometria do alargador cilíndrico de 10 mm de diâmetro: a) vista frontal, b) vista de topo, c) detalhes da aresta de corte (Iscar do Brasil, 2013).

Brocas especiais de metal duro  $\varnothing 10$  H7, classe ISO K-10, com duas entradas, indicadas para a usinagem de aços de baixa liga e adquiridas do fabricante ISCAR (figura 4.12) com algumas propriedades informadas na tabela 4.3.

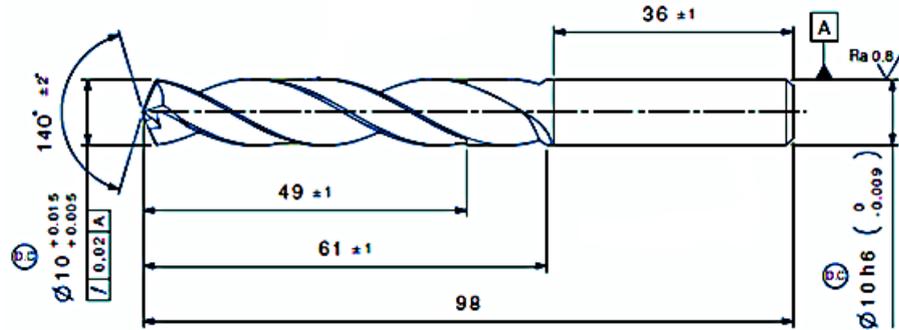


Figura 4.12: Desenho esquemático da broca especial de metal duro (Iscar, 2013)

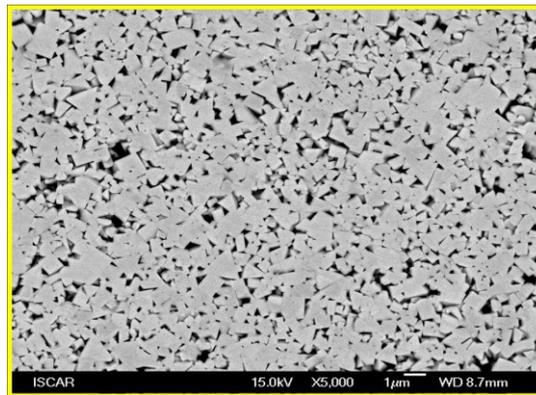


Figura 4.13: Micrografia das brocas Especiais (Iscar, 2013).

Tabela 4.3: Descrição das características das brocas especiais (Iscar, 2013).

Propriedades Típicas		
WC Tamanho de grão	submicron	[ ]
Densidade sinterizado	14,5	$\text{g/cm}^3$
T.R.S	600	Ksi
Dureza Ra	91,9	HRa
Dureza Vickers	1585	Hv
Resistência à Fratura (K1c)	14,5	$\text{MPm}_{1/2}$

As principais características e completa especificação das ferramentas empregadas nos ensaios de usinagem estão apresentadas na Tabela 4.4 e figura 4.13.

Tabela 4.4: Descrição e especificação das ferramentas de corte utilizadas.

Ferramenta	Discriminação	Especificação
<b>Broca (a)</b>	Brocas Metal Duro standard sem refrigeração interna Ø 9,5 mm revestida de (TiAlN)	SCD 095-035-100 AP3 90
<b>Broca (b)</b>	Brocas Metal Duro standard sem refrigeração interna Ø 9,7 mm revestida de (TiAlN)	SCD 097-035-100 AP3 90
<b>Alargador</b>	Alargador de Metal Duro sem revestimento – Ø 10 mm - H7	RM-SHR-1000-H7S-CS-CH 07
<b>Broca Especial</b>	Broca de Metal Duro Especial sem refrigeração interna com dupla margem - Ø 10 mm H7	SCD1000-049RZA-TN17888

Os ensaios foram realizados com ferramentas de metal duro integral (classe K10). O material foi fixado com auxílio de suportes laterais conforme a figura 4.14, e antes da usinagem com dada ferramenta verificou-se o desvio de batimento das ferramentas por meio do sistema de medição composto por um relógio comparador e uma base magnética conforme mostra a figura 4.15.

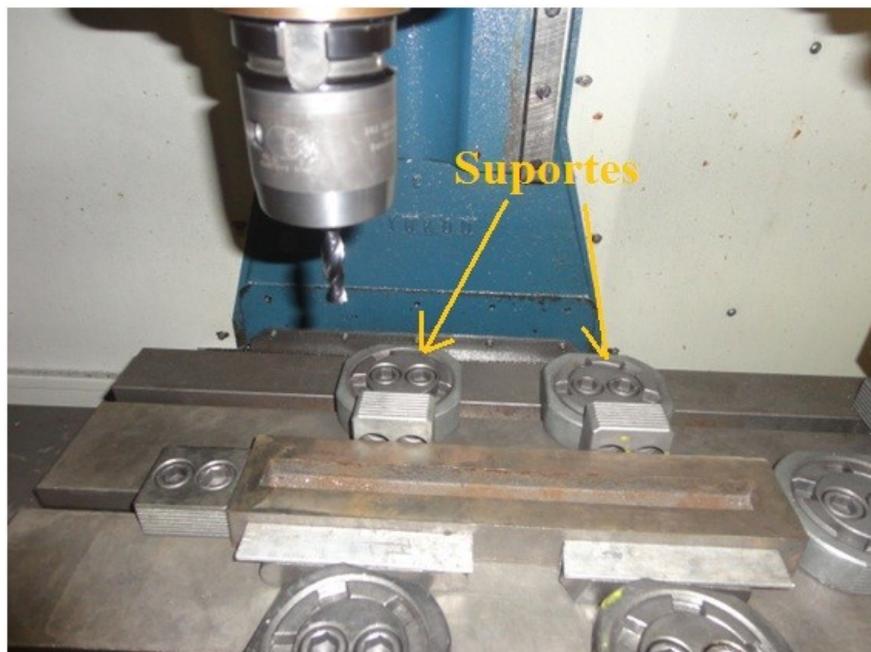


Figura 4.14: Sistema de Fixação do material na mesa do centro de usinagem (REIS A. 2014).

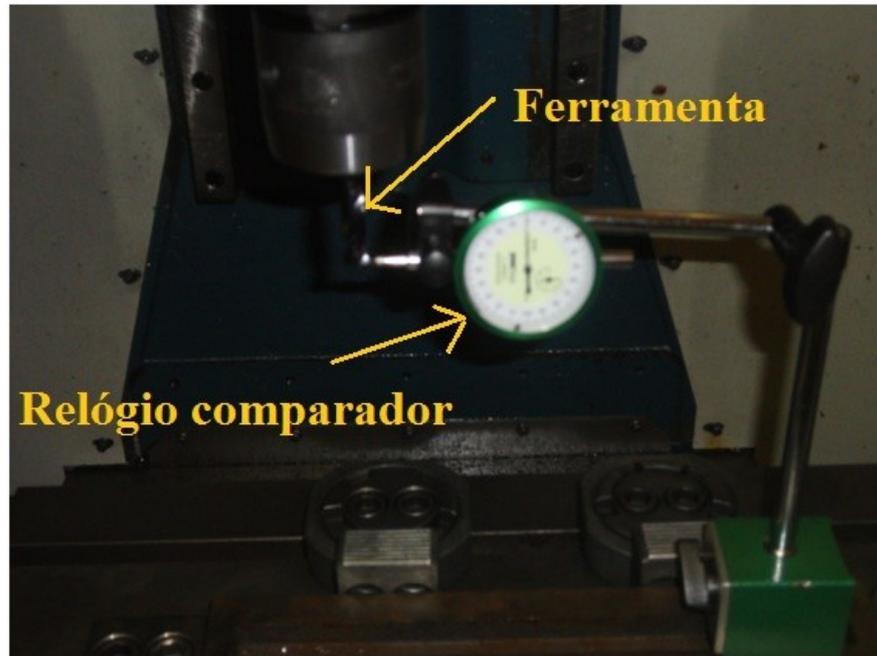


Figura 4.15: Aparato para medição do batimento das ferramentas (REIS A. 2014).

Tabela 4.5 Valores de batimento radial medidos para as ferramentas (REIS A. 2014).

Ferramentas	Batimento radial ( $\mu\text{m}$ )	
	Min.	Máx.
Brocas $\text{\O} 9,5 \text{ mm}$	9	12
Brocas $\text{\O} 9,7 \text{ mm}$	8	11
Alargador $\text{\O} 10 \text{ mm}$	11	14
Brocas Especiais $\text{\O} 10 \text{ mm}$	8	10

#### 4.4 Medição dos desvios

Nesta sub-seção será apresentado detalhes sobre as medições dos erros e desvios. Após os ensaios de furação/alargamento e furação com brocas especiais, os corpos de prova foram levados ao Laboratório de Metrologia Dimensional (LMD) para medição do diâmetro, dos desvios de rugosidade ( $R_a$  e  $R_t$ ) e de cilindricidade.

##### 4.4.1 Medição da rugosidade

As medições dos parâmetros de rugosidade foram realizadas sobre uma mesa de desempenho (figura 4.17), a fim de minimizar o efeito de vibrações, que interferem nas medições de rugosidade, onde foram medidos os parâmetros pré-selecionados de rugosidade Ra e Rt, a medição da rugosidade foi executada em dois pontos equidistantes de 180° um do outro em relação ao diâmetro do furo, onde todas as superfícies dos furos foram previamente limpas, as medições foram repetidas três vezes.

O cut-off adotado foi de 0,80 mm, esse valor foi adotado segundo recomendações de normas e autores, normalmente se emprega a relação  $\text{cut-off} = 5 * \text{Avanço}$ . A maioria das literaturas sugerem então usar entre 2,5 e 8 vezes o avanço, sendo que 5 seria aproximadamente o valor médio desta relação.

Vale ressaltar que para as medições da rugosidade, o ensaio é considerado como sendo destrutivo, então não se pode repetir a medição em um mesmo ponto. Os pontos foram igualmente pegos em coincidência com o eixo central do furo.

O equipamento utilizado foi um rugosímetro portátil SJ201 P/M da marca MITUTOYO (Figura 4.16), com resolução de 0,01  $\mu\text{m}$  e agulha do apalpador de diamante com raio de ponta de 5 $\mu\text{m}$ , que foi apoiado propriamente em um suporte projetado para este fim, que permite a base do rugosímetro deslocar-se verticalmente para medir os furos em diferentes fileiras.

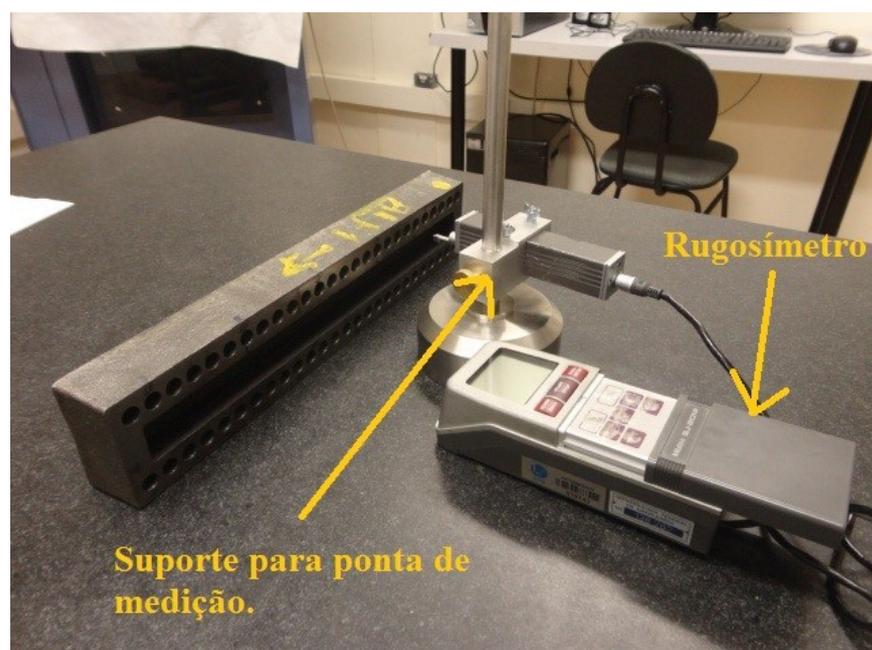


Figura 4.16: Suporte para apoio do transdutor-rugosímetro.

#### 4.4.2 Medição do desvio de cilindridade e diâmetro

Para a medição do desvio cilindridade e diâmetro dos furos, foi utilizada a máquina de medir a três coordenadas (MM3C), modelo BRM443, do fabricante Mitutoyo, resolução de 0,1  $\mu\text{m}$  e capacidade de medição de 400 mm x 400 mm x 300 mm para os eixos X, Y e Z respectivamente (figura 4.17), do Laboratório de Metrologia Dimensional da FEMEC. Esta máquina possui um programa computacional dedicado, conhecido como COSMOS, que é muito versátil e considerado a tecnologia mais recente para técnicas de medição dimensional. Foi usado um apalpador com esfera de rubi com diâmetro de 2 mm, o mesmo foi utilizado com ângulo zero para a medição dos desvios, e em todos os casos admitiu-se o desvio de calibração de no máximo 2  $\mu\text{m}$ , e chegando a obter em algumas calibrações 0,8  $\mu\text{m}$ , o que promove maior confiabilidade dos resultados.

Foram realizadas 5 medidas para cada furo analisado, o desvio de cilindridade é composto por uma soma do desvio de circularidade em diversos planos espaçados pelo comprimento do furo. Para os testes foram analisados 5 planos:

- 1º plano  $\Rightarrow$  imediatamente após a borda do furo.
- 2º plano  $\Rightarrow$  5 mm após o 1º plano no sentido crescente da profundidade do furo.
- 3º plano  $\Rightarrow$  5 mm após o 2º plano no sentido crescente da profundidade do furo.
- 4º plano  $\Rightarrow$  5 mm após o 3º plano no sentido crescente da profundidade do furo.
- 5º plano  $\Rightarrow$  5 mm após o 4º plano no sentido crescente da profundidade do furo.

A descrição acima citada, leva em consideração o ângulo de ponta das brocas helicoidais, por isso o 5º plano se situou próximo aos 25 mm, deixando 5 mm para o cone formado até os 30 mm de profundidade dos furos.

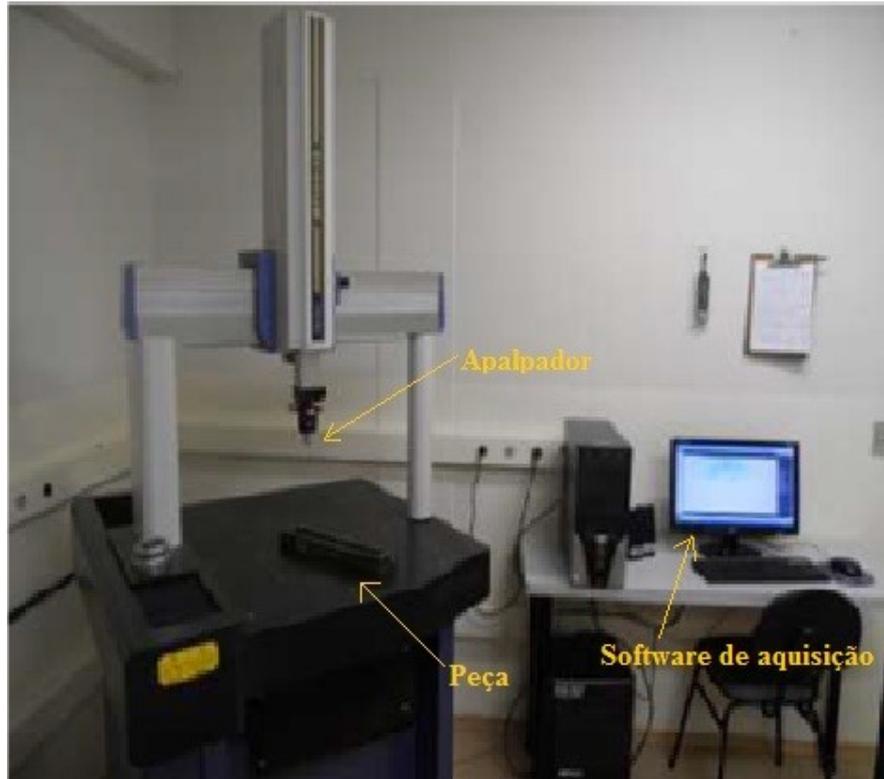


Figura 4.17: Máquina de medição a três coordenadas do tipo ponte móvel modelo BR443.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta sessão são apresentados e discutidos os resultados obtidos em termos dos parâmetros de rugosidade, diâmetro e do desvio cilíndricidade para os furos usinados com brocas e alargadores convencionais e com brocas especiais.

Para as três operações, furação seguida de alargamento com sobremetal 0,3 e 0,5 mm e furação com brocas especiais, foram medidos os diâmetros dos furos após a usinagem levando em consideração o diâmetro nominal esperado de 10 mm, como já citado sendo este o diâmetro tanto dos alargadores quanto das brocas especiais.

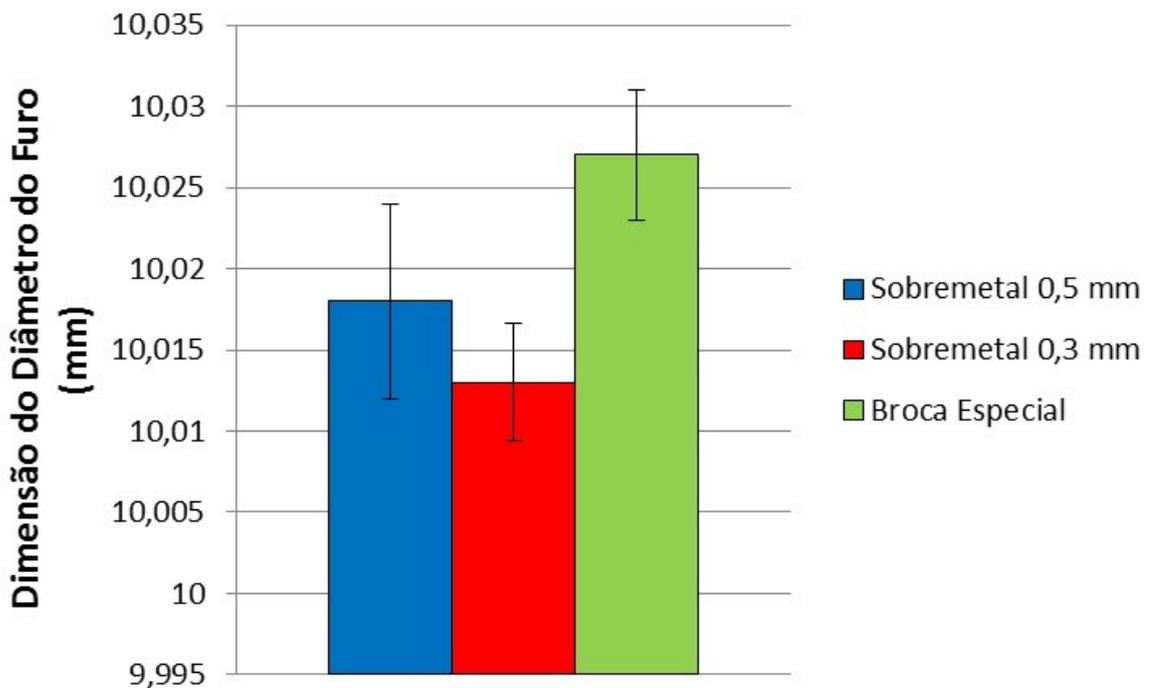


Figura 5.1: Desvio dimensional dos diâmetros dos furos após processo alargamento cilíndrico (diâmetro de 10 mm) em função do diâmetro deixado pelas brocas de diâmetro 9,5 mm (sobremetal 0,5mm) e diâmetro 9,7mm (sobremetal igual a 0,3mm) e broca especial de diâmetro 10 mm (REIS A. 2014).

Da figura 5.1 nota-se que diferenças significativas não foram notadas em relação ao diâmetro nominal esperado e que, quanto maior o sobremetal maior foi o desvio, pois segundo Da Silva (2001), quando se aumenta o valor de sobremetal, aumenta-se também o esforço de corte para produzir cavaco, que por sua vez exerce maior pressão sobre a peça.

Chiaverini (1986) e Callister (2008) relatam que na usinagem de ferro fundido é de se esperar que já estejam inclusas diferenças geométricas e dimensionais na superfície devida a não homogeneidade encontrada no material pela ferramenta na hora do corte, ou seja, há presenças das várias formas de microestruturas diferentes em um volume pequeno de material, tanto que para a caracterização de propriedades como a dureza são realizadas penetrações em diferentes pontos a fim de obter-se uma média representativa para todo o material.

Da Figura 5.2 observa-se que tanto para a broca especial quanto para os alargadores, em geral, o desvio de cilindridade aumentou com o número de furos usinados. Almeida (2008) constatou que aumento do número de furos acelera o desgaste da aresta principal de corte da ferramenta ao investigar o processo de alargamento de ferros fundidos cinzento (GH 190) e vermicular (CGI 450). A autora também notou que o parâmetro Ra aumentou com o número de furos.

Os valores de desvio de cilindridade para o alargamento tanto com sobremetal 0,3 quanto para 0,5 mm apresentou menores valores que para furação com brocas especiais. Isso pode estar atribuído à quantidade de material removida e a conservadora relação  $L/D=3$  (comprimento por diâmetro). Abele et al, (2010) afirmam que quando essa relação chega ou tende ser maior que 7, a qualidade de furos com pequenos diâmetros no alargamento não é mais garantida. Além disso, é importante observar que a geometria do alargador é diferente daquela da broca especial. Alargadores possuem arestas dispostas em canais retos e, portanto, demonstrando serem mais adequados para a produção de furos nas condições investigadas. Além disso, o aumento do sobremetal na operação de alargamento gera o aumento do desvio de cilindridade o que mostra claramente que este está intimamente relacionado com a quantidade de material a ser removido.

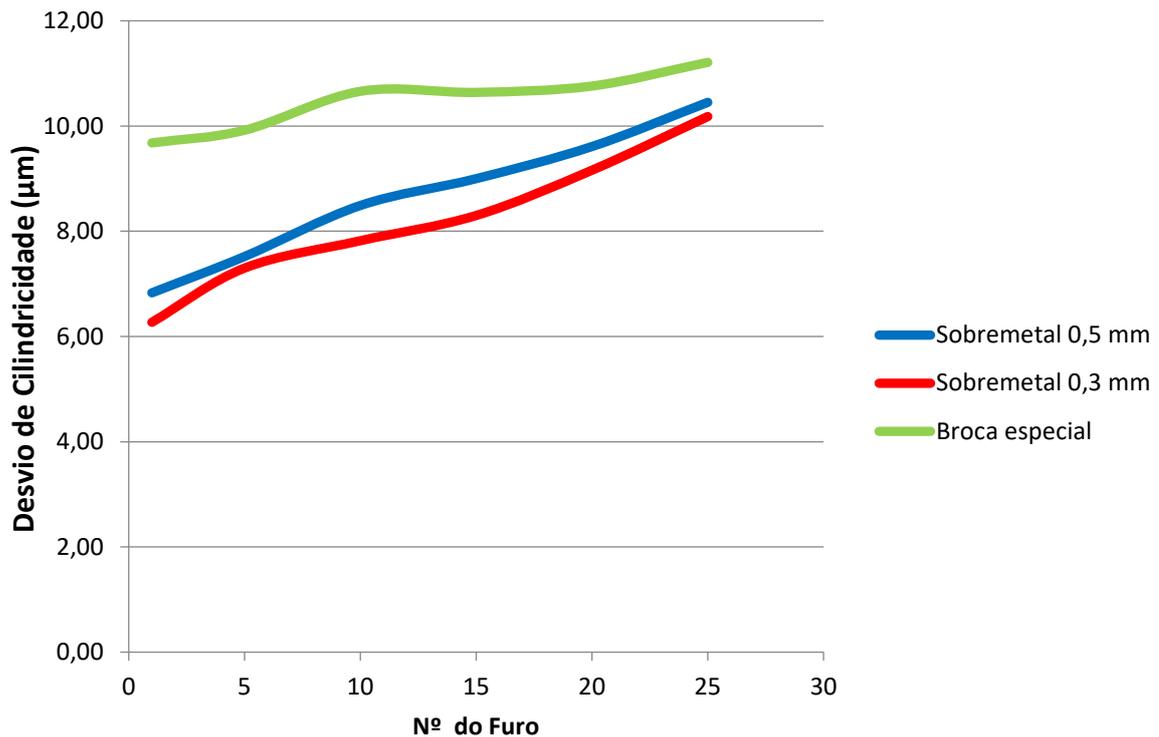


Figura 5.2: Desvio de forma (cilindricidade) dos furos após alargamento em função do diâmetro deixado pelas brocas de diâmetro 9,5 mm (sobremetal 0,5mm) e diâmetro 9,7mm (sobremetal igual a 0,3mm) e após broca especial.

A figura 5.4 apresenta os valores obtidos para os parâmetros de rugosidade Ra dos furos, respectivamente, obtidos em função das diferentes ferramentas na usinagem do ferro fundido vermicular.

Verifica-se da figura 5.4 que os valores de rugosidade Ra apresentam um comportamento distinto, onde para o furo de mesmo número os maiores valores de rugosidade foram registrados quando se empregou o menor sobremetal. Com base nos valores obtidos, nota-se que os valores de Ra variaram na faixa entre 1,00 e 2,20 µm, indicando que as condições de corte e ferramentas selecionadas permitiram alcançar baixos valores de rugosidade, bom acabamento, em furos de Ø10 mm em ferro fundido vermicular para as condições investigadas.

Observa-se ainda que, em geral, os valores de rugosidade Ra apresentam uma leve tendência de elevação com o número do furo usinado para o menor valor de sobremetal, diferentemente da tendência observada para os ensaios com o maior valor de sobremetal. Esse mesmo fenômeno aconteceu com Bezerra (1998) no alargamento de liga de alumínio, nos experimentos foi notado que para as operações onde devido a pequena quantidade de material

a ser retirada (sobremetal), o resultado é o esmagamento do material em certas regiões, sem o corte efetivo.

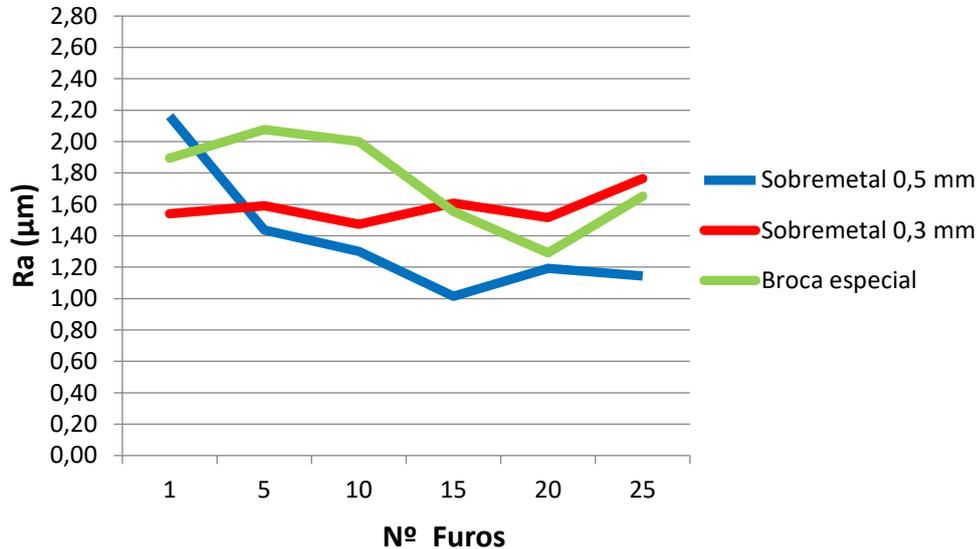


Figura 5.3: Valores de rugosidade superficial Ra dos furos após alargamento em função do diâmetro deixado pelas brocas de diâmetro 9,5 mm (sobremetal 0,5mm) e diâmetro 9,7 mm (sobremetal igual a 0,3mm) e após broca especial em função do número do furo para as diferentes ferramentas.

Almeida (2008) em seus estudos realizados no processo de alargamento de ferros fundidos cinzento e vermicular, verificou que os maiores valores de rugosidade estavam relacionados com o maior valor de sobremetal, ou seja, indicando que quanto mais material é arrancado, maiores eram os parâmetros de rugosidade obtidos na parede do furo, valores diferentemente da tendência observada neste trabalho.

Rosa (2012), ao realizar ensaios de alargamento de furos usinados em pistões de ferro-carbono sinterizado, observou que a pequena quantidade de material removido apenas fazia com que o alargador atritasse na peça ao invés de cortá-la, um efeito mais de conformação do que de corte propriamente dito.

Alves e Deminicis (2014) realizaram um trabalho na usinagem de furos de 10mm de diâmetro em ferro fundido vermicular e verificaram que resultados da rugosidade podem variar significativamente quando há variação do fluido de corte para o processo. Esses resultados indicam que as condições tribológicas afetam o acabamento, e para este trabalho de Alves e Deminicis (2014), o fluido foi benéfico.

Em relação aos aspectos econômicos e energéticos, Reis A 2014, desenvolveu um estudo de análise econômica para o CGI nas condições idênticas a deste trabalho e observou os dados apresentados na tabela 5.1 a seguir.

Tabela 5.1: Avaliação dos Custos de fabricação comparado com a qualidade de trabalho proporcionada (adaptado de REIS A 2014).

<b>Ferramentas</b>	<b>Rugosidade Ra (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Cilindricidade (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Tempo Total de fabricação</b>	<b>Custo de Fabricação</b>	<b>Qualidade de Trabalho (IT).</b>
Alargador (sobremetal 0,3 mm)	1,76	10,18	23'48''	R\$575,33	IT6
Alargador (sobremetal 0,5 mm)	1,14	10,45	23'48''	R\$575,33	IT7
Broca Especial	1,16	11,21	16'54''	R\$386,62	IT8

Em relação aos dados apresentados na tabela 5.1, nota-se que para uma qualidade de trabalho até IT 6 a broca especial é fortemente recomendada, se o material e as dimensões dos furos, assim como parâmetros de corte forem idênticos as deste trabalho. No entanto se a qualidade requerida dor IT 7 ou IT 8 a operação de alargamento com sobremetal 0,3 mm mostra-se mais vantajosa, pois apresenta qualidade melhor.

## 6. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, as seguintes conclusões podem ser retiradas:

- O desvio do diâmetro nominal (10mm) observado foi pequeno devido à quantidade reduzida de furos usinados como já antecipava a literatura e comprovado experimentalmente, e também devido as condições de corte não serem próximas do limiar máximo capaz das ferramentas. Para este parâmetro a broca especial apresenta o pior resultado, o que pode ser explicado pela maior quantidade de material retirada em uma única operação.
- Os valores da rugosidade Ra em geral diminuíram com o número de furos, e variam na faixa entre 1,00 e 2,20  $\mu\text{m}$ . Essa queda nos valores é mais acentuada na operação de alargamento com sobremetal de 0,5 mm. Pode-se inferir que para o valor de sobremetal de 0,3 mm de sobremetal o alargador ‘risca’ mais que ‘alisa’ a superfície interna do furo, isso é ainda mais acentuado em uma material com uma microestrutura heterogênea como o ferro fundido como prevê Ferraresi (2006).
- Para o desvio de cilindricidade os valores aumentaram com o número de furos, os maiores valores apresentados foram quando empregaram alargadores com sobremetal de 0,5 e broca especial. A broca especial apresentou os piores valores para esse parâmetro.
- Os parâmetros de rugosidade média Ra e rugosidade máxima Rt para as brocas especiais apresentaram valores satisfatórios que oscilaram entre os valores para o processo de alargamento precedido por furação, ou ora sendo pouco maior. O parâmetro Ra apresentou valores que são ainda mais expressivos no sentido de encorajar o uso da broca especial, pois apresentou valores bem próximos aos dos alargadores com sobre metal de 0,3 e 0,5 mm respectivamente.
- O estudo demonstrou que o emprego da broca especial nas condições investigadas, e complementados por Reis A 2014 é viável em termos econômicos e energéticos para tolerâncias de trabalho IT8, portanto configurando a energia mais limpa.

Para tolerâncias mais estreitas o uso das brocas especiais não é conveniente ou viável tecnicamente.

## 7. REFERÊNCIAS

ABELE, E., FUJARA, M., Simulation-based twist drill design and geometry optimization, CIRP Annals - Manufacturing Technology 2010, Elsevier, pp. 145 a 150.

ABNT/ISO NBR 6158 - Sistema de tolerâncias e ajustes 1995.

ABNT/PB 297 - Broca calibradora helicoidal com haste cilíndrica - Série normal - Aço rápido substituída por ABNT NBR ISO 7079:2010 em 05/03/2010.

AGOSTINHO, O.L.; RODRIGUES, A.C.S.; LIRANI, J., Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões, 8 a. reimpressão. São Paulo: Edgard Blücher, 2004 295 p.

ALMEIDA, D.O., 2008, Investigação de Desvios Geométricos no Alargamento de Ferro Fundido com Ferramentas Revestidas, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, p. 103.

ALVES, S. M., DEMINICIS, F. H. A., Análise e seleção de fluidos de corte para a furação de ferro fundido vermicular - O Mundo da Usinagem; ISS Nº 1518-6091 RGBN 217-147 pág. 20 a 25, 2013.

ANFAVEA- Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores, <http://www.anfavea.com.br/estatisticas-2017.html/> (Acessado em 10 de janeiro de 2018).

BEZERRA, A. A.; 1998, influência dos principais parâmetros no processo de alargamento de uma liga alumínio-silício, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG. Pp 139.

BEZERRA, A. A.; MACHADO, A. R.; SOUZA, A. M.; EZUGWU, E. O. Effects of machining parameters when reaming aluminium-silicon (SAE 322) alloy. Journal of Materials Processing Technology, v 112, p 185-198, 2001.

BOEHS, L., MOCELLIN, F. Avaliação da usinabilidade do ferro fundido vermicular em ensaios de furação, II Conem - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, João Pessoa, PB, 12 a 16 de Agosto, p 1-10, 2002.

BORRILE, A. V., Análise do Alargamento de Ferro Fundido Cinzento GG25 com Ferramentas de Metal Duro, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 125 p, 2005.

BRAGA, D, U,; DINIZ, A, E; MIRANDA, G, W, A,; COPPINI, N, L, Aspectos negativos do uso de fluido emulsionável na furação de uma liga de alumínio-silício hipoeutética, Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, João Pessoa, PB, 12 a 16 de Agosto, 2002.

CALLISTER, Jr. Willian D., Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução 7 ed.- Rio de Janeiro :LTC 2008.

CHEOL-SOOLEEA, JAE-HYUN LEEB, DONG-SOOKIMB, EUN-YOUNG HEOC, DONG-WON KIMD, A hole-machining process planning system for marine engines Journal of Manufacturing Systems, pág 114 a 122, Elsevier.

CHIAVERINI, V. Tecnologia Mecânica/ 2 ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

DA SILVA, R. B. , Alargamento cônico do ferro fundido nodular GGG40, Dissertação de mestrado, UFMG, 2001.

DEVRIES, M . F., CROSHECK, M. K., An investigation of the Cutting Mechanisms of the New Point Drill, University of Wisconsin-Madison / WI / USA; H. Negishi; Mitsubishi Metal Corp., Gifu /Japan Received on January 18,1988.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F., C., COPPINI, N., L., Tecnologia da usinagem dos materiais, 7º edição, São Paulo, Artliber editora, 2010.

DOS SANTOS, R, G, AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ALARGAMENTO DE GUIAS DE VÁLVULAS, Dissertação de Mestrado UFPR, 2004.

FERRARESI, D., Fundamentos da usinagem dos metais. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 2003.

GABOR, H., Como especificar brocas, Máquinas e Metais, MM Editora Ltda, Ano XIX, nº. 215, p. 28-34, 1983.

GONCALVES SILVA, Lucas, relatório de iniciação científica submetido no portal propp, intitulado, Furação e alargamento versus furação com broca Especial.

GUESSER, W. L., DURAN, P. V., KRAUSE, W., Compacted Graphite Iron for Diesel Engine Cylinder Blocks, Congrès Le diesel : aujourd'hui et demain – Page 1 sur 11 Ecole centrale Lyon – 12 et 13 mai 2004.

GUHRING, Ferramentas de Corte de Precisão, 2012.

ISCAR, 2013, Documentos mandados após compra das ferramentas.

JUNIOR, E. M., GUESSER, W. L., Avaliação da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular através de ensaios de Furação - 6º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 11 a 15 de abril de 2011.

KRESS, D. El , Escariado con altas velocidades. Stuttgart, 1974. Tese de Doutorado - Universidad de Stuttgart.

KRESS, J. Experiences and Results in CGI Machining at Machining Centres. In: COMPACTED GRAPHITE IRON MACHINING WORKSHOP, 5. 2002, Darmstadt. Annals. Darmstadt : Mapal, 2002. p. 140-159

MACHADO, A.R., ABRÃO, A.M., COELHO, R.T. and DA Silva, M.B., 2009. Teoria da Usinagem dos Materiais Vol.1, Ed. Edgard Blücher, S.Paulo, Brasil, 371p.

METALS HANDBOOK – VOLUME 16, 1989, “Machining”, Ninth edition, ASM International.

NBR ISO 4287/2002 - Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade

NOVASKI, O.; Contribuições no processo de furação com brocas helicoidais. Tese de livre docência, Faculdade de Engenharia Mecânica/Unicamp, 1996.

OSG, 2010, High-Tech, Ferramentas Especiais, Catálogo, p. 17

PAUKSCH, E., HOLSTEN S., LIN, M., TIKAL, F., 2008, 'Zerspantechnik' (engl. Machining Technology), Vieweg+Teubner, Wiesbaden (GER).

REIS, A. Estudo do Emprego de Broca Especial em Substituição ao Alargador na Produção de Furos em Ferro Fundido Vermicular. 2014. 135f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.

ROSA, V. A. O. Investigação da Operação de Alargamento dos Furos Usinados em Pistões de Ferro-Carbono Sinterizado. 2012. 122 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SANDVIK COROMANT®, Brocas de trepanação: [https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/drilling/application\\_overview/dedicated\\_methods/trepanning](https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/drilling/application_overview/dedicated_methods/trepanning) (Acesso em: 29 de março de 2018).

SANDVIK COROMANT®, Mandril Hidromecânico Disponível em: [http://www.sandvik.coromant.com/ptpt/technical\\_guide/boring/troubleshooting/reaming/page/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/ptpt/technical_guide/boring/troubleshooting/reaming/page/default.aspx). Acesso em: 06 março. 2013.

SANTOS, S. C., SALES, W. F., Aspectos Tribológicos da Usinagem,- São Paulo, Artiliber Editora, 2007.

SENAI 2010 – Apostila de Usinagem, 95p, editora Senai-sp.

SILVEIRA, D. Superando Desafios em Furação Profunda. Revista O Mundo da Usinagem; Publicação da Sandvick Coromant do Brasil ISS Nº 1518-6091 RGBN 217-147 pág. 22 a 27, 2013.

SIQUEIRA, I. L., LACERDA, H. B., PIACESI, R. A., JUNIOR, W. S. OLIVEIRA, F. A. S de. ESTUDO DA USINAGEM DAS SEDES DE VÁLVULAS DE ADMISSÃO DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA 17º POSMEC. FEMEC/UFU, Uberlândia-MG, 2007.

SKF, Manual Técnico SKF, SKF Ferramentas S.A., São Paulo, 1987.

STEMMER, C.E., 1995, Ferramentas de Corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos, 2ª. edição, Editora da UFSC, Florianópolis-SC, pp. 33-43.

TÖNSHOFF, H.K., SPINTING W., KÖNIG, W., e NEISES A., Machining of Holes Developments in Drilling Technology, **Annals of the CIRP**, volume 43/21994, p. 551-561, 1994.

VIANA, R. Estudo da Caracterização de Ferramentas de Corte Texturizadas a Laser e Revestidas Utilizadas no Fresamento Frontal de Ferro Fundido Vermicular. 2009, 183 f. Tese Doutorado em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

VOLVO, 2006, “Volvo 850 GLT Engine”, The Volvo Owners Club, disponível em: [www.volvoclub.org.uk/tech/850GLT-EngineTechInfo.pdf](http://www.volvoclub.org.uk/tech/850GLT-EngineTechInfo.pdf). Acesso em: 20/01/2014.

WANG, J. , ZHANG, Q., A study of high-performance plane rake faced twist drills. Part I: Geometrical analysis and experimental investigation, School of Mechanical and Manufacturing Engineering, The University of New South Wales, Sydney, Australia, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Elsevier, pp. 1276 a 1286.

WEINERT, K.; ADAMS F. J.; BIERMANN, D.; THAMKE, D. Alargadores de corte único: corte mais eficiente, além de vantagens econômicas. *Revista Máquinas e Metais*, São Paulo, n 392, pp. 38-57, jan. 1998.

YAMADA, Y., 2010. Melhoria da produtividade na obtenção de ligas de alumínio aeronáutico com ferramentas de aço rápido. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.